



# THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE  
FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY DE YAMOOUSSOUKRO**

**Mention : PHYSIQUE**

**Spécialité : Instrumentation optique, Spectroscopie par télédétection, traitement du signal**

---

Développement d'instrumentation optique fondée sur le principe de la spectroscopie par télédétection pour la caractérisation des espèces volantes

---

Présentée et soutenue publiquement le 7 décembre 2020 par

**M. KOUAKOU Kouassi Benoît**

Devant le jury composé de :

M. LOUM Laussane Georges	Professeur Titulaire Institut National Polytechnique Houphouët Boigny	Président
M. ZOUEU Thouakessèh Jérémie	Professeur Titulaire Institut National Polytechnique Houphouët Boigny	Directeur
Mme. DABO Niang Sophie	Professeur Titulaire Université de Lille	Rapporteur
M. DZAGLI Milohum Mikesokpo	Maître de conférences Université Lomé-Togo	Rapporteur
Mme. ZORO Emma Georgina	Maître de conférences Université Félix Houphouët Boigny	Examineur

## Résumé

Les insectes représentent une part importante de la biodiversité. Certains insectes contribuent à la pérennisation de la flore par la pollinisation. D'autres sont d'excellents biodéfenseurs contre les moustiques qui sont des vecteurs de maladies. D'autres encore se sont révélés de véritables agresseurs de cultures vivrières. L'utilisation abusive des pesticides et des insecticides pour lutter contre ces derniers a eu un impact négatif sur l'entomofaune. La tendance aujourd'hui est d'utiliser ces moyens de lutte sous seuil en vue de préserver les populations des pollinisateurs. Les techniques de dénombrements utilisées couramment par les spécialistes qui consiste au piégeage et à la capture sont critiquées du fait qu'elles ne fournissent pas une bonne représentativité des espèces d'insectes présentes dans un environnement. Dès lors, leur évaluation et leur caractérisation devient un enjeu majeur. Cette thèse a eu pour objectif général de développer une instrumentation optique fondée sur le principe de la spectroscopie par télédétection et une stratégie d'exploration et d'analyse de données capable de caractériser, d'identifier et d'étudier les insectes en utilisant leurs empreintes spectrales, la fréquence de battement de leurs ailes, leur taille d'une part et, d'autre part, de mesurer les corrélations de ces paramètres avec ceux des saisons, de la météo, de l'environnement, des mouvements migratoires des insectes nuisibles. Pour atteindre ces objectifs, nous avons proposé un instrument constitué du couple lunette astronomique-télescope associé à un spectromètre, un détecteur quatre quadrants (QPD), un détecteur linéaire et une station météo pour des mesures synchrones des différents paramètres. Des mesures tests ont été effectuées sur le site nord de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro. Pour une durée de mesure de trois heures, plus de 23000 insectes ont été détectés. Cela fait un ratio de plus 7666 insectes par heure. Nos études ont montré également que les insectes sont plus nombreux dans la zone de mesure au lever et au coucher du soleil. Les résultats ont montré que cet instrument peut être utilisé comme outil d'aide à la décision en ce qui concerne, par exemple, les investissements à programmer dans la lutte vectorielle.

**Mots-clés :** Instrumentation, télédétection, spectroscopie, lidar, traitement du signal, faune, insectes nuisibles.

## **Abstract**

Insects represent an important part of biodiversity. Some insects contribute to sustainability of flora through pollination. Others are excellent biodefenders against mosquitoes which are disease vectors. Still others have turned out to be real aggressors of food crops. Overuse of pesticides and insecticides had negative impact on entomofauna. The trend today is to use them below threshold in order to preserve pollinators populations. Counting techniques commonly used by specialists, which consists of trapping and capture, are criticized for not providing good representativeness of insect species present in an environment. Therefore, their evaluation and characterization become a major issue. The general objective of this thesis was to develop an optical instrumentation based on remote sensing spectroscopy principle and a data exploration and analysis strategy capable of characterizing, identifying and studying insects using their spectral footprints, their wingbeat frequency, their size on the one hand and, on the other hand, to measure correlations of these parameters with those of seasons, weather, environment, migratory movements of harmful insects. To achieve these objectives, we have proposed an instrument made up of pair of telescopes associated with a spectrometer, a quadrant detector (QPD), a linear detector and a weather station for synchronous measurements of various parameters. Test measurements were carried out on the north site of the National Polytechnic Institute Félix Houphouët Boigny (INP-HB) in Yamoussoukro. For a measurement period of three hours, more than 23,000 insects were detected. That makes a ratio of over 7666 insects per hour. Our studies have also shown that insects are more numerous in the measurement area at sunrise and sunset. Results showed that this instrument can be used as a decision support tool with regard to, for example, the investments to be programmed in vector control.

**Key-words:** Instrumentation, remote sensing, spectroscopy, lidar, signal processing, fauna, pests.

## Remerciements

Ce travail s'est déroulé au Laboratoire d'Instrumentation, Image et Spectroscopie (L2IS) rattaché à l'Unité Mixte de Recherche et d'Innovation en Génie Électronique et Électrique (UMRI-GEE).

Je tiens à remercier celles et ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet. Merci au directeur du L2IS, Professeur Zoueu Thouakessh Jérémie pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire et encadré. Je voudrais lui exprimer toute ma gratitude pour sa disponibilité et son aide, pour l'ensemble des échanges constructifs que nous avons pu avoir, et pour m'avoir transmis son sens du détail et de la pédagogie.

Je remercie Professeur Loum Laussane Georges qui, malgré ses multiples occupations, a bien voulu présider le jury de cette thèse ; Mme. Dabo Niang Sophie, Professeur Titulaire, M. Dzagli Milohun Mikesopko, Maître de conférences, qui ont consacré beaucoup de temps à lire et à rédiger avec intérêt les rapports de thèse, je leur dis merci.

Merci aux membres du réseau Africain d'Imagerie et de Spectroscopie (AFSIN) pour les différentes contributions lors des différents ateliers de formation.

Je remercie Mikkel Brydegaard, Samuel Jansson, Elin Malmqvist de l'Université de Lund, Suède, pour leur contribution et les échanges fructueux.

Merci aux enseignants de l'Unité de Formation et de Recherche des Sciences Fondamentales et Appliquées (UFR-SFA) de l'Université Nangui Abrogoua, pour la formation de qualité dont nous avons bénéficié durant les deux premiers cycles universitaires.

Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe du Laboratoire d'Instrumentation, Image et Spectroscopie de l'INP-HB. Merci au Professeur Konan Kouakou, au Professeur Kouacou Abaka, au Dr Wognin Essé Léon, au Dr Abou Akoun, au Dr Kouakou Anicet, au Dr Yalé Pavel, au Dr Réglima Guy Oscar, au Dr Agnero Marcel, au Dr Diby Wilfried, au Dr Bagui Kossan Olivier, au Dr Konin Edoukoua, au Dr Yebouet Marie Florence et à tous les autres membres du laboratoire. Votre soutien a été décisif pour l'atteinte des objectifs de ces travaux.

**Table des matières**

Résumé .....	I
Abstract .....	II
Remerciements .....	III
Liste des tableaux .....	VII
Liste des figures .....	VIII
Liste des abréviations et des sigles.....	XI
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I : Généralités .....	7
1 : Spectroscopie et télédétection .....	7
1-1 : Spectroscopie .....	7
1-2 : Télédétection .....	9
1-3 : Spectroscopie par télédétection .....	10
2 : Spectroscopie optique de rétrodiffusion .....	11
2-1 : Diffusion de la lumière.....	11
2-2 : Diffusion de Rayleigh .....	12
3 : Caractérisation optique .....	13
3-1 : Paramètre statique .....	13
3-2 : Paramètre dynamique .....	14
4 : Analyse des données de la télédétection .....	14
4-1 : Analyse par réseaux de neurones.....	14
4-2 : Analyse spectrale .....	16
5 : Télémétrie .....	17
CHAPITRE II : Techniques expérimentales .....	20
1 : Dispositif expérimental .....	20
1-2 : Dispositif expérimental en télédétection passive .....	22
1-2 : Dispositif en télédétection active.....	23
2 : Source d'illumination.....	24
2-1 : Soleil.....	24
2-2 : Laser .....	25
3 : Télescope.....	25

4 : Lunette astronomique.....	26
5 : Détecteurs.....	28
5-1 : Spectromètre : Ocean Optics Spectrometer USB 4000 .....	32
5-2 : Détecteur linéaire.....	34
5-3 : Photodétecteur quatre quadrants .....	38
CHAPITRE III : Caractérisation des insectes en télédétection passive .....	44
I : Caractérisation des insectes en vol par la mesure de l'enveloppe spectrale et de l'image ....	44
I-1 : Mesure de l'empreinte spectrale .....	44
I-2 : Méthode d'extraction de l'information spectrale.....	46
I-2-1 : Méthode d'extraction de l'information spectrale à partir d'un seuil d'intensité .....	46
I-2-2 : Méthode d'extraction de l'information spectrale à partir de la fraction de bruit maximale .....	48
I-3 : Identification des insectes par leur image par l'analyse multivariée.....	49
I-4 : Résultats et discussion.....	51
II : Caractérisation des insectes en vol en fonction des paramètres dynamiques et statiques..	59
II-1 : Mesure des paramètres statiques et dynamiques .....	59
II-2 : Méthode de calibrage de la direction de vol.....	60
II-3 : Méthode de calibrage de la section efficace en télédétection passive.....	61
II-4 : Méthode d'extraction des données du QPD et méthode d'analyse fréquentielle. ....	61
II-5 : Résultats et discussion .....	63
CHAPITRE IV : Caractérisation des insectes en télédétection actives.....	69
I : Caractérisation des insectes en vol par télédétection active dans le domaine des kilohertz. 69	69
I-1 : Méthode de calibrage .....	69
I-1-1 : Méthode de calibrage de la distance .....	70
I-1-2 : Méthode de calibrage de la section efficace en télédétection active.....	72
I-2 : Méthode d'acquisition et d'analyse des données .....	74
I-3 : Analyse des fréquences .....	76
I-4 : Résultats et discussion.....	78
II : Proposition de modèles pour le suivi et le contrôle de l'activité des insectes .....	87
II-1 : Analyse statistique et spectrale .....	88
II-2 : Estimation des fréquences fondamentales .....	94

<i>II-3 : Estimation des effets des paramètres météorologiques .....</i>	<i>100</i>
<i>II-3-1 : Évolution temporelle de l'abondance des insectes en fonction de la température et de l'humidité .....</i>	<i>100</i>
<i>II-3-2 : Modélisation de l'abondance des insectes par la méthode des moindres carrées.....</i>	<i>102</i>
<i>II-3-3 : Modélisation de l'abondance des insectes par le réseau de neurones artificiels.....</i>	<i>103</i>
<i>CONCLUSION .....</i>	<i>110</i>
<i>Références.....</i>	<i>112</i>
<i>ANNEXES.....</i>	<i>119</i>
<i>ANNEXE A : Algorithme d'acquisition des données avec le spectromètre.....</i>	<i>119</i>
<i>ANNEXE B : Algorithme d'analyse des données de mesure lidar .....</i>	<i>122</i>
<i>ANNEXE C : Calibration de la distance .....</i>	<i>129</i>
<i>Publications scientifiques.....</i>	<i>132</i>

## Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Quelques fonctions de transfert.....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 2 : Tableau de spécification du détecteur .....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 3 : Tableau explicatif des variables .....</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 4 : Tableau récapitulatif des variables .....</i>	<i>90</i>



## Liste des figures

Figure 1 : Spectre électromagnétique. Adopté de [30] .....	8
Figure 2 : Principe de base de la télédétection.....	10
Figure 3 : Cycle de battement d'ailes et évolution de la section efficace optique [48].....	14
Figure 4: Composants d'un réseau de neurones artificiels .....	15
Figure 5 : Exemples de topologies de réseaux de neurones : (a) RNA perceptron multilinéaire ; (b) RNA Elman récursif.....	16
Figure 6 : Photographie annotée du dispositif expérimental en télédétection passive .....	21
Figure 7 : Photographie du dispositif expérimental en spectroscopie par télédétection active.	22
Figure 8 : Vue schématique de dessus du dispositif expérimental en télédétection passive .....	23
Figure 9 : Vue schématique par-dessus du dispositif expérimental en configuration de Scheimpflug.....	24
Figure 10 : Influence de la nature du matériau éclairé sur le type de charges libérées par le rayonnement. Adopté de [30].....	29
Figure 11 : Schéma du spectromètre à réseaux .....	33
Figure 12: Image de la caméra linéaire.....	34
Figure 13 : Interface graphique d'utilisation du détecteur linéaire .....	37
Figure 14 : Diagramme interne du circuit intégré LM324 AN .....	38
Figure 15 : Diagramme de connexion du circuit du QPD .....	39
Figure 16 : (a) Image d'un DAQ 6009. (b) Schéma des broches analogiques (AI et AO) et des broches digitales (P) .....	39
Figure 17 : (a, b) Interface utilisateur du programme de contrôle du QPD. (c) Diagramme de contrôle du QPD.....	41
Figure 18 : Vue mosaïque du système de mesure de l'empreinte spectrale. (a) Récepteur. (b) Boîte noire. (c) Sphère lambertienne en chute libre.....	45
Figure 19 : Structures des données d'acquisition avec le spectromètre. ....	47
Figure 20 : Éboulis des valeurs singulières. Cette courbe représente la décroissance des valeurs de la diagonale principale de la matrice $S$ des valeurs singulières.....	50
Figure 21 : Distribution temporelle des intensités moyennes après filtrage.....	51
Figure 22 : Intensités de réflectance (a) du soleil et (b) de spécimens volants.....	52
Figure 23: Réflectance d'insectes .....	52
Figure 24: Spectres de réflectance extraits par MNF.....	53

Figure 25 : Part d'inertie cumulée en fonction du nombre de dimensions. La dimension retenue est égale à 19. Cela est représenté par un carré sur la courbe. ....	54
Figure 26 : Spectres de réflectance. ....	54
Figure 27 : Spectres de réflectances de chaque espèce de spécimens détectés. La classe C9 représente 20% des observations et la classes C10 représente 50% des observations. ....	56
Figure 28 : Images d'insectes associées à chaque classe. ....	56
Figure 29 : Vue mosaïque du système de mesure. (a) Récepteur. (b) Boîte noire. (c) Image du pendule en oscillation libre. (d) Photo du pendule de calibration de la direction de vol. ....	60
Figure 30 : Structure des données avec le photodétecteur quatre quadrants. ....	62
Figure 31 : Oscillation du pendule. (a) Intensités lumineuses converties en tension par le DAQ. (b) Valeurs de la tension après soustraction du bruit de fond. ....	62
Figure 32 : Oscillation temporelle du pendule Est-Ouest et orientation du QPD. ....	63
Figure 33 : Section efficace en fonction du temps de quatre insectes et leur direction de vol. ....	65
Figure 34 : (a) Section efficace optique en fonction du temps. ....	66
Figure 35 : Représentation schématique du dispositif expérimental dans la configuration de Scheimpflug. ....	70
Figure 36 : Distance en fonction de la position du pixel. ....	72
Figure 37 : Simulation de l'atténuation de l'intensité lumineuse en fonction de la distance pour un télescope de Newton. ....	73
Figure 38 : Courbes de variations des intensités minimales, médianes et maximales. ....	76
Figure 39: (A, B) Densité spectrale de puissance (DSP) ; (C, D) Section efficace optique temporelle (SEO). ....	78
Figure 40 : Histogramme de distribution spatiale des insectes en fonction du temps. Mesure du 28/05/2018 entre 18 :00 et 21 :00. ....	79
Figure 41: Histogramme de distribution spatiale des insectes en fonction du temps. Mesure du 30/12/2018 entre 14 :00 et 19 :00. ....	80
Figure 42 : Histogramme de distribution de la taille des insectes en fonction du temps. Mesure du 28/05/2018 entre 18 :00 et 21 :00. ....	81
Figure 43 : Histogramme de distribution de la taille des insectes en fonction du temps. Mesure du 30/12/2018 entre 14 :00 et 19 :00. ....	81
Figure 44 : (a, b) Déplacement temporel de deux insectes dans le champ de vision du télescope. (c, d) Évolutions temporelle de la SEO respectivement de ces deux insectes. ....	82
Figure 45: Déplacement temporel de deux insectes et leurs SEO temporelles respectives. ....	82
Figure 46 : Déplacement temporel et évolution temporelle de la SEO de deux insectes. ....	83

Figure 47 : Distribution géospatiale des insectes au cours de la matinée entre 08 :00 et 11 :00 .....	84
Figure 48 : Distribution géospatiale des spécimens volants entre 08:00 et 19:00 .....	85
Figure 49 : Évolution de l'abondance des insectes en fonction du temps .....	85
Figure 50 : Histogramme de probabilité de temps de transition. Le temps modal de transition des insectes dans le volume défini par le faisceau laser est d'environ ( $\Delta t$ ) = 30 ms .....	88
Figure 51: (a, c, e) Section efficace de trois insectes en fonction du temps. (b, d, f) Densités spectrales de battement d'ailes respectivement des insectes observés à la figure 6- a, c, e.....	89
Figure 52 : Évaluation du nombre de classe.. .....	90
Figure 53 : Distance euclidienne entre chaque groupe. Le dendrogramme montre la ressemblance entre chaque insecte. 51 groupes d'espèces ont été identifiés. ....	92
Figure 54 : Toutes les observations groupées en 51 classes. ....	93
Figure 55 : Section efficace apparente en fonction de la section efficace. ....	94
Figure 56 : Distribution spatio-temporelle des insectes.....	94
Figure 57: (a) Section efficace temporelle de battement. (b) Fonction d'autocorrélation normalisée en fonction du décalage horaire. (c) Signal de la section efficace optique .....	96
Figure 58: Répartition temporelle de l'abondance des insectes.....	98
Figure 59: Répartition dans le temps de l'abondance des insectes.....	99
Figure 60 : Vue aérienne du site de mesure à partir de Google Map. ....	99
Figure 61 : Histogramme thermohumidité de l'abondance temporelle des insectes. Mesure du 4 au 5 février 2018 .....	101
Figure 62 : Histogramme thermohumidité de l'abondance temporelle des insectes. Mesure du 22 au 23 février 2018 .....	101
Figure 63: (a) Histogramme des erreurs. (b) Nombre d'observations prédits en fonction des données expérimentales. Mesures du 4 au 5 février 2018.....	103
Figure 64 : Valeurs prédites (Sortie) en fonction des valeurs expérimentales (Cible). ....	105
Figure 65 : Histogramme des erreurs de l'apprentissage, de validation et de test.....	105
Figure 66 : Diagramme explicatif de la matrice de confusion. Les exposants indiquent l'ordre des taux calculés.....	107
Figure 67 : Matrice de confusion entre les valeurs prédites (Sortie) et les valeurs expérimentales (Cible).....	108

**Liste des abréviations et des sigles**

ACF	<i>Auto Correlation Function</i>
AI	<i>Analogique Input</i>
AO	<i>Amplificateur Opérationnel</i>
CCD	<i>Couple Charged Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CoAil	<i>Contribution des Ailes</i>
CoCor	<i>Contribution du Corps</i>
CV	<i>Champ de Vision</i>
DAQ	<i>Dispositif en Amont de la Qualification</i>
DFT	<i>Discret Fourier Transform</i>
DSP	<i>Densité Spectrale de Puissance</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
INP-HB	<i>Institut National Polytechnique Houphouët Boigny</i>
IR	<i>Infra-Rouge</i>
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission Radiation</i>
LED	<i>Light Electroluminescence Diode</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
Matlab	<i>Matrix laboratory</i>
MNF	<i>Maximum Noise Fraction</i>
PMT	<i>Photo Multiplier Tube</i>
QPD	<i>Quadrant Photo Detector</i>
RMN	<i>Résonance Magnétique Nucléaire</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RNA	<i>Réseau de Neurones Artificiel</i>
RsN	<i>Root square Norme</i>
SEO	<i>Section Efficace Optique</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
STFT	<i>Short Time Fourier Transform</i>
TF	<i>Transformée de Fourier</i>
TFD	<i>Transformée de Fourier Discret</i>

<i>TFR</i>	<i>Transformée de Fourier Rapide</i>
<i>TFTD</i>	<i>Transformée de Fourier à Temps Discret</i>
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i>
<i>UV</i>	<i>Ultra-Violet</i>
<i>VI</i>	<i>Virtual Instrument</i>

## INTRODUCTION

L'exigence croissante de notre ère en termes de performance, de productivité et d'amélioration des conditions de vie des populations a placé la science de la mesure au centre de la prise de décision. Les résultats de la mesure permettent ainsi d'opérer des choix et d'améliorer les performances et les rendements des systèmes dans des domaines divers tels que les sciences humaines, sociales, technologiques, etc. [1–5].

Les récentes découvertes technologiques ont également contribué au progrès des disciplines comme les capteurs et les instruments qui ont permis d'étendre les domaines d'applications des sciences de la mesure à des problématiques nouvelles telles que l'amélioration de la productivité agricole, l'épidémiologie des maladies à transmission vectorielle, etc. [6–8]. C'est dans ce contexte que des efforts de recherches sont en cours pour concevoir des instruments au service de l'entomologie. Il s'agit de concevoir des instruments non-invasifs, capable de détecter, caractériser et classifier des insectes volants sans les capturer. Notre travail de thèse s'inscrit donc dans cette dynamique. Dans ce contexte, des chercheurs ont utilisé des instruments associés à des capteurs pour inventorier et étudier la dynamique des insectes. Les premiers instruments proposés ont utilisé la technologie des radiofréquences pour suivre les espèces volantes de grandes tailles, tels que les oiseaux et les mammifères [9,10]. Des émetteurs radio à piles sont fixés sur les espèces volantes de grande taille pour suivre leur dynamique. Ces équipements étant pour la plupart volumineux et lourds ne peuvent être transportés par tous les insectes volants, surtout ceux de petite taille. Le radar harmonique a été utilisé pour suivre les bourdons et, bien que ce système se soit révélé très utile, il existe de sérieuses limitations. Le radar harmonique nécessite de fixer verticalement une antenne de 3 cm au dos d'une abeille par exemple, empêchant efficacement l'abeille d'accéder à son nid et de récolter des ressources à partir de fleurs. En outre, le système fonctionne uniquement en visibilité directe, ce qui signifie que le signal est perdu si une abeille vole derrière un objet intermédiaire telle qu'une haie [11–13]. L'avènement de nanocapteurs a permis de lever cette équivoque. Mais, ces technologies, utilisant le radar et les nanocapteurs, sont très coûteux et ne sont pas à la portée des pays en voie de développement.

Dans ces dernières années, des chercheurs se sont axés sur des méthodes optiques pour développer des instruments optiques pour caractériser les espèces volantes de la faune. En 2009, Mikkel Brydegaard et *al* ont utilisé un système embarqué constitué de télescopes pour différencier la libellule mâle de la libellule femelle par la mesure du spectre de fluorescence à l'aide de photomultiplicateurs (PMT). La source lumineuse utilisée pour illuminer ces libellules a été le laser [14,15]. Plus tard, en 2012, Anna Runemark et *al* ont introduit le concept de spectroscopie par télédétection à champ sombre, par analogie à la microscopie à champ sombre, en proposant un instrument à moindre coût constitué d'un télescope et d'un spectromètre pour différencier et évaluer le nombre d'insectes par leurs empreintes spectrales. L'instrumentation proposée par Anna Runemark a montré ces limites du fait que l'empreinte spectrale acquise n'était associée à aucune image [16]. Aussi, le phénomène d'iridescence observé pour certains insectes a rendu peu fiable l'empreinte spectrale mesurée de l'insecte en vol libre. Pour pallier cette insuffisance Alem et *al* ont proposé en 2017, une autre approche de caractérisation des insectes par télédétection passive, en utilisant un photodétecteur à quatre quadrants pour identifier les insectes par la fréquence de battement de leurs ailes. La calibration du dispositif proposé par ces derniers, à l'aide de sphères lambertiennes, d'une part, leur a permis de déterminer la section efficace des insectes et, d'autre part, à l'aide d'un pendule en oscillation libre, pour déterminer la direction de vol des insectes. L'un des défis majeurs de ces instruments de télédétection optique est d'être capable de mesurer avec précision la fréquence de battement d'ailes des insectes de petites tailles à des distances de l'ordre de kilomètres [17]. La plupart de ces insectes ont des fréquences de battements d'ailes très rapides. Pour relever ce défi, Mikkel Brydegaard et *al* ont proposé en 2014, une nouvelle configuration des systèmes lidars classiques [18]. Le dispositif proposé est constitué d'un système émetteur (laser + réfracteur) et d'un système récepteur (caméra linéaire + réflecteur). Le détecteur a été incliné d'un angle de  $45^\circ$  par rapport à l'axe optique du réflecteur pour augmenter la résolution spatiale du dispositif et ainsi être capable d'établir une cartographie de l'abondance des insectes. La fréquence d'échantillonnage de la caméra utilisée est de l'ordre du kilohertz [19]. Cela leur a permis de mesurer la fréquence de battement d'ailes rapides de certains insectes tels que les moustiques et les moucheron [20]. Tout récemment, Samuel Jansson et *al* ont démontré la possibilité de déterminer la position spatiale des insectes en utilisant la

méthode de spectroscopie par télédétection passive à l'aide d'un télescope et d'un détecteur quatre quadrants [21].

Ainsi les sciences technologiques s'intéressent de plus en plus au développement de nouveaux instruments originaux de mesures dans les domaines agricoles ou de la santé publique [22–24].

Les mesures générées par ce type d'instruments nouveaux sont parfois de tailles importantes et leur analyse nécessite le développement de nouvelles méthodes pour explorer les corrélations avec les paramètres d'influences et pour en saisir les effets pour une meilleure prise de décision. Les domaines nouveaux comme l'analyse des données volumineuses (*big data*) ou encore (*data mining*) exploration des données ont fait leur apparition et sont en pleine expansion [16,25,26].

Ces domaines de l'analyse des données volumineuses font appel à des techniques d'analyses multivariées, d'analyses factorielles ou de réseaux de neurones pour extraire les paramètres influents. Ces techniques ont été utilisées par Anna Runemark et al en 2012 pour catégoriser un grand nombre de spectres de réflectance d'insectes acquis avec un système de spectroscopie par télédétection à champ sombre. Elle a aussi étudié, avec ses collaborateurs, l'influence de la température et de la vitesse du vent sur l'abondance des insectes en proposant un modèle de second degré fonction de la température et de la vitesse du vent. Les coefficients du modèle ont été estimés par la méthode statistique des moindres carrés [16]. Carsten et ses collaborateurs, quant à eux, ont utilisé la méthode d'analyse multivariée en 2016, pour caractériser les insectes en fonction de leur morphologie (taille) [25]. En dehors de ces techniques multivariées, d'autres méthodes d'analyses permettant de caractériser les insectes ont été utilisées. Ces méthodes d'analyse se fondent sur les analyses de Fourier pour estimer la fréquence de battement d'ailes des insectes. En 2007, David et ses collaborateurs ont estimé la fréquence de battement d'ailes des abeilles à partir de l'harmonique fondamentale de la densité spectrale de puissance de l'intensité lumineuse rétrodiffusée par les abeilles [27]. Cette méthode d'analyse fréquentielle a été utilisée également par certains chercheurs en 2014 [28]. En 2016, Une méthode élaborée a été proposée par une équipe de chercheurs de l'université de Lund, Suède. Cette méthode a consisté à estimer une fréquence initiale à partir de la densité spectrale de puissance



puis à rechercher, dans un intervalle de fréquences centrées autour de la fréquence initiale, la fréquence qui recrée le mieux la section efficace de l'insecte. Cette fréquence est évaluée comme étant la fréquence fondamentale [29].

Cette thèse a eu pour objectif de développer une instrumentation optique fondée sur le principe de la spectroscopie par télédétection et le développement de stratégies d'exploration et d'analyse de données pour caractériser, identifier et étudier les insectes en utilisant leurs empreintes spectrales, à travers la fréquence de battement de leurs ailes, par leur taille d'une part et, d'autre part, de mesurer les corrélations de ces paramètres avec ceux des saisons, de la météo, de l'environnement, des mouvements migratoires des insectes nuisibles. C'est le but de fournir des données et des outils d'analyse pour venir à bout des nuisances occasionnées par certains insectes tels que les moustiques, les mouches ainsi que les maladies comme le paludisme, la dengue et bien d'autres.

Le présent mémoire de thèse s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la généralité. Ce chapitre donne une vue générale de la notion de spectroscopie optique et de la télédétection nécessaire à la compréhension des résultats de nos recherches consignés dans ce manuscrit. Il a aussi abordé les notions de spectroscopie de rétrodiffusion qui englobent la diffusion de la lumière et les méthodes de caractérisation optique. Les paramètres statiques et dynamiques qui caractérisent les insectes sont exposés. Et, les bases théoriques de l'analyse des données de spectroscopie par télédétection qui s'appuient sur les méthodes statistiques et spectrales sont également évoquées. Le deuxième chapitre traite des techniques expérimentales qui exposent essentiellement le descriptif des composants du dispositif utilisé, leurs configurations géométrique et mécanique. Les systèmes électroniques utilisés sont décrits et les processus d'acquisitions des données sont expliqués. Le troisième chapitre traite de la spectroscopie par télédétection passive. Il expose la caractérisation spectrale et spatiale des insectes en vol. Ce chapitre traite également de la méthode d'extraction des données avec le spectromètre et de la technique d'analyse statistique utilisée pour associer chaque image à son empreinte spectrale. Notre contribution a été d'associer l'analyse d'image à l'étude spectrale. Il traite également de l'étude de la caractérisation fréquentielle des insectes en vol libre avec un photodétecteur quatre quadrant (QPD) que nous avons effectué. Il est spécifiquement

question de la méthode de calibration de la section efficace, de la méthode de calibration de la direction de vol et de la mesure de la fréquence de battement d'ailes des insectes. Le quatrième chapitre traite de notre contribution à la technique lidar utilisée pour caractériser les insectes de petites tailles à grande distance et de la méthode de calibrage de la section efficace en utilisant l'intensité rétrodiffusée du faisceau laser par un tableau en néoprène. Il est aussi question de la méthode d'extraction des données et de calibrage de la distance. Il est aussi question des techniques d'analyses que nous avons développées pour le suivi et le contrôle de l'activité des insectes. Dans ce dernier chapitre, une part est consacrée à l'étude statistique des insectes en général et en particulier des moustiques vecteurs de maladie, de l'estimation de la section efficace, de l'estimation de la fréquence fondamentale. Il traite aussi des études de corrélations que nous proposons en vue d'analyser l'effet des paramètres météorologiques sur les insectes et de l'analyse statistique pour la modélisation de l'activité des insectes et enfin une conclusion.

---

## **CHAPITRE I : Généralités**

---

## CHAPITRE I : Généralités

Le développement spectaculaire des techniques de spectroscopie optique visant à extraire et caractériser des informations des spécimens à partir du processus d'interaction laser-matière a fait d'elle une technique incontournable dans le domaine de la recherche. La mesure de la quantité de lumière rétrodiffusée par les objets éloignés, à l'issue de l'interaction lumière-matière, se fait à l'aide d'instrument de mesure par télédétection. La lumière rétrodiffusée est dominée, dans la majorité des cas, par la diffusion de Rayleigh. Cette diffusion est étroitement liée à la section efficace optique des spécimens étudiés. Pour les insectes en vol, la section efficace optique varie au cours du temps grâce au battement régulier des ailes. La fréquence de battement des ailes des insectes est généralement obtenue par l'analyse de Fourier.

Ce chapitre traite des notions nécessaires à la compréhension des méthodes utilisées au cours des travaux effectués dans cette thèse. Il comportera quatre parties essentielles :

- Spectroscopie et télédétection ;
- Spectroscopie optique de rétrodiffusion ;
- Caractérisation optique ;
- Et enfin l'analyse des données de la télédétection.

### 1 : Spectroscopie et télédétection

#### 1-1 : Spectroscopie

La spectroscopie est l'étude et l'analyse de l'interaction de l'onde électromagnétique avec la matière. La nature de l'onde électromagnétique qui interagit avec la matière détermine le type de spectroscopie. Ainsi, on parlera de spectroscopie infrarouge (IR) lorsque la longueur d'onde de l'onde électromagnétique est comprise entre  $0,75 \mu\text{m}$  et  $1000 \mu\text{m}$ , de spectroscopie optique lorsque la longueur d'onde de l'onde électromagnétique est comprise entre  $0,4 \mu\text{m}$  et  $0,75 \mu\text{m}$  et de spectroscopie ultraviolet (UV) lorsque la longueur d'onde de l'onde électromagnétique est comprise entre  $0,01 \mu\text{m}$  et  $0,4 \mu\text{m}$  (Figure 1).

La spectroscopie a pour objet l'identification et la caractérisation d'un corps par l'analyse des modifications spectrales (longueur d'onde, intensité) de la source de lumière. Cette technique expérimentale est abondamment utilisée dans plusieurs domaines comme la chimie, la biologie, la métallurgie, etc. La notion s'est étendue à toutes les techniques expérimentales de caractérisation de la matière produisant un spectre de toute nature. Nous pouvons citer :

- la spectroscopie de masse qui caractérise et identifie la matière par l'analyse du spectre de masse ;
- la spectroscopie RMN qui utilise les propriétés magnétiques de certains noyaux de la matière.

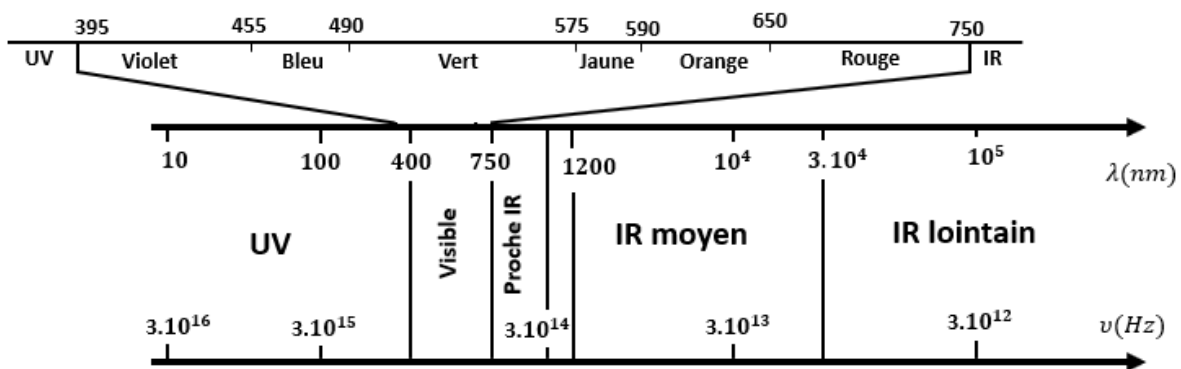


Figure 1 : Spectre électromagnétique. Adopté de [30]

Le résultat d'une interaction onde-matière est déterminé à la fois par les propriétés de l'onde incidente, telles que l'amplitude, la phase, la longueur d'onde, la polarisation etc., et par la structure et la composition de la matière avec laquelle l'onde interagit. L'interaction onde-matière dépend fortement de l'énergie quantique de l'onde (Eq.1). Cette énergie quantique est proportionnelle à la fréquence  $\nu$  de l'onde électromagnétique, elle-même inversement proportionnelle à la longueur d'onde de l'onde électromagnétique,  $\lambda$ :

$$E_q = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{Eq. 1}$$

Où  $h$  est la constante de Planck et  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide.

La fréquence et la longueur d'onde peuvent ainsi être utilisées pour définir l'énergie de l'onde électromagnétique. Une énergie plus élevée correspond à des longueurs

d'onde plus courtes, tandis que des énergies plus basses correspondent à des longueurs d'onde plus grandes [31–35].

La polarisation d'une onde électromagnétique en propagation est définie comme la direction de la composante du champ électrique transverse de l'onde. La direction de polarisation du champ électrique de l'onde non polarisée rectiligne ou circulaire est aléatoire tandis que la direction de polarisation est bien définie pour l'onde polarisée rectiligne. La composante du champ électrique tourne, dans ce cas, à une vitesse constante dans un plan pendant que l'onde se propage [36,37].

Dans de nombreux cas, la polarisation de l'onde incidente influence la manière dont elle interagit avec la matière. De plus, l'état de polarisation de l'onde électromagnétique change souvent après une interaction. Par exemple, lorsque la lumière polarisée linéairement traverse un milieu diffusant, elle perd sa polarisation linéaire [38,39].

## **1-2 : Télédétection**

La télédétection est une technique qui permet d'acquérir des informations sur un objet ou une surface à distance sans contact physique avec l'objet ou la surface. Cette technique d'acquisition d'informations est utilisée quotidiennement par l'homme à travers la vue, l'odorat, l'ouïe ...

Dans la pratique, l'acquisition de l'information à distance se fait par l'intermédiaire de dispositifs comme le radar, le télescope, les appareils photographiques, le sonar, les satellites, etc.

Le principe de la télédétection repose sur l'interaction entre trois (03) éléments fondamentaux que sont la cible, la source d'énergie et le vecteur (Figure 2) :

- La cible, en télédétection, est l'objet ou le phénomène étudié.
- La source d'énergie est l'élément illuminant la cible en émettant une onde électromagnétique. L'élément illuminant peut être une source d'énergie naturelle (soleil, lune, luciole, etc.) ou une source d'énergie artificielle (laser, onde radio, etc.). La nature de la source d'énergie utilisée caractérise le type de télédétection. Ainsi, on parlera de télédétection passive lorsque la source d'énergie utilisée est une source

d'énergie naturelle et de télédétection active lorsque la source d'énergie utilisée est une source d'énergie artificielle.

- Le vecteur est le système qui permet de mesurer le rayonnement réfléchi par la cible. En d'autres termes, c'est l'ensemble de l'instrumentation utilisée pour mesurer le rayonnement réfléchi [40–42].

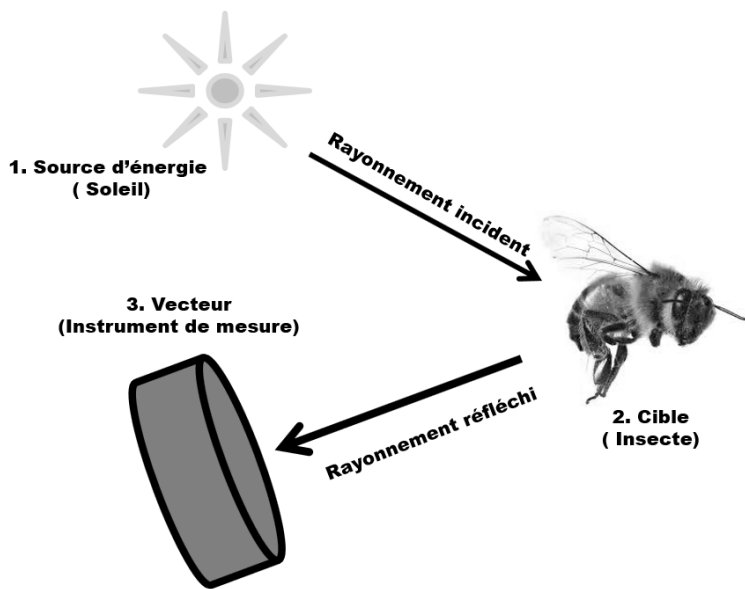


Figure 2 : Principe de base de la télédétection.

### 1-3 : Spectroscopie par télédétection

La spectroscopie par télédétection est une technique de mesure indirecte des propriétés de la matière lorsqu'elle entre en interaction avec une onde électromagnétique. Cette technique spectroscopique mesure avec un détecteur le rayonnement rétrodiffusé ou transmis par la matière pour en extraire ces propriétés intrinsèques ou son état vibrationnel.

Deux techniques de spectroscopie par télédétection sont couramment utilisées. La spectroscopie par télédétection passive qui utilise comme source lumineuse le soleil et la spectroscopie par télédétection active. Dans le deuxième cas de spectroscopie par télédétection, le laser est utilisé comme source de rayonnement incident. Cette technique est connue sous l'acronyme anglais LIDAR qui signifie *Light Detection And Ranging*. C'est une technique de mesure de la distance et de la caractérisation des propriétés de la matière à partir des propriétés de la lumière. Le lidar classique utilise un laser à modulation de fréquence et mesure le temps mis par un photon pour

effectuer un trajet aller-retour du détecteur à la cible pour déduire la distance de la cible par rapport au détecteur. L'équation lidar classique (Eq. 2) est obtenue en négligeant les diffusions multiples et en supposant que les processus de diffusion sont indépendants. Son expression dépend du nombre total de photons transmis ( $N_T$ ), de la transmission ( $T$ ), de la distance entre deux photons successifs ( $\Delta z$ ), de l'efficacité optique du dispositif ( $\eta$ ), du coefficient de diffusion volumique ( $\beta$ ), de l'angle solide du récepteur ( $\frac{A_c}{z^2}$ ), de la fonction de recouvrement géométrique ( $O(z)$ ) et du bruit ( $N_B(z)$ ) [43].

$$N_{sig}(\lambda_s, \lambda_T, z) = N_T \cdot \frac{\beta(\lambda_s, \lambda_T, z)}{4\pi} \cdot \Delta z \cdot \frac{A_c}{z^2} \cdot T(\lambda_s, \lambda_T, z) \cdot \eta \cdot O(z) + N_B(z) \quad \text{Eq. 2}$$

## 2 : Spectroscopie optique de rétrodiffusion

La spectroscopie optique de rétrodiffusion est une technique de spectroscopie optique qui se fonde sur la mesure de l'intensité lumineuse rétrodiffusée par la matière pour caractériser les propriétés de cette dernière. Cette technique a largement été utilisée dans l'étude des particules atmosphériques.

### 2-1 : Diffusion de la lumière

La diffusion de la lumière est le processus par lequel la lumière incidente est déviée dans toutes les directions de propagation lorsqu'elle rencontre des inhomogénéités sur son trajet. Ce processus de diffusion peut être soit élastique, c'est-à-dire la lumière diffusée conserve la même longueur d'onde que la lumière incidente, soit inélastique, dans ce cas, la longueur d'onde de la lumière diffusée est différente de la longueur d'onde de la lumière incidente [44,45].

La description de la diffusion élastique de la lumière à partir de particules assimilées à des sphères peut être divisée en trois types en fonction de la taille de l'objet diffusant par rapport à la longueur d'onde de la lumière incidente. Lorsque la taille des particules diffusantes est nettement inférieure à la longueur d'onde de la lumière (rayon  $< 0.03\lambda$ ), ce qui est souvent le cas pour les atomes et les molécules en spectroscopie optique, la théorie de Rayleigh est suffisante pour décrire la diffusion. Ce type de diffusion est appelée la diffusion de Rayleigh. Lorsque la taille des particules diffusantes est approximativement égale à la longueur d'onde de la lumière incidente, la théorie de Mie est utilisée pour décrire le phénomène de diffusion. Ce



type de diffusion est appelée la diffusion de Mie. Enfin, si la taille des objets diffusants est très grande que la longueur d'onde de la lumière incidente, le processus de la diffusion de la lumière peut être décrit dans une large mesure en utilisant les lois de Snell-Descartes que sont les lois de la réflexion et de la réfraction [46].

## 2-2 : Diffusion de Rayleigh

La diffusion de Rayleigh des molécules, par exemple, peut être décrite comme la réémission de lumière lorsque les molécules passent instantanément à l'état fondamental à partir d'un état excité dans un état d'énergie supérieure virtuelle. Ce processus est classiquement décrit comme une diffusion dipolaire induite. La composante de champ électrique oscillante de l'onde électromagnétique incidente agit sur les charges des atomes ou des molécules dans le milieu de propagation de l'onde et les fait osciller dans la direction de propagation à la même fréquence d'oscillation. Les particules deviennent alors des dipôles rayonnants, émettant de la lumière avec la même longueur d'onde que la lumière incidente. Le processus de diffusion entraînera des fluctuations de densité dans le milieu, ce qui entraînera également un décalage de la lumière diffusée par les dipôles rayonnants. Les intensités de diffusion de Rayleigh de chaque molécule peuvent être additionnées pour obtenir l'intensité de diffusion totale de Rayleigh. Le signal de Rayleigh est donc proportionnel à la densité en nombre de particules, ainsi que la section transversale de Rayleigh de l'espèce en question.

La différentielle de la section efficace de diffusion de Rayleigh,  $d\sigma_R$ , par angle solide,  $d\Omega$ , dépend de l'angle de polarisation de la composante de champ électrique de la lumière incidente,  $\phi_{pol}$ , de l'écart entre la direction de l'angle solide d'observation et la direction de propagation de la lumière incidente dans le plan de diffusion (plan zy),  $\theta_{obs}$ , de l'indice de réfraction du milieu,  $n$ , de la longueur d'onde de la lumière incidente,  $\lambda$ , et de la densité en nombre de molécules du milieu,  $N$ , selon l'équation Eq. 3 [37] :

$$\frac{d\sigma_R(\theta_{obs}, \phi_{pol})}{d\Omega} = \frac{\pi(n^2-1)^2}{N^2\lambda^4} (\cos^2\phi_{pol}\cos^2\theta_{obs} + \sin^2\phi_{pol}) \quad \text{Eq. 3}$$

La diffusion de Rayleigh dépend de la longueur d'onde. Elle diminue d'un facteur de  $\frac{1}{\lambda^4}$  avec une augmentation de la longueur d'onde. L'équation Eq. 3 montre également que la direction d'observation en relation avec la polarisation de la lumière incidente

est d'une grande importance pour la détection de la diffusion de Rayleigh par exemple, aucune lumière ne sera dispersée dans la direction de polarisation de la lumière incidente. L'intensité de la rétrodiffusion de Rayleigh ( $\theta_{obs}=180^\circ$ ) est identique à celle de la diffusion vers l'avant de Rayleigh ( $\theta_{obs}=0^\circ$ ). Cela est vrai à la fois pour la lumière polarisée et non polarisée. Lorsque la taille des particules augmente, entraînant la diffusion de Mie, la diffusion vers l'avant devient de plus en plus dominante.

### **3 : Caractérisation optique**

#### **3-1 : Paramètre statique**

La section efficace optique en entomologie par télédétection d'un insecte décrit sa capacité à réfléchir ou à rétrodiffuser les photons dans la direction du récepteur. Cette section efficace est similaire à la section efficace radar.

La quantité de photons de réflexion ou de rétrodiffusion dépend de la source lumineuse et de la réflectivité de l'insecte. Pour obtenir la section efficace optique d'un insecte dans une plage de longueurs d'ondes spécifiques, il convient d'utiliser un détecteur dont la bande spectrale contient ces longueurs d'onde et des objets de calibrage capable de réfléchir ces longueurs d'onde. Pour le calibrage de la section efficace optique, il convient de prendre des objets de forme sphérique ou de surface uniforme, car ils présentent la même section efficace optique sur toute la surface quel que soit l'orientation de l'objet par rapport à la source lumineuse.

Les ailes des insectes sont symétriques par rapport au plan sagittal de leur corps par conséquent, leur section efficace optique dépendra fortement de l'orientation dans l'espace de leur corps par rapport à la source de lumière incidente et par rapport au détecteur. Cette section efficace optique dépendra également du cycle de battement des ailes. Il y a donc, dans ce cas, une dépendance du cycle de battement de la longueur d'onde, de l'orientation, de la phase et du temps de transition (Figure 3) [47,48].

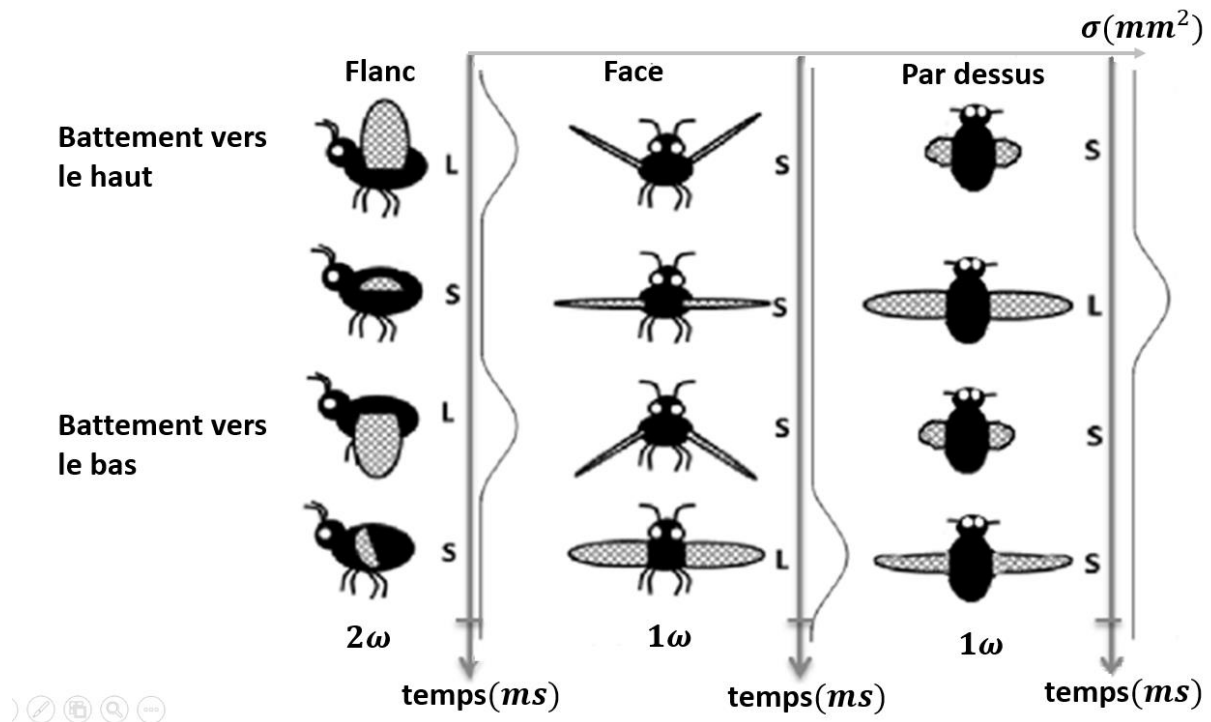


Figure 3 : Cycle de battement d'ailes et évolution de la section efficace optique [48]

### 3-2 : Paramètre dynamique

La section efficace optique d'un insecte en vol varie au cours du temps. Cela est due au battement régulier des ailes de l'insecte. Ce battement régulier des ailes est caractéristique de chaque insecte. Les méthodes par l'analyse de Fourier ont largement été utilisées pour déterminer la fréquence de battement d'ailes régulier des insectes et pour différencier les insectes mâles des insectes femelles [27,49–51]. En dehors des méthodes par l'analyse de Fourier, d'autres méthodes utilisant les réseaux de neurones artificiels ont été exploitées pour déterminer la fréquence fondamentale de battements d'ailes des insectes.

## 4 : Analyse des données de la télédétection

### 4-1 : Analyse par réseaux de neurones

Un réseau de neurones artificiels (RNA) est une interconnexion d'unités de traitement appelées neurones artificiels. Ces neurones sont constitués de trois composants : les connexions pondérées, la fonction de combinaison et la fonction de transfert (Figure 4). Les signaux d'entrées passent par les connexions puis s'accumulent dans le nœud de sommation. Les poids de connexion peuvent être positifs ou négatifs. Au moyen de ces poids, la connexion module la quantité d'informations échangées au nœud de

sommation. Le signal sommé,  $n$ , passe à la sortie par une fonction de transfert,  $f$ , qui peut être de type linéaire ou non linéaire. Cette fonction de transfert produit la sortie du neurone. Le tableau 1 résume quelques fonctions de transfert couramment utilisé [52,53].

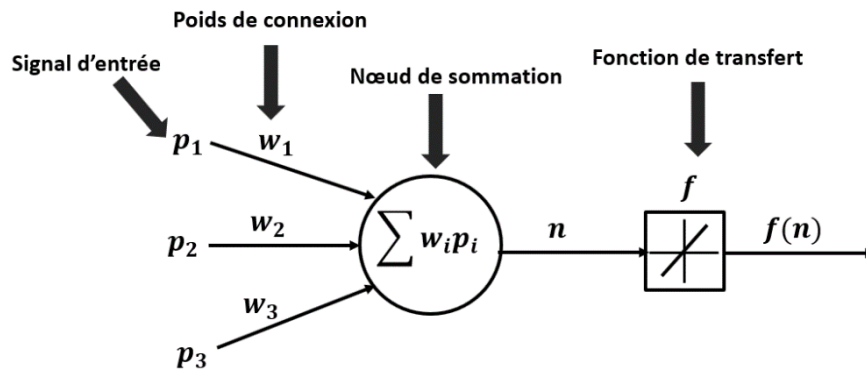


Figure 4: Composants d'un réseau de neurones artificiels

Tableau 1: Quelques fonctions de transfert

Fonction de transfert	Expression de la fonction de transfert
Linéaire	$f(x) = x$
Log sigmoid	$f(x) = \frac{1}{1 - e^{-x}}$
Tan sigmoid	$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1$

Les RNA sont organisés en couches de neurones. Tous les neurones d'une couche ont les mêmes entrées et la même fonction de transfert. Les différentes couches d'un RNA typique sont illustrées à la Figure 5. Il peut y avoir une ou plusieurs couches cachées. Le nombre de couches et le nombre de neurones dans chaque couche dépendent de la complexité du problème à résoudre et de la précision souhaitée.

Il existe différentes topologies de RNA. Une classification peut être faite en fonction de l'existence d'un retour d'information dans le réseau. Dans les réseaux dits récurrents, les interconnexions des neurones permettent une rétroaction du flux de données entre les couches. Avec cela, une certaine « mémoire à court terme » est obtenue, car les informations introduites dans le réseau influencent temporairement la réponse ultérieure de leurs neurones. Le réseau Elman (Figure 5b) appartient à ce groupe. Les réseaux de Jordan, Kohonen ou Hopfield en sont un autre exemple. Par

les réseaux sans retour d'information (réseaux à anticipation), les informations sont toujours transmises. Ainsi, les entrées pour les éléments d'une couche ne peuvent provenir que des sorties des neurones précédents dans la direction du flux de données. Le type de RNA principal de ce groupe est le réseau multicouche Perceptron.

Le réseau de perceptron contient des neurones avec des fonctions non-linéaires (Figure 5a), ce qui lui permet d'émuler des propriétés de mappage non-linéaires et rend le réseau adapté à de nombreuses applications. De plus, il est prouvé (théorème de Kolmogorov) qu'un réseau de perceptrons à deux couches de neurones avec une fonction non-linéaire peut générer n'importe quelle fonction en sortie avec l'approximation souhaitée.

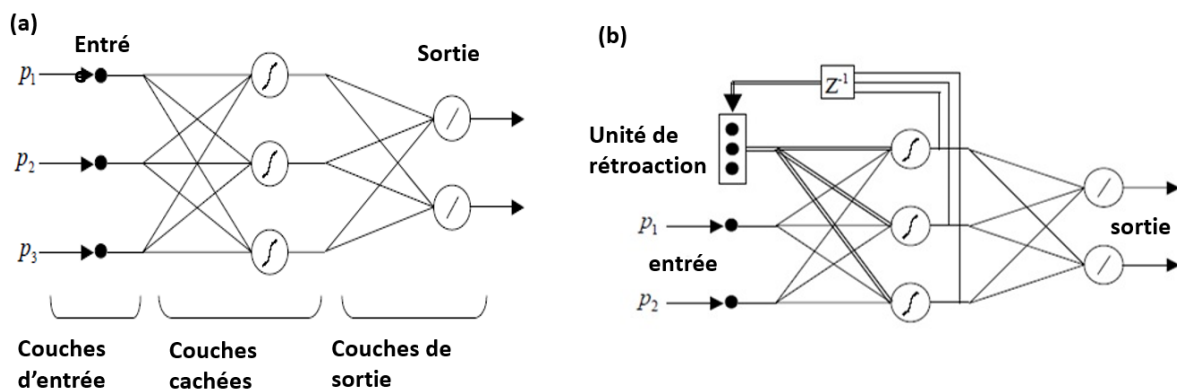


Figure 5 : Exemples de topologies de réseaux de neurones : (a) RNA perceptron multilinéaire ; (b) RNA Elman récursif

## 4-2 : Analyse spectrale

### - Série de Fourier

Soit  $s(t)$  un signal à variable temporelle  $t$  et de période  $T_0$  ( $T_0=1/f_0$ ).  $s(t)$  peut être développé en somme de fonctions sinus et cosinus de fréquences  $f = nf_0$ ,  $n = 1,2,3...$  où  $f_0$  est appelé la fréquence fondamentale soit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t) \quad \text{Eq. 4}$$

$a_0$ ,  $a_n$  et  $b_n$  sont appelés les coefficients de la série de Fourier.

### - Transformée de Fourier (TF)

Les signaux non-périodiques sont assimilés à des signaux de période infinie. Leur décomposition en une somme d'harmoniques est appelée transformée de Fourier (Eq. 5). La transformée de Fourier de ces signaux existe si leur énergie est finie.

Les signaux observés étant à durée finie alors leur énergie est aussi finie. D'une façon plus générale, la transformée de Fourier n'est rien d'autre qu'une extension de la notion de série de Fourier [54–56].

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot e^{-2\pi ft} dt \quad \text{Eq. 5}$$

La transformée de Fourier  $\mathcal{F}[s]$  de  $s(t)$  est en générale une fonction complexe qui comprend une partie réelle  $\Re$  et une partie imaginaire  $\Im$ .

$$\Re(S(f)) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \cos(2\pi ft) dt \quad \text{Eq. 6}$$

$$\Im(S(f)) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \sin(2\pi ft) dt \quad \text{Eq. 7}$$

### - Transformée de Fourier à Temps Discret (TFTD)

Soit  $s_e(t)$  un signal obtenu à partir de l'échantillonnage du signal  $s(t)$  avec une période d'échantillonnage  $T_e$ .

On appelle TFTD  $S_e(f)$  de  $s_e(t)$  la combinaison linéaire d'exponentielles complexes  $e^{-j2\pi n f T_e}$  pondérées par la valeur des échantillons  $s(nT_e)$ .

$$S_e(f) = \sum_{n=0}^{N-1} s(nT_e) e^{-j2\pi n f T_e} \quad \text{Eq. 8}$$

### - Transformée de Fourier Discret (TFD)

La Transformée de Fourier Discret (TFD) d'un signal discret  $s_e$  à  $N$  échantillons obtenu à partir de l'échantillonnage du signal  $s$  avec une période d'échantillonnage  $T_e$  est définie par l'équation Eq. 9 [57]:

$$S_e(k) = \sum_{N=0}^{N-1} s(nT_e) e^{-j2\pi n \frac{k}{N}} \quad \text{Eq. 9}$$

## 5 : Télémétrie

La télémétrie est une technique de mesure de distance. Elle consiste à mesurer la distance qui sépare un objet et un émetteur / récepteur d'onde. L'onde peut être une onde optique (c'est le cas des systèmes lidar) ou non optique (système radar, sonar) [58–60]. Plusieurs méthodes existent pour effectuer la mesure de la distance.

Une première méthode dite « temps de vol », consiste à émettre une onde sur l'objet et à capter l'onde réfléchi. La distance capteur / objet est déterminé par le temps total,

$t_{total}$ , que met l'onde de vitesse de propagation,  $v_{onde}$ , à faire l'aller/retour. La distance de détection,  $d$ , est donnée par l'équation Eq. 10 :

$$d = \frac{v_{onde} t_{total}}{2} \quad \text{Eq. 10}$$

Une deuxième méthode consiste à moduler l'amplitude de l'onde laser puis à mesurer le décalage de phase entre l'onde émise et l'onde reçue. La mesure de la distance est déduite de cette différence de phase [61].

Une autre méthode couramment utilisée est la méthode par triangulation. Cette méthode utilise une source laser et un capteur linéaire formant un triangle avec l'objet. La distance séparant le capteur et la source laser étant connue, la distance de l'objet par rapport au capteur est déduite des relations métriques du triangle. Dans cette thèse, nous avons utilisé la méthode par triangulation car cette méthode est moins coûteuse contrairement aux autres méthodes.

Ce chapitre nous a permis de passer en revue les techniques de spectroscopie et de télédétection. Aussi, nous avons décrit les grandeurs de caractérisation de spécimens volants. Ces grandeurs sont l'empreinte spectrale, la section efficace et la fréquence de battement des ailes. L'exploitation de ces différentes notions nous ont permis de développer des techniques expérimentales pour acquérir ces différentes grandeurs et cela est l'objet du chapitre suivant.

---

## **CHAPITRE II : Techniques expérimentales**

---



## CHAPITRE II : Techniques expérimentales

Ce travail de thèse vise à développer des méthodes capables d'identifier et de caractériser de petits insectes pendant leurs vols et traversant une région d'intérêt, en utilisant leurs empreintes spectrales, la fréquence de battement de leurs ailes, leur taille et leur distribution géospatiale.

Pour atteindre cet objectif, il a fallu construire un dispositif expérimental intégrant à la fois la mesure à distance et des méthodes de caractérisations spectrales.

Ce chapitre traite donc des techniques expérimentales mises en œuvre en vue d'acquérir les signaux rétrodiffusés par les insectes en vol.

Il comportera cinq parties essentielles :

- Le dispositif de télédétection dans ces composantes active et passive ;
- Les détecteurs utilisés pour acquérir les signaux rétrodiffusés par les spécimens en vol ;
- Les sources lumineuses utilisées pour interroger les spécimens étudiés ;
- La station météo qui collecte les données permettant de connaître les conditions environnementales dans lesquelles évoluent les spécimens étudiés ;
- Et enfin, les codes d'acquisition qui relient les différentes parties du dispositif expérimental pour les faire fonctionner ensemble en vue d'acquérir les données.

### 1 : Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental que nous présentons ici est un système de télédétection utilisé en physique de l'atmosphère, fondé sur le principe du lidar, permettant la mesure à distance et l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur par l'élément à étudier comme les suspensions dans l'atmosphère.

Au laboratoire, nous disposons de deux types de montage de télédétection. Chacun de ces montages a été réalisé pour un objectif commun : la caractérisation des espèces de l'aérofaune. Le premier type de montage présenté à la Figure 6 est constitué du couple

lunette astronomique-télescope qui a servi à collecter les rayonnements rétrodiffusés par les insectes en vol. Nous avons utilisé deux différents détecteurs :

- le spectromètre pour la mesure de l’empreinte spectrale des insectes ;
- le photodétecteur quatre quadrants (QPD) pour la mesure de la direction de vol et de la fréquence de battement d’ailes des insectes.

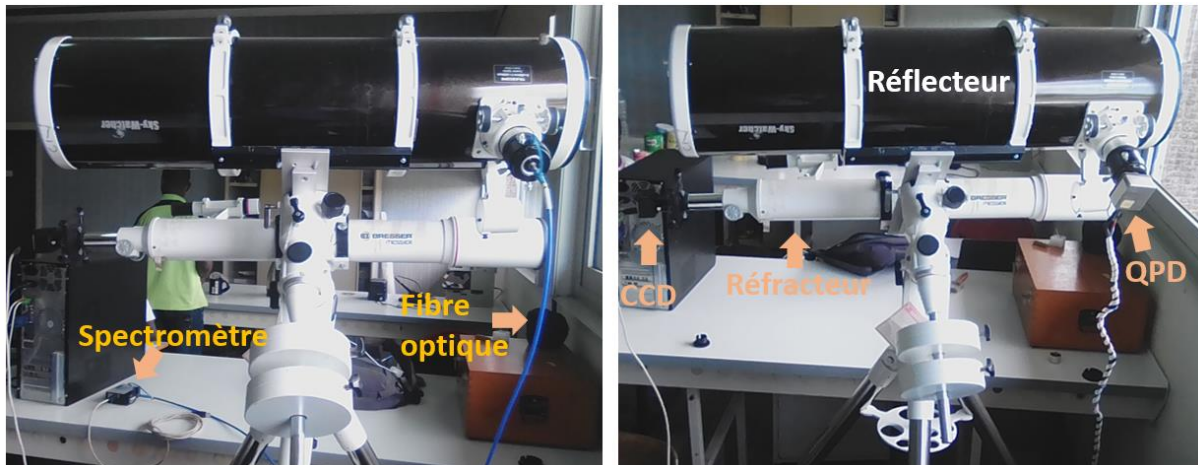


Figure 6 : Photographie annotée du dispositif expérimental en télédétection passive

La configuration du dispositif de la Figure 6 limite sa résolution spatiale et les différents détecteurs utilisés ne sont pas rapides pour détecter les insectes dont la fréquence de battements de leurs ailes est, par exemple, supérieure à 500 Hz. Dans le souci d’accroître la résolution spatiale de notre dispositif de spectroscopie par télédétection et sa capacité à détecter les fréquences de battement rapides d’ailes d’insectes, nous avons réorganisé la configuration du dispositif en utilisant un détecteur linéaire constitué de 2048 pixels et dont la fréquence d’échantillonnage atteint 4kHz. Nous avons incliné le détecteur d’un angle de 45° et nous l’avons monté en respectant le principe de Scheimpflug (Figure 7) [19,62–64]. Dans ces conditions, chaque pixel du détecteur linéaire a un plan focal et cela a permis d’étendre la résolution spatiale de notre dispositif. Pour s’affranchir de la contrainte du soleil comme source d’illumination, nous avons utilisé un laser infrarouge de longueur d’onde 808 nm et un module électronique, le multiplexeur temporel. Cela a permis les mesures de jour comme de nuit.

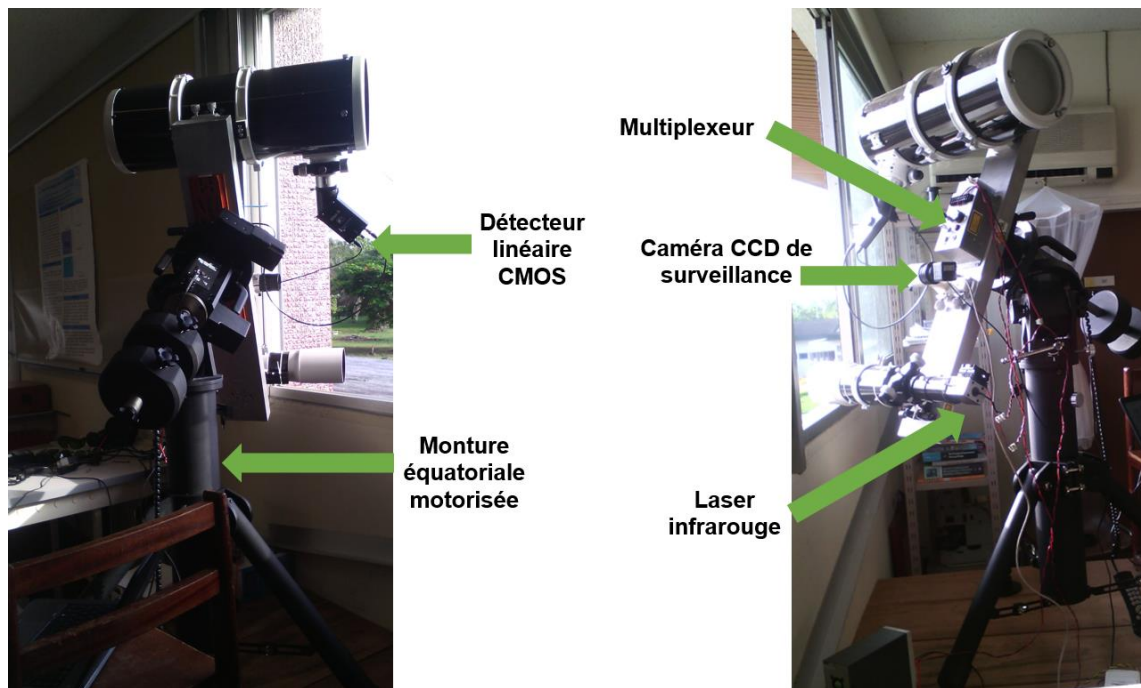


Figure 7 : Photographie du dispositif expérimental en spectroscopie par télédétection active

Les insectes étant insensibles aux longueurs d'onde infrarouge, nous avons donc choisi un laser infrarouge pour éviter que la source de lumière soit un piège pour les insectes et ainsi induire des erreurs de mesures [2].

Nous décrivons également dans cette partie, le principe de montage, les éléments essentiels du dispositif d'acquisition, les grandes lignes des programmes informatiques développés pour automatiser les acquisitions et l'utilisation de l'interface d'acquisition du logiciel associé à la caméra linéaire.

### 1-2 : Dispositif expérimental en télédétection passive

En télédétection passive, le réflecteur (*Skywatcher telescope ; D=200 mm ; F=1000 mm ; coated optic*) et le réfracteur (*Bresser Messier ; AR 90 Achromatic refractor telescope 90/900 f/10.0 ; coated optics*) ont été montés en parallèle sur une barre en aluminium avec une distance de séparation  $L$  ( $L=500 \text{ mm}$ ). L'ensemble a été fixé sur une monture équatoriale. La position du contrepoids est ajustée afin de déterminer la position d'équilibre dans le plan  $xy$  et dans le plan  $yz$ . Il est souvent nécessaire de jouer sur la position du télescope et de la lunette astronomique pour ajuster l'équilibre dans le plan  $yz$ . La détermination du point d'équilibre permet d'obtenir une flexibilité au niveau de

la manipulation de l'instrument. Cela permet également à l'instrument de rester fixe aux faibles pressions atmosphériques, ce qui minimise les marges d'erreurs dans les mesures. La figure 8 présente une vue schématique de dessus du dispositif expérimental en télédétection passive.

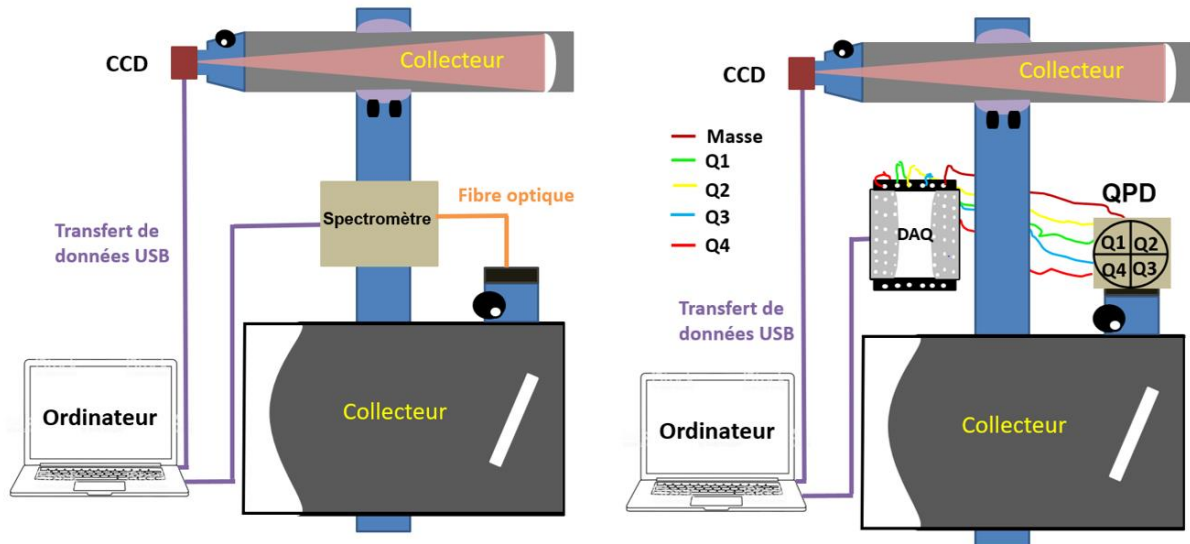


Figure 8 : Vue schématique de dessus du dispositif expérimental en télédétection passive

### 1-2 : Dispositif en télédétection active

En télédétection active, nous avons fixé le télescope (Skywatcher ; telescope ;  $D=200$  mm ;  $F=500$  mm ; coated optics) et la lunette astronomique (Skywatcher ; telescope ;  $D=102$  mm ;  $F= 500$  mm ; coated optics) sur une barre en aluminium ( $150$  mm  $\times$   $30$  mm  $\times$   $950$  mm) avec une distance de séparation de  $814$  mm. L'ensemble a été monté, ensuite, sur une monture équatoriale motorisée (Skywatcher AZ-EQ6 GT) d'environ  $50$  kilogrammes. Puis nous avons fixé le laser (class 3B ; max. power  $3.2$  W, wavelength  $808$  nm) sur l'orifice du réfracteur et le détecteur linéaire sur l'orifice du réflecteur. Dans les systèmes de montages classiques, le plan du détecteur et le plan de l'objet sont parallèles et cela réduit la profondeur de champ du dispositif. Pour accroître la profondeur de champ du dispositif et la dynamique des plans focaux, nous avons incliné le détecteur linéaire d'un angle de  $45^\circ$  par rapport au miroir primaire du télescope de telle sorte que le plan du détecteur coupe l'axe du laser. Le laser et la caméra linéaire ont été interconnectés à partir d'un module électronique (multiplexeur temporel). La figure 9 montre une vue schématique de dessus du dispositif d'acquisition en télédétection active.

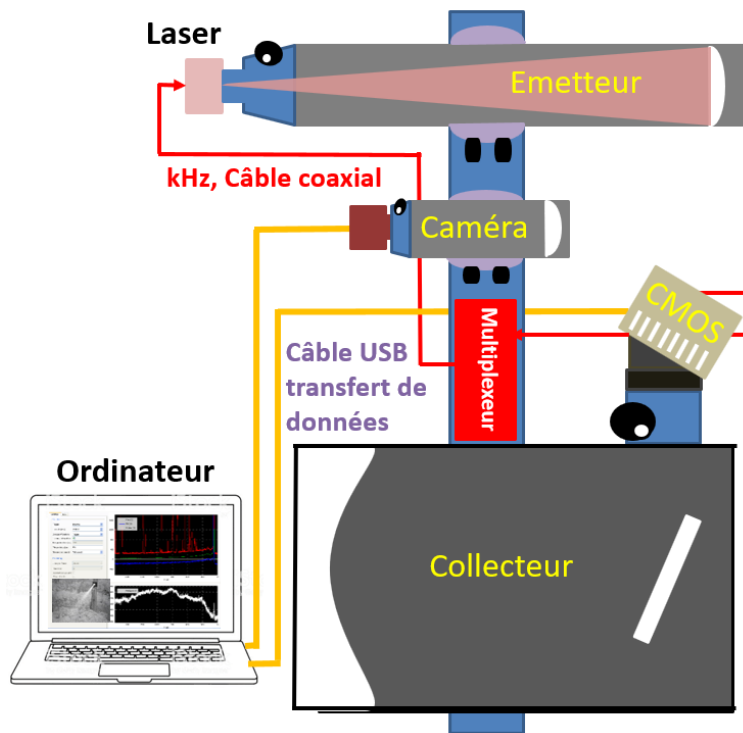


Figure 9 : Vue schématique par-dessus du dispositif expérimental en configuration de Scheimpflug.

## 2 : Source d'illumination

### 2-1 : Soleil

En télédétection passive, la source d'illumination que nous avons utilisée est le soleil. Car Le soleil est une source de radiations à large bande spectrale qui s'étend de l'ultraviolet (UV) à l'infrarouge (IR), avec une intensité d'environ  $1 \text{ kW} / \text{m}^2$ . Dans les conditions atmosphériques homogènes, pendant le jour, les radiations du soleil sont continues et stables et permettent d'acquérir des radiations plus intenses que celles de la lune. De plus, le rayonnement du soleil obéit à la loi de Planck. Dans le domaine visible (400 nm – 700 nm) la température maximale atteinte par le soleil autour de la terre est d'environ 5780 K.

L'utilisation du soleil comme source de rayonnement incident est beaucoup contraignante. Car le rayonnement solaire n'est pas stable et change avec les conditions atmosphériques. Par exemple, la quantité de lumière qui atteint la terre varie quand il y a des nuages qui couvrent le soleil. De plus, l'angle d'incidence des rayonnements du soleil varie au cours de la journée du fait du déplacement du soleil. Et enfin, en

téledétection passive, il est pratiquement impossible d'étudier le comportement des insectes nocturnes [65].

## 2-2 : Laser

Le LASER est l'acronyme anglais de *Light Amplification by Stimulated Emission Radiation* qui signifie Amplification de la Lumière par Émission Stimulée de Rayonnement. La théorie derrière tous les types de laser est fondamentalement la même. Ils ont tous besoin de milieu amplificateur et d'inversion de population électronique pour produire de la lumière laser. Le type de lasers à utiliser est fonction de l'application auxquelles il est destiné, par exemple le soudage, le découpage, la communication, le stockage de données ou comme dans notre cas, les applications expérimentales en spectroscopie [66–68].

Le laser que nous avons utilisé est un laser infrarouge (IR) de longueur d'onde 808 nm. La puissance générée par ce laser est de 3,2 watts.

## 3 : Télescope

Le télescope que nous avons utilisé est le télescope de Newton. Il est composé de deux miroirs :

- Un miroir primaire de forme concave tourné vers l'objet. C'est l'objectif du télescope.
- Un miroir secondaire plan incliné d'un angle de  $45^\circ$  par rapport à l'axe optique du miroir primaire et est tel que son axe optique coïncide avec l'axe optique du miroir primaire [69]. La face du miroir secondaire est orientée vers un orifice sur lequel ont été fixés les différents capteurs que nous avons utilisés au cours de cette thèse.

Le télescope de Newton est un système optique qui est exempt d'aberrations chromatiques, nous l'avons choisi pour collecter les intensités lumineuses rétrodiffusées par les insectes pour la mesure des grandeurs physiques comme l'empreinte spectrale et la fréquence de battement d'ailes des insectes.

L'alignement des optiques d'un dispositif expérimental est très important. Étant donné qu'un télescope avec son miroir secondaire possède un second composant optique principal, trois opérations d'alignement sont nécessaires en soi : pour le

dispositif de mise au point, le miroir secondaire et le miroir primaire. Lors de l'examen initial d'un télescope nouvellement acheté ou tout juste construit, tous les composants doivent, bien entendu, être vérifiés rapidement.

Un rapporteur est utilisé pour vérifier si le focuser est réellement situé perpendiculairement au tube. Lors des réglages ultérieurs, le focuser peut généralement être ignoré. Ensuite, les miroirs secondaires et primaires doivent être collimatés.

La première étape consiste à centrer tous les éléments optiques visibles à travers le dispositif de focalisation. L'œil humain est sensible à la superposition des surfaces circulaires résultant des changements de position de la lumière. Tout ce qui est requis ici est un tube de visée qui aide à garder l'œil au centre de la cible. Si cet instrument est disponible, un oculaire Cheshire peut également être utilisé car il possède un « judas » central.

La première étape consiste à regarder le miroir secondaire et à ajuster la vue du miroir primaire de manière à ce que le miroir primaire soit centré sur le miroir secondaire. Le miroir primaire et le miroir secondaire doivent également se retrouver au centre du tube de focalisation. Un laser est très utile pour effectuer des ajustements précis sur les angles d'inclinaison relatifs des deux surfaces du miroir. Lorsque qu'un laser de focalisation est utilisé au niveau de l'orifice, la réflexion du faisceau laser sur le miroir primaire est visible sous la forme d'un petit point rouge en regardant du côté de l'objectif. Le but est de le déplacer au centre du miroir primaire en effectuant des ajustements précis. Dans un second passage, le miroir primaire est réajusté pour que le faisceau laser soit à nouveau réfléchi sur lui-même. Dans ces conditions, les optiques sont donc correctement alignées. Les collimateurs laser qui utilisent un petit écran opaque pour montrer la position du faisceau réfléchi sont très utiles et facilitent les derniers pas d'alignement jusqu'à ce que le faisceau disparaisse en lui-même. Une fois que cela est observé, alors le télescope est collimaté.

#### **4 : Lunette astronomique**

La lunette astronomique est un dispositif optique utilisé en physique de l'atmosphère pour sonder le ciel profond. Au bout du tube le plus éloigné de l'observateur, il y a

une lentille qui collecte la lumière de l'objet examiné pour former une image de l'autre extrémité qui est vue au moyen d'un oculaire ou d'un détecteur.

La lentille des lunettes astronomiques ne peut être constituée d'une seule pièce de verre car un tel élément est incapable de faire converger une lumière de différentes longueurs d'onde, introduisant un effet prismatique qui fait que les objets lumineux sont entourés de fausses couleurs ou d'aberrations chromatiques. Cette qualité indésirable des lunettes astronomiques est pratiquement éliminée dans les lunettes astronomiques modernes. Car la lentille de ces lunettes astronomiques est fabriquée à partir de deux éléments en verre dotés de caractéristiques optiques qui « annulent » efficacement les aberrations chromatiques [69].

La lunette astronomique que nous avons utilisée en télédétection passive est de type Bresser. Cet instrument est sensible aux défauts d'alignement. Ces défauts amplifient de façon significative les aberrations optiques comme les aberrations chromatiques.

La collimation de la lunette astronomique consiste en l'alignement de deux composants : le focuser et l'axe optique de la lentille. Le focuser doit viser précisément à travers le tube au centre de l'objectif, tandis que l'axe optique de la lentille doit suivre le même chemin vers le centre exact du focuser. La première étape consiste à vérifier l'alignement correct du dispositif de focalisation et à le corriger si nécessaire. Cependant, il est essentiel que le focuser fonctionne sans aucun jeu et ne peut être déplacé en avant ou en arrière.

Lors de la visualisation de l'objectif avec un léger angle, la réflexion du faisceau laser provenant du dispositif de focalisation et traversant l'objectif est visible. Il est déconseillé de tenir la tête dans le sens du faisceau car le rayon laser pourrait pénétrer dans l'œil et causer des dommages à la rétine.

Le focalisateur est aligné de telle sorte que le faisceau laser passe précisément par le centre de l'objectif. Pour effectuer une collimation ultérieure, vous avez besoin d'un oculaire Cheshire dans le focuser. L'objectif du télescope doit être complètement recouvert pour éviter que la lumière ne pénètre dans la lunette par l'avant. Une lumière est dirigée dans le télescope par l'ouverture latérale de l'oculaire Cheshire. En regardant à travers le trou d'alignement arrière du Cheshire dans un objectif de



réfracteur mal aligné, on voit au moins deux réflexions lumineuses sur les surfaces avant et arrière de la lunette. Tout doit être fait pour les faire coïncider.

## 5 : Détecteurs

Les détecteurs d'acquisition des données permettent de traduire l'information portée par la lumière visible ou les rayonnements de longueurs d'onde voisines rétrodiffusées par les insectes en signaux électriques.

En effet, la lumière présente à la fois un aspect corpusculaire et un aspect ondulatoire. Sous l'aspect ondulatoire, la lumière apparaît composée d'ondes électromagnétiques émises lors de transitions électroniques entre les niveaux d'énergie atomiques de la source. Les différents atomes de la source, en dehors du laser, émettent des ondes dont les phases et les directions sont indépendantes et varient de façon aléatoire au cours du temps pour un même atome.

Lorsque la lumière entre en interaction avec la matière, elle apparaît comme constituée de particules appelées photons. Chaque photon transporte une énergie élémentaire  $\omega_\varphi$  qui est déterminée par la fréquence  $\nu$  du rayonnement.

$$\omega_\varphi = h\nu, \quad h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \text{ est la constante de Planck}$$

Les électrons présents dans la matière et qui sont liés aux atomes, exigent pour devenir libres la fourniture d'une énergie  $\omega_l$  qui correspond à leur énergie de liaison. L'absorption d'un photon va provoquer la libération d'un électron si  $\omega_\varphi \geq \omega_l$  soit  $\nu \geq \omega_l/h$  ou  $\lambda \leq hc/\omega_l$

La longueur d'onde maximale pouvant provoquer la libération d'un électron dans un matériau est :  $\lambda_s = hc/\omega_l$

La nature des charges libérées par le rayonnement lumineux est fonction de la nature du matériau éclairé (Figure 10) :

- paires électron-trou dans les isolants et les semi-conducteurs très purs
- électrons dans les semi-conducteurs dopés par des atomes donneurs
- trous dans les semi-conducteurs dopés par des atomes accepteurs

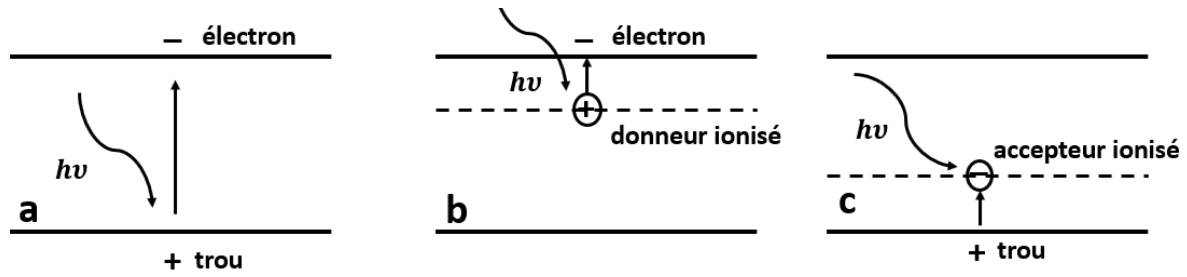


Figure 10 : Influence de la nature du matériau éclairé sur le type de charges libérées par le rayonnement. Adopté de [30]

Le processus de libération des porteurs sous l'influence d'un rayonnement lumineux modifie les propriétés électriques du matériau : c'est l'effet photoélectrique. Ce phénomène est à l'origine des détecteurs optiques.

En régime permanent, l'intensité d'un effet photoélectrique est proportionnelle au nombre de porteurs libérés par seconde. Dans certaines situations, bien que  $\lambda \leq \lambda_s$ , les photons du rayonnement incident ne libèrent pas tous des porteurs car certains photons sont réfléchis par la surface du matériau et d'autres ont leur énergie  $h\nu$  qui se convertit en énergie d'agitation thermique. Un matériau, soumis à un flux de rayonnement monochromatique  $\Phi$  watts et de coefficient de réflexion en puissance  $r$  à :

- un nombre de photons incidents par seconde  $n_i$  égal à :

$$n_i = \frac{\Phi}{h\nu} = \frac{\lambda\Phi}{hc} \quad \text{Eq. 11}$$

- un nombre de photons absorbés par seconde  $n_a$  égal à :

$$n_a = (1 - r)n_i = (1 - r) \frac{\lambda\Phi}{hc} \quad \text{Eq. 12}$$

- un nombre d'électrons ou de trous libérés par seconde  $G$  égale à :

$$G = \eta \cdot n_a = \eta \cdot (1 - r) \frac{\lambda\Phi}{hc} \quad \text{Eq. 13}$$

Où  $\eta$  est le rendement quantique. Le rendement quantique est le nombre moyen d'électrons ou de trous libérés par photon absorbé.

Le bruit est un signal indésirable qui dégrade le signal efficace d'un équipement électronique et altère la performance et la sensibilité des détecteurs.

Le détecteur optique (photodiode) est une unité électronique qui délivre un signal proportionnel à l'éclairement de sa surface photosensible.

Un détecteur d'image est une association ordonnée d'un grand nombre de détecteurs optiques sur l'ensemble desquels l'image est projetée. Chaque détecteur optique fournit un signal électrique  $q(x, y)$ . Ce signal est proportionnel à l'éclairement  $E(x, y)$  de la partie de l'image projetée sur le photosite. Il y a alors échantillonnage spatial de l'image : chaque photosite est associé à un détecteur optique élémentaire qui correspond à une unité élémentaire de l'image appelée pixel. Les signaux générés par chaque détecteur élémentaire sont collectés les uns après les autres dans un ordre bien déterminé et correspondant à la position d'origine dans l'image afin que l'image soit reconstituée. Le mode d'analyse de l'image est alors défini par l'ordre dans lequel est effectuée la collecte des signaux. D'une manière générale, l'image est analysée ligne par ligne et de haut en bas. L'effet photoélectrique produit en chaque photo-site, une accumulation de charge  $q(x, y)$  proportionnelle à son éclairement  $E(x, y)$  et à la durée  $T$  de collectes successives. L'ensemble des charges  $q(x_i, y_i)$  des différents photosites forme une image électrostatique. Cette image électrostatique est la transposition électrique de l'image optique  $E(x_i, y_i)$ . Les charges  $q(x, y)$  sont converties par un circuit d'analyse en courant et proportionnelle en tension  $v(x, y)$ . La tension  $v(x, y)$  constitue le signal d'image.

Dans les capteurs, il existe un circuit électronique qui permet la conversion de l'image électrostatique. Ce circuit comprend :

- les photo-éléments : ce sont des capteurs élémentaires organisés en ligne ou en matrice, et délivre chacun une charge électrique proportionnelle à l'éclairement de photo-sites et à la durée de son exposition ;
- les registres analogiques : les registres analogiques permettent le stockage individuel de la charge fournie par chaque photo-élément ainsi que son transfert et sa distribution ordonnée nécessaire à l'analyse de l'image ;

- un convertisseur charge-tension : son rôle est de fournir le signal d'image à la chaîne de traitement en aval.

La quantité de charge emmagasinée est proportionnelle à l'éclairement et à la durée d'exposition des photo-éléments. L'association de tels photo-éléments permet de réaliser :

Les capteurs linéaires qui regroupent  $N$  photo-éléments disposés sur une seule ligne ( $N : 256, 1024, 1728, 2048$ ).

- Les capteurs matriciels ou surfaciques qui sont composés de  $M \times N$  photo-éléments disposés sur  $M$  lignes et comportant chacun  $N$  photo-éléments.

L'ensemble des charges emmagasinées est transféré, à intervalles de temps réguliers, vers des registres à décalages qui assurent l'analyse de l'image par une distribution ordonnée des charges emmagasinées par les photo-éléments.

Les détecteurs linéaires comportent deux registres placés de part et d'autre de la ligne des photo-sites. L'ensemble des charges contenues dans les photo-sites est envoyé en parallèle vers les deux registres. L'un reçoit les charges issues des photo-sites de numéro impair et l'autre de numéro pair.

Dans le cas des détecteurs matriciels, chacune des  $N$  colonnes est associée à un registre appelé registre de transport vertical dont le nombre de cellules est égal au nombre  $M$  de photo-sites de la colonne. Chacun des  $N$  registres verticaux atteint l'une des cellules d'un registre appelé registre de transport horizontal.

L'analyse complète de l'image s'effectue par analyse successive d'ensemble de lignes de même parité ou trame.

L'analyse d'une trame, impaire par exemple, comporte les étapes suivantes :

- un signal d'horloge  $\emptyset_P$  commande le transfert des charges contenues dans les photo-sites des lignes impaires de chaque colonne vers le registre vertical associé à la colonne ;

- les signaux d'horloge  $\emptyset_{v1}$  et  $\emptyset_{v2}$  décalent d'un rang le contenu des registres verticaux, ce qui transfère l'ensemble des charges correspondant à une ligne dans le registre horizontal ;
- les signaux d'horloge  $\emptyset_{h1}$  et  $\emptyset_{h2}$  décalent le contenu du registre horizontal et transfèrent successivement en sortie les charges de chacun des photo-sites d'une ligne ;
- les deux étapes précédentes se répètent pour chacune des lignes de la trame impaire puis l'ensemble du processus est repris pour la trame paire.

La durée de lecture des trames dans les détecteurs matriciels est longue. Cela limite leur utilisation dans les applications exigeant une haute fréquence d'acquisition. Pour ce fait, nous avons opté pour le choix des détecteurs linéaires et un spectromètre comportant un détecteur linéaire [30,70].

#### **5-1 : Spectromètre : *Ocean Optics Spectrometer USB 4000***

Le spectromètre est un appareil de mesure qui permet de disperser un flux lumineux en plusieurs longueurs d'ondes et de quantifier l'intensité lumineuse associée à chacune de ces longueurs d'onde. Le spectromètre utilisé est un spectromètre à réseaux. Il est constitué de deux miroirs : le premier miroir, appelé miroir de collimation, reçoit le flux lumineux collecté par la fibre optique, puis l'envoie sur le réseau. Ce dernier le décompose en plusieurs longueurs d'ondes. Ces différents rayonnements sont dirigés vers le second miroir qui les focalise sur le capteur linéaire CCD (Figure 11).

Les longueurs d'ondes accessibles qui ont permis à caractériser les insectes sont comprises entre 300 *nm* et 1100 *nm*.

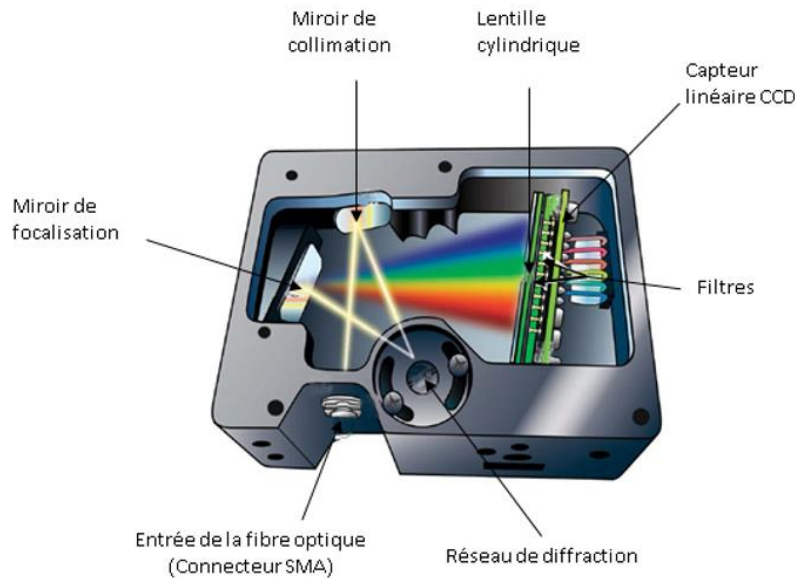


Figure 11 : Schéma du spectromètre à réseaux

Nous avons écrit un programme informatique sous Matlab pour automatiser l'acquisition avec le spectromètre.

Dans un premier temps, nous avons déclaré toutes les propriétés de l'algorithme. Ces propriétés sont relatives :

- au seuil de détection (*threshold*) qui correspond à l'intensité minimale permettant l'ouverture des canaux du capteur du spectromètre pour un enregistrement. Ce seuil, nous l'avons fixé arbitrairement à 100 (*threshold=100*) ;
- au temps d'intégration (*it*) : c'est le temps que met le capteur du spectromètre pour acquérir des données. Autrement dit, c'est le temps d'exposition des capteurs à l'onde électromagnétique rétrodiffusée par les insectes. Nous avons fixé le temps d'intégration à 20000 microsecondes (*it=20000*). Ce temps d'intégration correspond au temps d'intégration maximal que peut supporter notre spectromètre ;
- au diamètre de la fibre optique (*fd*).

Ensuite, nous avons chargé la librairie (*OmniDriver.jar*) renfermant toutes les commandes développées par la firme du spectromètre. Ces commandes permettent de contrôler le spectromètre et de développer des applications spécifiques. La variable *Wrapper* renferme toutes les fonctions de commandes. Les fonctions Matlab qui permettent d'exécuter ces commandes sont *javaaddpath* suivi de la fonction *import*.

Ensuite, la syntaxe *wrapper* ( ) ouvre tous les accès aux fonctions de contrôle du spectromètre. Le spectromètre que nous avons utilisé est un spectromètre à communication USB, alors, pour établir une connexion entre le spectromètre et l'ordinateur via le port USB, nous avons utilisé la syntaxe *OpenAllSpectrometers* ( ). Cette phase constitue la phase d'initialisation du spectromètre. Après cette phase d'initialisation, il faut préciser les conditions sous lesquelles les données sont acquises. Cette phase est la phase de configuration des paramètres d'acquisition et concerne uniquement le temps d'intégration dans le cas de nos mesures. Pour préciser le temps d'intégration, nous avons utilisé la syntaxe *setIntegrationTime* (0, it). Une fois la phase d'initialisation et de configuration d'acquisition terminées, nous sommes passés à la phase d'acquisition. Cette phase d'acquisition est le cœur du programme que nous avons développé pour automatiser l'acquisition avec le spectromètre. Nous avons déclaré une boucle et acquérir 1000 échantillons chaque 20 secondes jusqu'à l'interruption du programme par l'utilisateur. La syntaxe d'acquisition des données est *getSpectrum* (0). Les données sont sauvegardées automatiquement par le programme.

Vous trouverez en annexe A, le programme informatique développé pour la prise en main du spectromètre.

## 5-2 : Détecteur linéaire

Le détecteur que nous avons utilisé est un détecteur linéaire (*Glaz-S*) de type CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Ce détecteur est présenté à la figure 12.

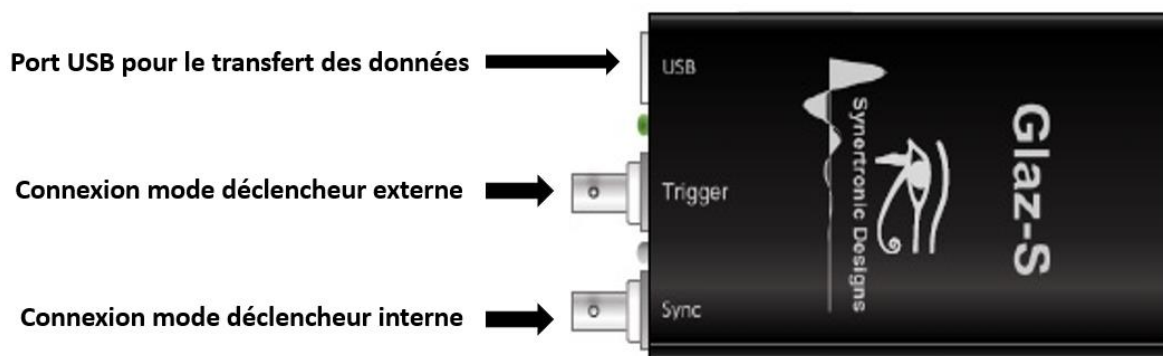


Figure 12: Image de la caméra linéaire

Les capteurs de cette caméra possèdent deux régimes de fonctionnement : le régime à demi-vitesse et le régime à pleine-vitesse. Avec le régime à pleine-vitesse, la vitesse de balayage maximum atteinte est de 4000 balayages par seconde avec une résolution de 0,1 Hz. Les équations Eq. 13 et Eq. 14 donnent les temps de balayage respectivement des régimes à pleine-vitesse et à demi-vitesse.

$$T_{\text{balayage}} = \max(T_{\text{intégration}} + 20\mu\text{s}, 250\mu\text{s}), \text{ en régime pleine - vitesse} \quad \text{Eq. 14}$$

$$T_{\text{balayage}} = \max(T_{\text{intégration}} + 30\mu\text{s}, 500\mu\text{s}), \text{ en régime demi - vitesse} \quad \text{Eq. 15}$$

Le niveau de bruit du capteur, lors de son fonctionnement en régime à pleine-vitesse, est environ 10% plus élevé par rapport au niveau de bruit en régime à demi-vitesse.

Aussi, le mode de déclenchement de l'acquisition peut se faire de manière interne ou externe. En mode de déclenchement interne, aucune impulsion externe n'est envoyée au détecteur. Dans ce mode, le détecteur génère un signal de déclenchement en interne. Ce signal peut être réglé dans la plage de fréquences de 2,4 Hz à 4000 Hz. Lors de l'exécution en mode externe, une impulsion de déclenchement externe est envoyée au port de déclenchement. Un délai peut être spécifié entre le front montant positif de l'impulsion de déclenchement et le début du temps d'intégration du détecteur. Ce délai est compris dans l'intervalle 0 ms à 200 ms avec une résolution de  $0,1 \cdot 10^{-3}$  ms. Lorsqu'un déclencheur différé est reçu alors que le détecteur est occupé, ce déclencheur sera ignoré. Le temps d'intégration peut être réglé entre  $4 \cdot 10^{-3}$  ms et 400 ms. Le détecteur *Glaz-S* utilise une méthode entrelacée pour intégrer et lire les données. Ceci optimise le facteur de remplissage temporel du détecteur pour les applications lidar. Le taux de balayage maximum dépend du temps d'intégration.

Le tableau 2 résume les caractéristiques du détecteur *Glaz-S*.

Tableau 2 : Tableau de spécification du détecteur

Type de capteur	CMOS
Nombre de pixels	2048
Fréquence de balayage	2000 balayages / s (régime à demi vitesse) 4000 balayages / s (régime à pleine vitesse)
Temps d'intégration minimum	4 $\mu$ s
Temps d'intégration maximum	400 ms
Gamme spectrale	200 -1000 nm
Résolution	16 bits



Le programme d'acquisition du détecteur linéaire a été développé par la firme *Synertronics*, constructrice du détecteur. Ce programme est sous forme de fichier exécutable téléchargeable sur le site internet du constructeur<sup>1</sup>. Après l'avoir téléchargé et installé, un raccourci est créé sur le *bureau* de l'ordinateur. Un double clic sur l'icône permet d'exécuter le programme. Une fenêtre s'ouvre vous invitant à choisir le mode d'acquisition du détecteur. Le mode d'acquisition dans le cadre de l'utilisation du détecteur dans notre situation est le *mode application*. Lors de la première utilisation le numéro série du détecteur est demandé. Une fois cette phase validée, l'onglet *scheimpflugLIDAR* apparaît (Figure 13). Un clic sur l'onglet *scheimpflugLIDAR* fait apparaître une fenêtre contenant les sous-onglets *Global* et *Master*.

Le sous-onglet *Global* est l'onglet de configuration d'acquisition. Dans le champ *Master trigger* le mode de déclenchement de l'acquisition doit être précisé. Dans ce champ, nous avons le choix entre les modes *External* et *Internal*. Lorsqu'un signal doit être envoyé au détecteur pour déclencher une acquisition, c'est le mode *External* qui doit être choisi. Dans le cas où aucun signal extérieur ne serait envoyé au détecteur pour déclencher l'acquisition, c'est le mode *Internal* qui convient.

Dans nos différentes acquisitions, aucun signal extérieur n'a été envoyé au détecteur pour déclencher l'acquisition. Nous avons donc choisi le mode *Internal*. Dans ces conditions, l'horloge interne du détecteur est utilisée pour déclencher les différentes acquisitions. Le champ *Line rate* correspond à la fréquence d'échantillonnage qui doit être spécifiée. De même le champ *Line per frame* qui représente le nombre d'échantillons à acquérir doit être spécifié. Pour éviter les disproportions au niveau des échantillons des intensités du bruit de fond et les échantillons des intensités rétrodiffusées, la fréquence d'échantillonnage doit être égale au dixième de la valeur du nombre d'échantillons.

Nous avons utilisé le temps d'intégration maximal du détecteur. De ce fait, dans le sous-onglet *Master*, nous avons coché la zone réservée à cet effet.

---

<sup>1</sup> <http://www.synertronic.co.za/products/glazgui.aspx>

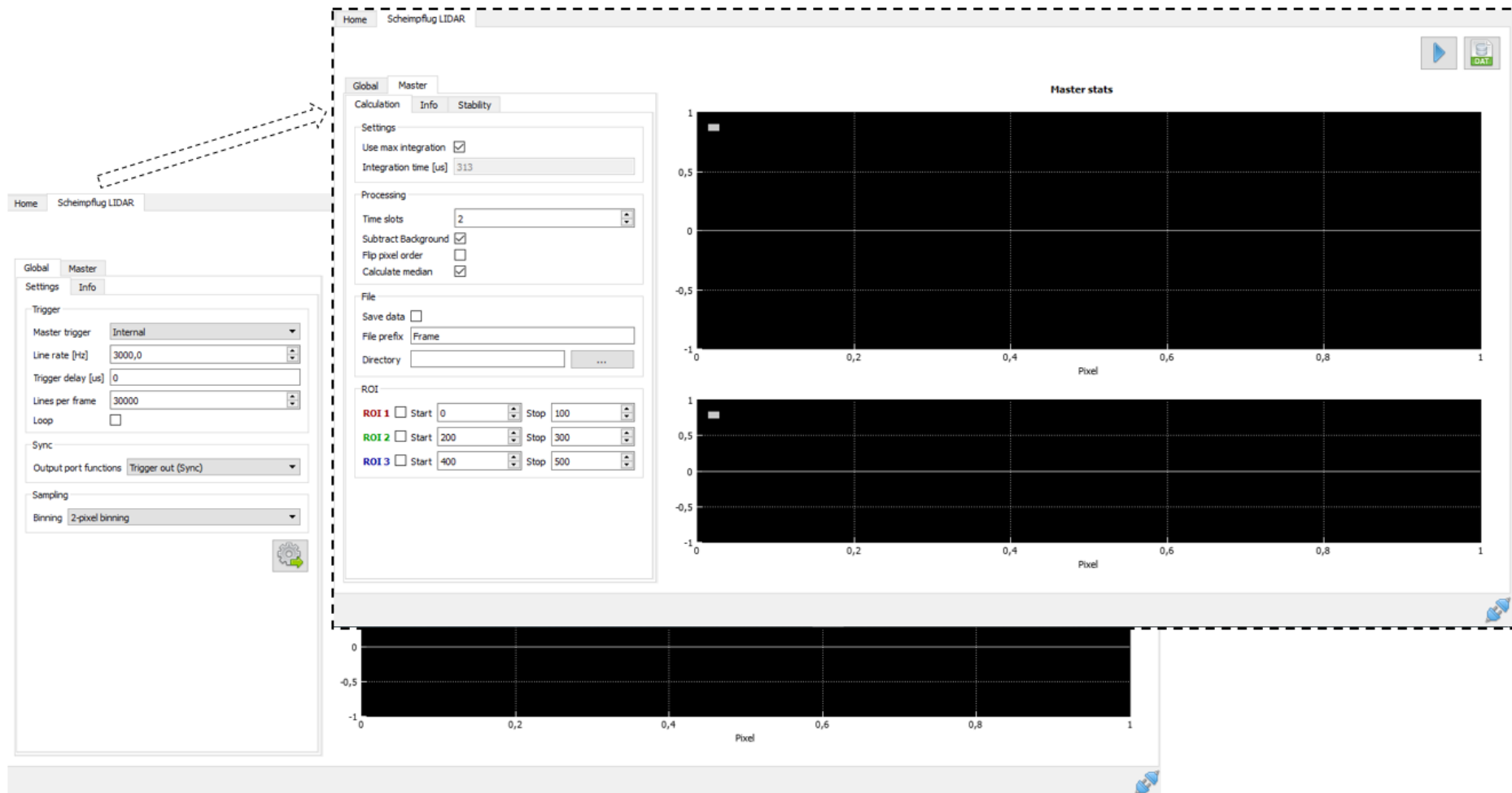


Figure 13 : Interface graphique d'utilisation du détecteur linéaire

### 5-3 : Photodétecteur quatre quadrants

Le photodétecteur quatre quadrants (*QPD*) est un détecteur qui a pour rôle de convertir l'intensité lumineuse en courant électrique. Il est généralement utilisé pour déterminer la position d'un faisceau laser ou mesurer la puissance de l'intensité lumineuse en industrie ou au laboratoire dans les dispositifs de la pince optique par exemple.

Le *QPD*, générant des courants électriques, nous avons réalisé un circuit électronique amplificateur convertisseur intensité-tension (I-U) pour convertir le courant électrique en tension électrique pour chaque quadrant du *QPD*. Pour la réalisation du circuit convertisseur I-U, nous avons utilisé un circuit intégré LM324 AN qui contient quatre (4) amplificateurs opérationnels (A.O) (figure 14).

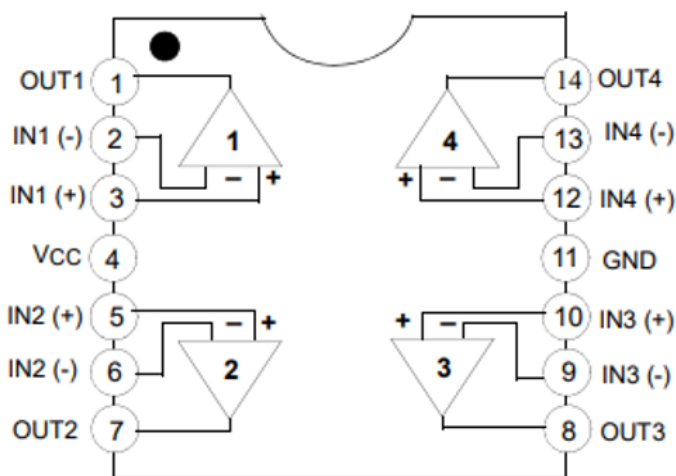


Figure 14 : Diagramme interne du circuit intégré LM324 AN

Nous avons également utilisé quatre (4) conducteurs ohmiques de résistances deux (2) mégaohms chacun et quatre (4) condensateurs de capacité dix (10) microfarad chacun. Un condensateur et un conducteur ohmique ont été reliés à la borne inverseuse et à la borne de sortie de chaque A.O du circuit intégré LM324 AN. La borne non-inverseuse de chaque A.O a été reliée à la masse. La borne 4 du circuit intégré LM 324 AN a été alimentée avec une tension de +12V et la borne 11 a été alimentée avec une tension de -12 V. L'alimentation du circuit LM324 AN permet de mettre sous tension chaque A.O dans le circuit. Chaque anode du *QPD* a été reliée à chacune des bornes inverseuses de chaque A.O et la cathode commune du *QPD* a été reliée à la masse (Figure 15). Nous avons connecté enfin, la borne de sortie de chaque A.O à chacune des bornes d'entrée

analogique (AI) du convertisseur analogique-numérique (*DAQ*) pour échantillonner le signal envoyé par le *QPD* au reste du circuit. La figure 16 présente un *DAQ* et ses différentes broches.

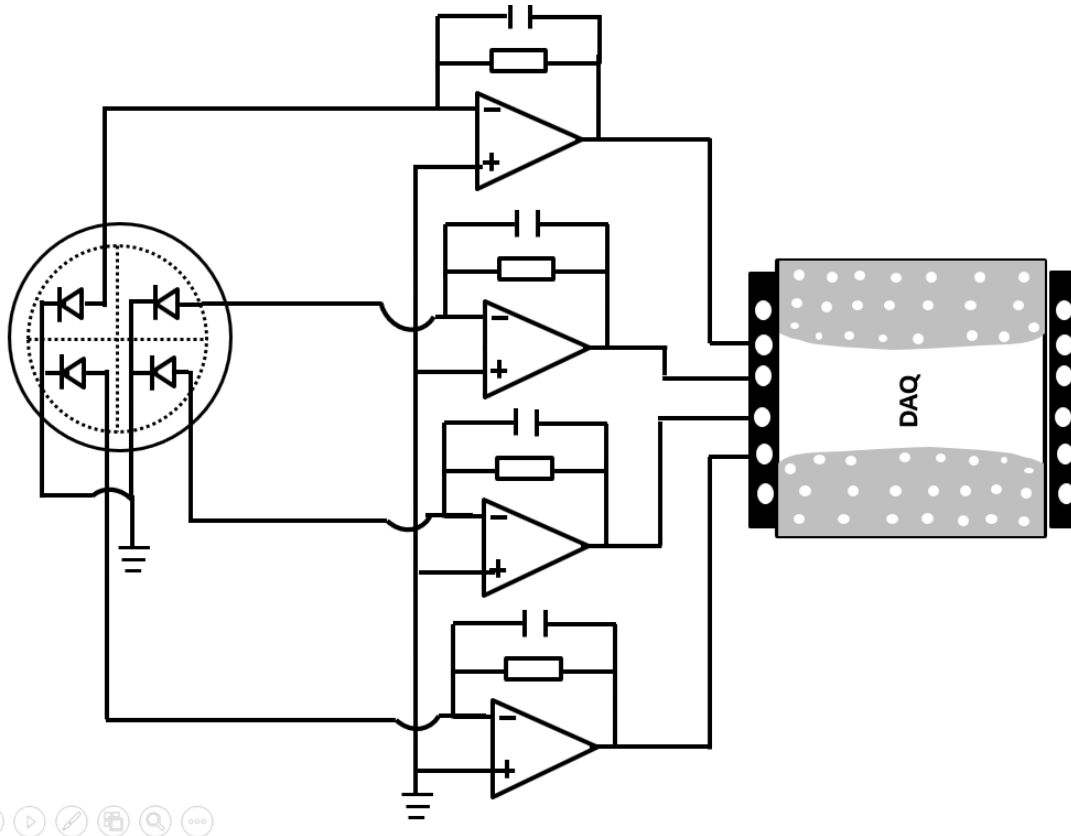


Figure 15 : Diagramme de connexion du circuit du *QPD*

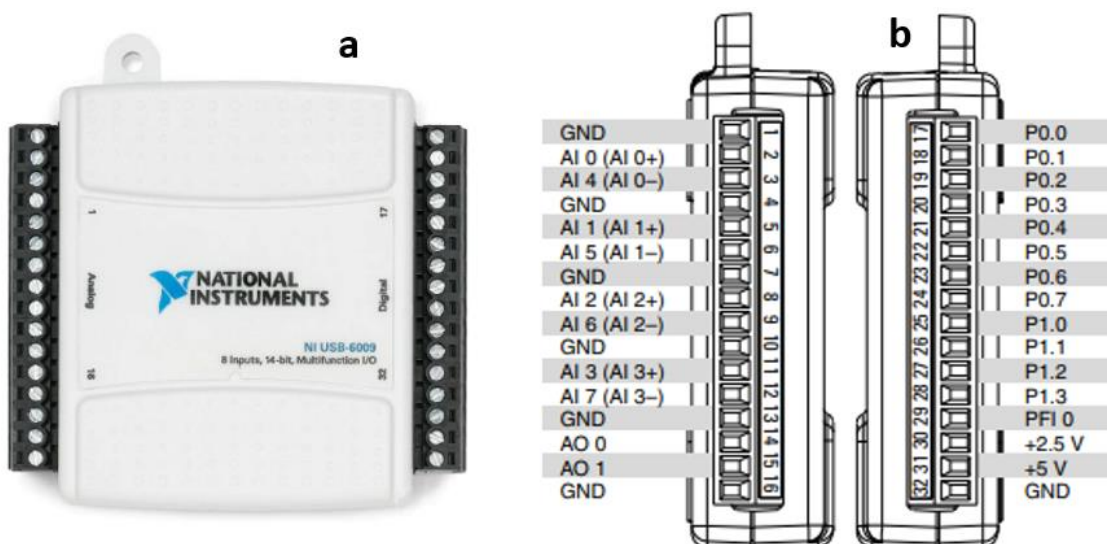


Figure 16 : (a) Image d'un *DAQ* 6009. (b) Schéma des broches analogiques (AI et AO) et des broches digitales (P)

Pour le contrôle du *QPD*, nous avons développé un autre programme informatique sous *LabVIEW* pour la prise en main du *QPD* via le DAQ.

*LabVIEW* est un environnement de développement orienté objet pour des applications de mesures, de test, de contrôle d'instruments, de simulation, etc. Les programmes sous *LabVIEW* sont appelés des instruments virtuels en anglais *Virtual Instrument (VI)* car l'interface d'utilisation du programme développé est similaire aux instruments physiques.

L'interface de développement de *LabVIEW* est constituée de deux fenêtres : une fenêtre avant nommée « face avant » et une fenêtre arrière nommée « diagramme ». La face avant est l'interface utilisateur. Cette face contient les commandes d'entrée appelées « *controls* » et les commandes de sortie appelées « *indicators* ». Les « *controls* » sont représentés par des boutons poussoirs, par des interrupteurs, par des curseurs, etc. et les « *indicators* » sont représentés par des *LED*, par des thermomètres, par des vumètres, par des réservoirs, etc. Le *diagramme* permet de construire le programme proprement dit pour commander les éléments de la *face avant*. Les fonctions de programmation sont sous formes graphiques. Chaque graphique possède des nœuds d'entrée et des nœuds de sortie. La programmation se fait, en effectuant des clics droits dans le *diagramme* et en choisissant les fonctions de programmation souhaitées, puis en reliant un nœud de sortie à un nœud d'entrée par des fils de connexion.

Avant la conception du diagramme de commande (Figure 17), il est impératif d'installer l'outil de programmation du DAQ appelé DAQ Assistant. Pour configurer les broches d'entrée analogique (*AI*), il faut faire un double clic sur DAQ Assistant après l'avoir sélectionné dans le *diagramme*. Une fenêtre *Assistant DAQ* s'affichera pour assister à la configuration des broches du DAQ. Dans l'onglet *configuration*, il faut faire un clic sur le signe « + ». Une nouvelle fenêtre s'affichera, puis sélectionner « *tension* ». Une fois cette phase achevée, une fenêtre s'affiche et vous invite à sélectionner des voies. C'est le lieu de sélectionner les broches d'entrées analogiques utilisées.



Figure 17 : (a, b) Interface utilisateur du programme de contrôle du QPD. (c) Diagramme de contrôle du QPD.

Dans cette partie, nous avons décrit les composants spécifiques des différents dispositifs expérimentaux que nous avons proposés, leur principe de fonctionnement ainsi que les différents programmes informatiques développés pour faire fonctionner les différents détecteurs, indépendamment de l'action d'un opérateur. Cet ensemble, nous a permis de mesurer simultanément l'empreinte spectrale des insectes et leurs images. Le chapitre suivant traite en profondeur, la méthode d'acquisition, d'extraction de l'empreinte spectrale et d'identification par l'image les différents spécimens détectés par notre système d'acquisition.

---

## **CHAPITRE III : Caractérisation des insectes en télédétection passive**

---



## **CHAPITRE III : Caractérisation des insectes en télédétection passive**

### **I : Caractérisation des insectes en vol par la mesure de l'enveloppe spectrale et de l'image**

L'une des voies non invasives de caractérisation, d'identification et de classification des insectes volants est l'exploitation de leurs empreintes spectrales.

Les insectes sont parfois multicolores et possèdent plusieurs pigments et ceux de la même espèce peuvent avoir des pigments différents. Leur caractérisation par leur signature spectrale devient donc un enjeu majeur. Aussi l'évaluation de leur abondance est-elle un paramètre qui influe les décisions de stratégie de lutte à adopter. Dans cette partie du travail, nous évaluons la mesure simultanée de l'empreinte spectrale et de l'image de l'insecte, d'une part, et, d'autre part, la démarche que nous avons suivi pour quantifier l'abondance des espèces d'insectes détectés.

Pour atteindre cet objectif, nous avons développé une technique de mesure intégrant à la fois la capture de l'image et la mesure de l'empreinte spectrale. Les données issues des mesures étant volumineuses, nous avons développé également des méthodes d'analyse multivariée pour déterminer les paramètres importants en vue d'associer chaque empreinte spectrale à son image et d'évaluer l'abondance de chaque espèce d'insectes détectés.

Ce chapitre comportera quatre parties essentielles qui traiteront :

- La méthode d'acquisition des données ;
- La méthode d'extraction de l'information spectrale
- La méthode d'analyse multivariée
- Et enfin, quelques résultats et la discussion

#### **I-1 : Mesure de l'empreinte spectrale**

La technique de mesure indirecte est de plus en plus utilisée pour des mesures non invasives de la faune. Dans cette partie, nous présentons la technique de mesure indirecte synchrone de l'image et de l'empreinte spectrale en utilisant le couple

télescope-lunette astronomique. La mesure synchrone est effectuée lorsqu'un spécimen en vol traverse la région d'intérêt, correspondant à la zone dans laquelle la caméra attachée à la lunette astronomique est capable d'acquérir une image et le spectromètre attaché au télescope est capable d'acquérir le spectre.

Avant toute mesure, le télescope et la lunette astronomique sont alignés sur la boîte noire se trouvant à 1 mètre au-dessus du sol, à environ 60 m du dispositif expérimental (Figure 18). Cette phase d'alignement consiste à utiliser d'abord, un oculaire, puis une caméra CCD connectée à l'ordinateur pour observer l'orifice de la boîte noire.

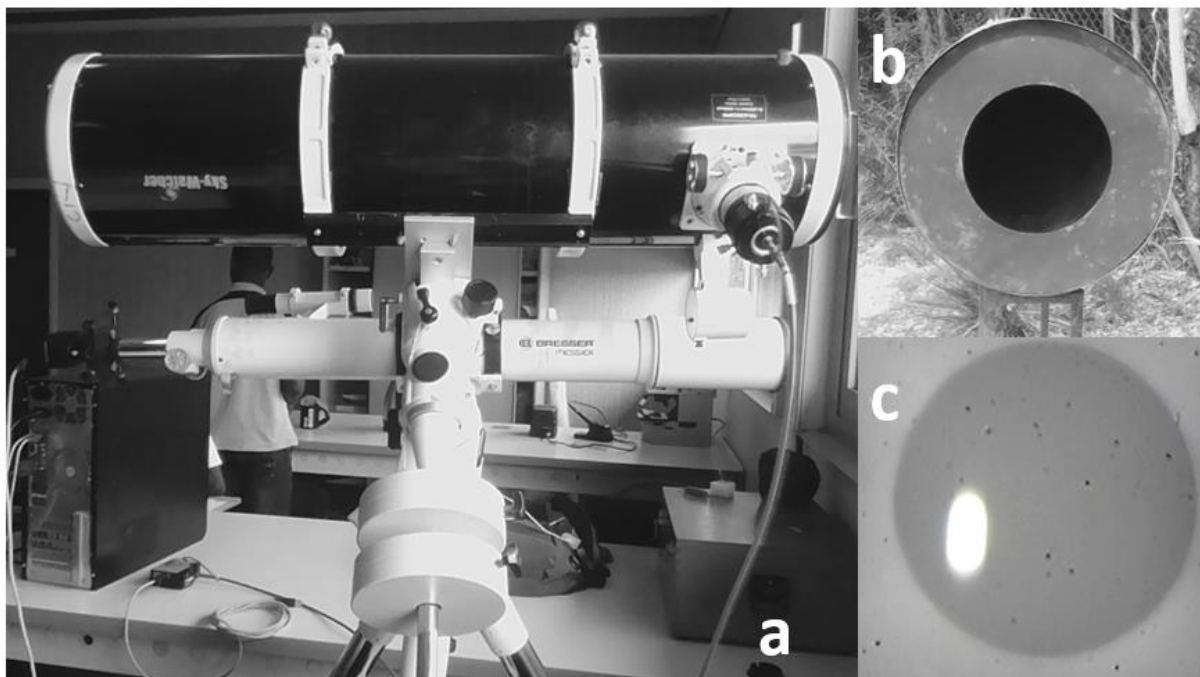


Figure 18 : Vue mosaïque du système de mesure de l'empreinte spectrale. (a) Récepteur. (b) Boîte noire. (c) Sphère lambertienne en chute libre.

La phase d'alignement de la lunette astronomique et du télescope permet d'acquérir de manière synchrone l'information spectrale et spatiale de l'insecte. Une fois la phase d'alignement achevée, la caméra CCD est connectée à la lunette astronomique puis à l'ordinateur pour enregistrer l'image. Ensuite, le spectromètre est connecté sur le télescope puis à l'ordinateur pour enregistrer l'empreinte spectrale de l'insecte. L'image et le spectre sont acquis simultanément lorsque l'insecte s'introduit dans le volume défini par l'intersection de l'angle solide de la lunette astronomique et du télescope. Le spectromètre et la caméra sont pilotés par un programme informatique que nous avons développé pour une acquisition automatisée. Les mesures de

références sont effectuées en lâchant en chute libre des sphères lambertiennes de couleur blanche dans le plan focal de la boîte noire. Le temps de lâchage est relevé pour une identification future des données de références enregistrées à l'ordinateur. Le temps d'intégration du spectromètre a été fixé à 20 ms et le nombre d'échantillons acquis est de 1000. Nous avons effectué plusieurs mesures au cours de cette thèse à des périodes différentes : 22/01/2015, 27/01/2015, 28/01/2015, 12/04/2015, 14/04/2015, 16/04/2015, 24/03/2016, 12/04/2016, 14/04/2016, 15/04/2016, etc. Ces mesures ont eu pour objectif l'étude de la variabilité des espèces d'insectes volants sur le site nord de l'Institut National Polytechnique Houphouët Boigny. Ces données servent à constituer une base de données pour des études futures.

## **I-2 : Méthode d'extraction de l'information spectrale**

La technique d'extraction de l'information est aujourd'hui au cœur de la science de la mesure. L'on parle de plus en plus de science d'exploration ou fouille de données ou en anglais de *data mining*.

Les méthodes d'extraction de données en télédétection utilisent des seuils d'intensités dérivant de la conjonction des intensités médianes, de l'écart interquartile des intensités et du choix d'une constante arbitraire liée au rapport signal sur bruit de chaque fichier de données. Le choix arbitraire de cette constante est subjectif et conduit à des pertes d'informations. Les méthodes de séparation aveugle de sources semblent être une alternative. Ces techniques d'extraction de l'information ont largement été utilisées en ingénierie biomédicale, dans les systèmes de reconnaissance de la parole et en télécommunication. Une extension de cette technique a été proposée par certains auteurs sous le nom de fraction de bruit maximal (*MNF*).

Dans cette partie, nous présentons la structure des données, la méthode d'extraction de l'information par l'utilisation d'un seuil d'intensité et de l'utilisation de la *MNF* et, nous présentons également la méthode de calcul de l'empreinte spectrale.

### **I-2-1 : Méthode d'extraction de l'information spectrale à partir d'un seuil d'intensité**

Les données enregistrées avec le spectromètre sont des fichiers de 16 bits. Les colonnes représentent des données temporelles (échantillons) et les lignes les intensités

correspondant à chacune des longueurs d'ondes comprises entre 300 *nm* et 1100 *nm* (Figure 19).

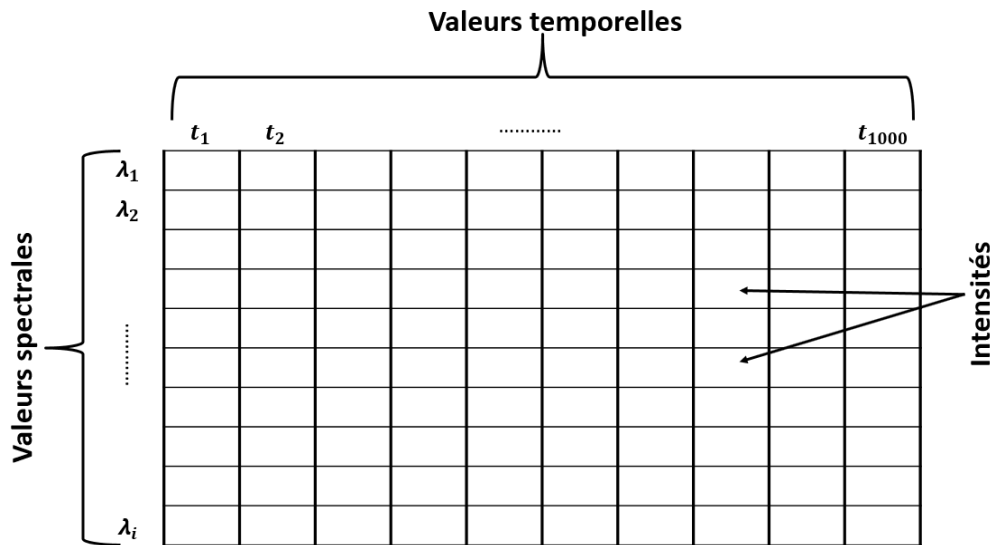


Figure 19 : Structures des données d'acquisition avec le spectromètre.

Les longueurs d'onde du proche infra-rouge ont été omises dans le but de rejeter les contributions des intensités de la végétation. Les intensités lumineuses comprises entre 400 *nm* et 700 *nm* sont débruitées en utilisant un filtre médian de fenêtre temporelle égale à 2 s étant donné qu'au cours de l'acquisition, des bruits de courant de noirceur s'additionnent à la mesure. C'est un défaut de tout dispositif d'acquisition électronique. Ces bruits de courant de noirceur sont dus à une élévation de température des équipements d'acquisition. Ce filtrage permet également d'extraire les intensités rétrodiffusées de particules atmosphériques dans la zone d'intérêt.

Un seuil d'intensité,  $I_{seuil}$ , est défini en fonction de l'intensité moyenne,  $I_{moy}$ , de l'intensité statique,  $I_{static}$ , et d'une constante en liaison avec le rapport signal sur bruit,  $SNR$ , en utilisant l'équation Eq. 13 afin d'extraire toutes les intensités lumineuses rétrodiffusées dues à un insecte,  $I_R$ , dans la zone d'intérêt.

$$I_{seuil} = iqr(I_{moy} - I_{static}) + SNR * std(I_{moy} - I_{static}) \quad \text{Eq. 16}$$

Dans cette équation,  $iqr$  représente l'écart interquartile et  $std$  l'écart type

La même démarche est suivie pour l'extraction de l'intensité lumineuse de référence,  $I_{ref}$ , rétrodiffusée par la sphère lambertienne. Le bruit de fond,  $I_B$ , correspond à la valeur médiane des intensités lumineuses rétrodiffusées.

## I-2-2 : Méthode d'extraction de l'information spectrale à partir de la fraction de bruit maximale

Les intensités rétrodiffusées dues à l'imperfection de la boîte noire et les intensités du bruit électronique engendrées par la chaîne électronique du spectromètre s'additionnent aux différentes mesures à chaque instant. Ces intensités représentent les intensités statiques,  $I_{static,t}$ . La valeur interquartile des intensités est insensible aux fluctuations d'intensités rétrodiffusées par des insectes, par des particules atmosphériques, par des feuilles de plantes, par des aérosols et d'autres facteurs indésirables telle que la fumée s'introduisant dans le volume sondé. Cette valeur a été calculée et représente  $I_{static,t}$ . Ensuite,  $I_{raw,t}$  a été centré autour de  $I_{static,t}$  pour obtenir l'intensité  $I_t$ . Puis, l'intensité déduite  $I_t$  est supposée constituée de l'intensité lumineuse rétrodiffusée par un spécimen volant  $I_{insect,t}$  additionnée aux intensités rétrodiffusées dans le volume sondé par des objets inconnus considérées comme des bruits,  $I_{noisy,t}$ , à l'instant  $t$ .  $I_{insect,t}$  et  $I_{noisy,t}$  sont supposées indépendantes et orthogonales et de moyennes nulles.  $I_t$  peut s'écrire (Eq. 16) :

$$I_t = I_{insect,t} + I_{noisy,t} \quad \text{Eq. 17}$$

La covariance de  $I_t$ ,  $I_t^T I_t$ , s'exprime en fonction de la covariance de  $I_{insect,t}$  et de la covariance de  $I_{noisy,t}$  (Eq. 17) [14] :

$$I_t^T I_t = I_{insect,t}^T I_{insect,t} + I_{noisy,t}^T I_{noisy,t} \quad \text{Eq. 18}$$

Le principe de la fraction de bruit maximal consiste à rechercher un vecteur de base  $\emptyset$  tel que la fraction de bruit maximal,  $f_\emptyset$ , définie par l'équation Eq. 18, soit optimale [13].

$$f_\emptyset = \frac{\|I_{noisy,t}\emptyset\|}{\|I_t\emptyset\|} \quad \text{Eq. 19}$$

Pour déterminer la valeur de  $\emptyset$  qui rend optimale  $f_\emptyset$  il faut annuler la dérivée de  $f_\emptyset$  par rapport à  $\emptyset$ . Le calcul permet d'aboutir à l'équation Eq. 19. Cette équation ramène aux problèmes de décomposition de valeurs propres généralisées.

$$I_{noisy,t}^T I_{noisy,t} = f_\emptyset I_t^T I_t \quad \text{Eq. 20}$$

La solution de cette équation aux valeurs propres généralisées conduit à l'obtention des valeurs de la matrice de transformation linéaire,  $B$ . Cette matrice sépare et ordonne les spectres non-corrélés par valeurs décroissantes de la fraction de bruit maximal,  $f_\emptyset$ . L'équation de cette transformation linéaire lie les grandeurs spectrales non-corrélées,  $Y_t$ , aux grandeurs spectrales mesurées,  $I_t$  (Eq. 20) :

$$Y_t = B^T I_t \quad \text{Eq. 21}$$

La connaissance de bruit de fond,  $I_{noisy,t}$ , est nécessaire pour déterminer  $B$ . Plusieurs techniques existantes, permettent d'estimer  $I_{noisy,t}$ . La méthode de différenciation des pixels voisins est généralement utilisé en traitement d'image par télédétection.  $I_{noisy,t}$  a été évalué, en déterminant la différence des intensités des pixels voisins.

$$I_{noisy,t} = I_t - I_{t+1} \quad \text{Eq. 22}$$

Une fois les spectres ont été extraits, la réflectance,  $R$ , qui représente l'empreinte spectrale, a été calculée en utilisant l'équation Eq. 22 :

$$R = \frac{I_R - I_B}{I_{ref} - I_B} \quad \text{Eq. 23}$$

Le code informatique que nous avons développé sous Matlab pour analyser les données se trouve en annexe B.

### I-3 : Identification des insectes par leur image par l'analyse multivariée

Les mesures indirectes engendrent des données de tailles volumineuses. Par exemple, pour une journée de mesure de 24H, la taille des données est d'environ 1000 gigabits. Leur traitement exige des techniques d'analyses avancées faisant appel à des méthodes statistiques de réductions de variables. Le choix de la dimension de réduction de variables est fondé parfois sur des critères subjectifs et/ou objectifs. Dans cette partie, nous présentons la méthode d'analyse multivariée qui nous a permis d'associer chaque espèce d'insectes aux différentes images capturées et le critère de choix de la dimension utilisé.

Pour associer chaque empreinte spectrale à son image, nous avons regroupé toutes les empreintes spectrales que nous avons calculé dans une matrice  $R_{tot}$ . Les  $m$  lignes de cette matrice représentent les échantillons et les  $n$  colonnes les valeurs des empreintes spectrales. Ensuite, nous avons déterminé les composantes spectrales de la matrice  $R_{tot}$  en la décomposant en valeurs singulières (Eq. 23) en vue de réduire la dimension de cette matrice et retenir les valeurs des empreintes spectrales influentes.

$$R_{tot} = U.S.V^* \quad \text{Eq. 24}$$

Dans l'équation Eq. 23, les colonnes de  $U$  et de  $V$  représentent les vecteurs propres orthogonaux et  $S$  est une matrice diagonale contenant les valeurs singulières. La Figure

20 est l'Éboulis des valeurs singulières. Ce graphique présente la décroissance des valeurs singulières. Le principe du choix de la dimension à retenir pour reconstituer les données, à partir de ce graphique, consiste à le parcourir et à rechercher l'existence d'un « coude » et retenir que les valeurs singulières jusqu'à ce « coude ». Cette procédure est subjective.

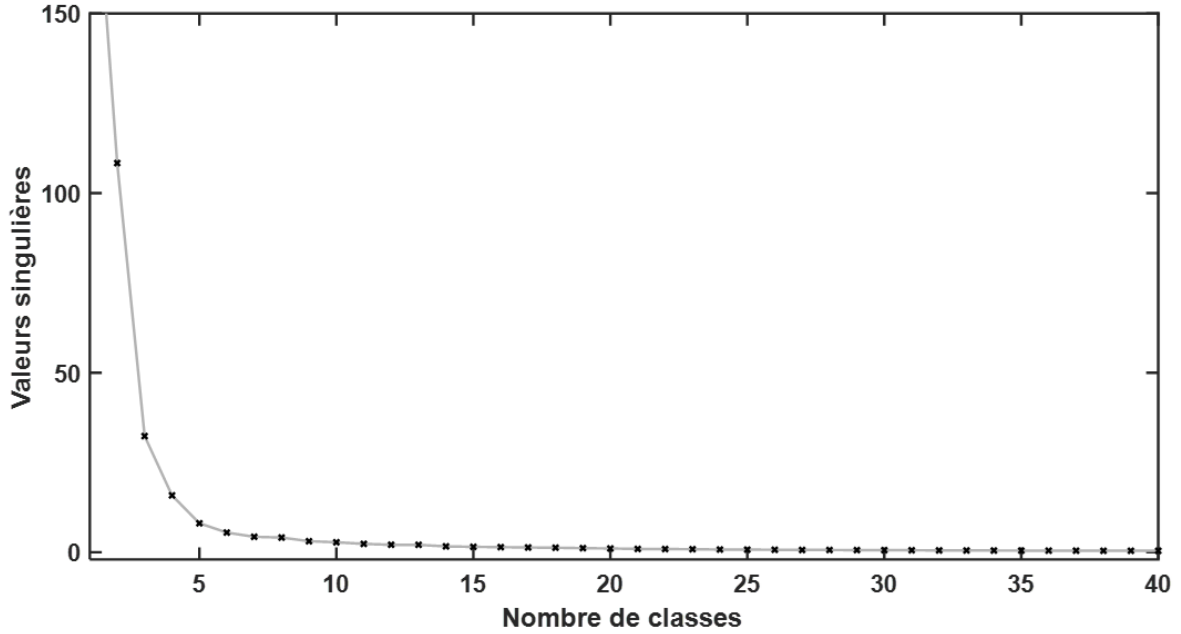


Figure 20 : Éboulis des valeurs singulières. Cette courbe représente la décroissance des valeurs de la diagonale principale de la matrice  $S$  des valeurs singulières.

Pour évaluer la dimension à retenir, nous avons utilisé le critère de la part d'inertie expliquée,  $r_q$ , donnée par l'équation Eq. 24, où  $q$  représente la dimension.

$$r_q = \frac{\sum_{k=1}^q s_k}{\sum_{k=1}^p s_k} \quad \text{Eq.25}$$

Une fois la dimension  $q$  est déterminée, les empreintes spectrales sont reconstruites en utilisant l'équation Eq. 25.

$$R_{rec} = U_{m,1:q} * S_{1:q,1:q} * V_{n,1:q}^T \quad \text{Eq. 26}$$

Où '\*' désigne la multiplication ordinaire, ' $V^T$ ' la transposée de  $V$  et  $R_{rec}$  l'empreinte spectrale reconstruite.

Après la réduction de la dimension, nous avons déterminé la distance euclidienne dans la nouvelle base. Ensuite, nous avons regroupé les empreintes spectrales par

distance euclidienne similaire ou très proche. L’empreinte spectrale centrale de chaque classe a été déterminée ainsi que l’heure de passage de l’insecte associé à l’empreinte spectrale centrale.

#### I-4 : Résultats et discussion

La figure 21 représente une distribution en fonction du temps des intensités rétrodiffusées dans le volume d’air sondé par notre système de télédétection passive. Nous observons de hautes intensités et de basses intensités. Les hautes intensités sont dues au passage d’un spécimen dans le volume d’air sondé par notre système de mesure. L’heure de lâcher des sphères lambertiennes a permis d’identifier les intensités rétrodiffusées par les sphères. Les basses intensités sont dues aux particules atmosphériques, à l’imperfection de la boîte noire utilisée. Ces basses intensités sont les effets du bruit.

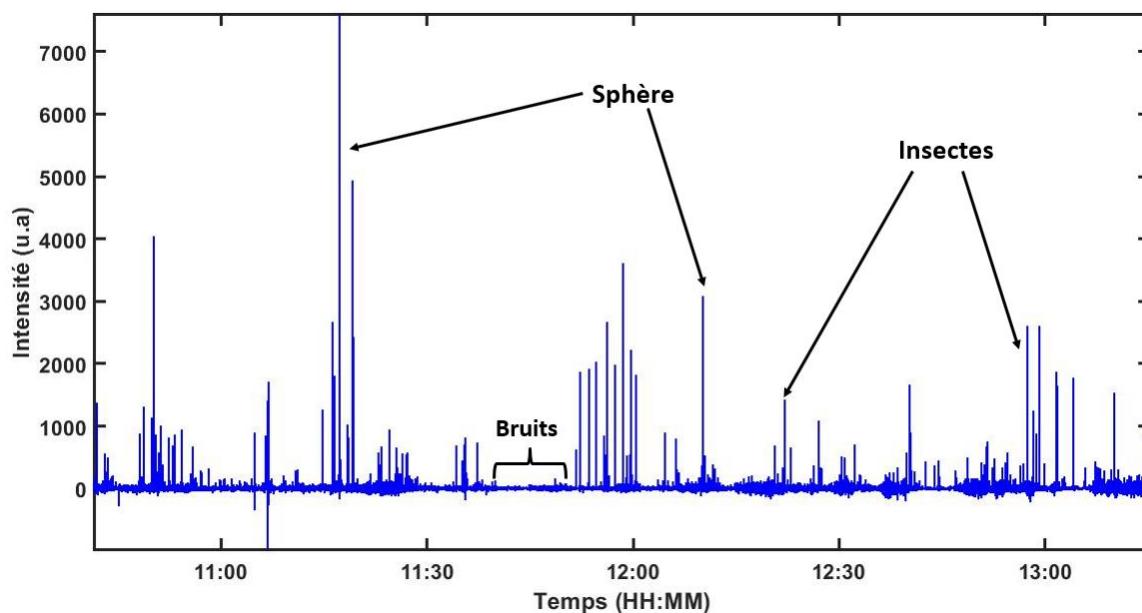


Figure 21 : Distribution temporelle des intensités moyennes après filtrage.

Le seuil d’intensité que nous avons défini à partir de l’équation Eq. 15 a permis d’extraire les spectres des spécimens volants et de la source d’illumination (le soleil) que nous présentons à la figure 22.



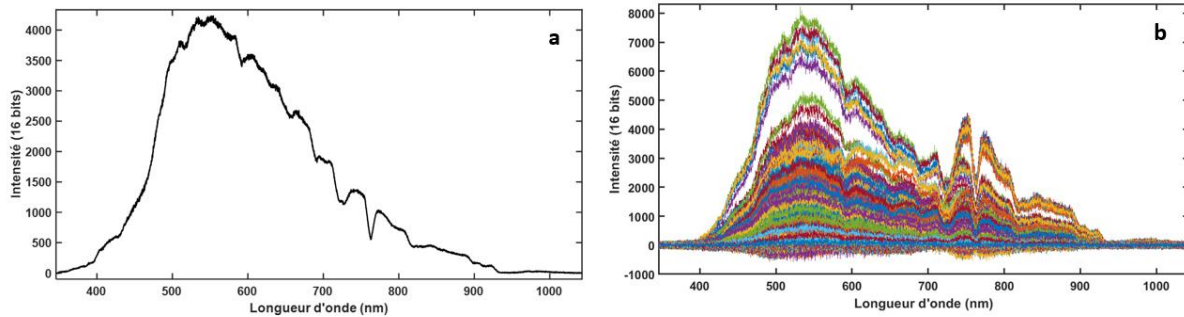


Figure 22 : Intensités de réflectance (a) du soleil et (b) de spécimens volants

Le spectre du soleil a un profil gaussien (Figure 22a). Ce spectre sert de référence. Les spectres de la figure 22b ont pratiquement le même profil que celui du soleil. Mais, une différence est observée entre 700 nm et 900 nm. Cette différence montre une perturbation de la source lumineuse incidente. Cette perturbation est due aux spécimens volants qui se sont introduits hasardeusement dans le volume d'air sondé.

La figure 23 présente les empreintes spectrales des spécimens volants détectés par notre système d'acquisition. Ces empreintes spectrales ont été calculées à partir de l'équation Eq. 22. Nous observons, pour certaines empreintes spectrales, des valeurs négatives. Cela montre que l'intensité de bruit de fond évaluée est supérieure à l'intensité rétrodiffusée par les spécimens volants. L'une des causes possibles serait due à la variation aléatoire de l'intensité du soleil qui introduirait une inhomogénéité de l'intensité du soleil durant le temps d'acquisition.

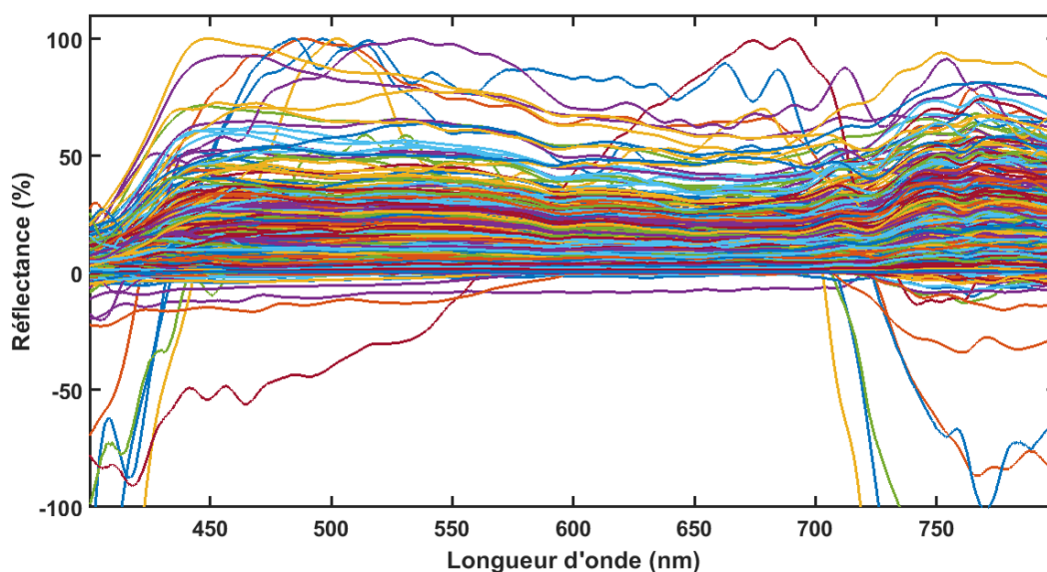


Figure 23: Réflectance d'insectes

Pour résoudre ce problème, nous avons exploré la méthode de la fraction de bruit maximale (*MNF*) qui tient compte des caractéristiques internes de chaque fichier de mesure pour extraire l'intensité de bruit de fond de l'intensité rétrodiffusée par un spécimen volant. Le résultat est montré à la figure 24. Elle résume les différentes étapes de la méthode de *MNF*. La figure 24 (a,b) présente 1000 échantillons de spectres de deux événements acquis sur une durée de 10 s. Ces échantillons de spectres sont centrés autour de l'intensité statique. La figure 24 (c,d) correspond aux spectres obtenus après application de la méthode des *MNF*. Les spectres ont été ordonnés en fonction du rapport signal sur bruit (*SNR*) décroissant. Le spectre d'intérêt est le spectre d'intensité élevée. En (c), le spectre d'intensité la plus élevée est le spectre du soleil ; en (d), le spectre d'intensité la plus élevée est le spectre d'un spécimen détecté par le système d'acquisition. Les spectres d'intensités plus faibles sont considérés comme des bruits de fond.

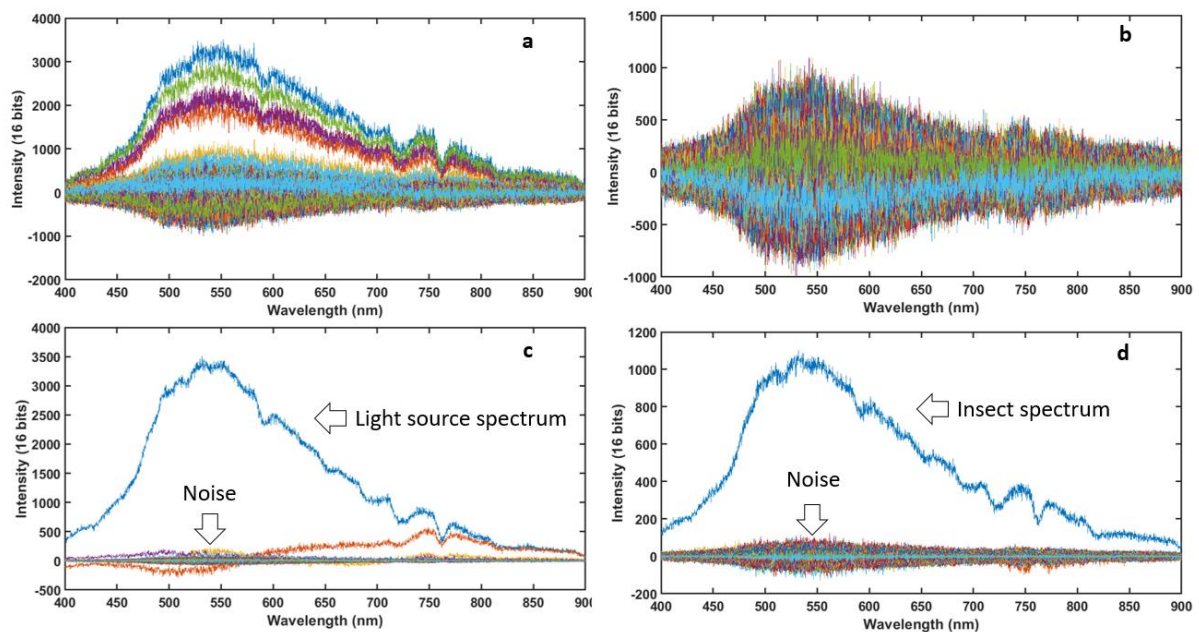


Figure 24: Spectres de réflectance extraits par *MNF*

Pour une durée de mesure de 3h, environ 407 spectres ont été extraits pour 1000 images. L'idée consiste à associer chaque spectre à une image. Pour cela nous avons eu recours à la méthode d'analyse de réduction de variables spectrales. Pour cela, nous avons utilisé le critère de la part d'inertie que nous avons présenté dans la partie

méthode, équation Eq. 24. Le résultat est présenté à la figure 25. La dimension  $q$  est choisie à partir d'un seuil que nous avons fixé à 95% de la part d'inertie. Cela signifie que les 95% des valeurs singulières rendent compte des paramètres influents de l'empreinte spectrale et sont suffisantes pour reconstruire les données (figure 26) à partir de l'équation Eq. 25. Sur la figure 25, la dimension est identifiée par un carré avec un point centrale. La dimension pour cette étude est égale à 19.

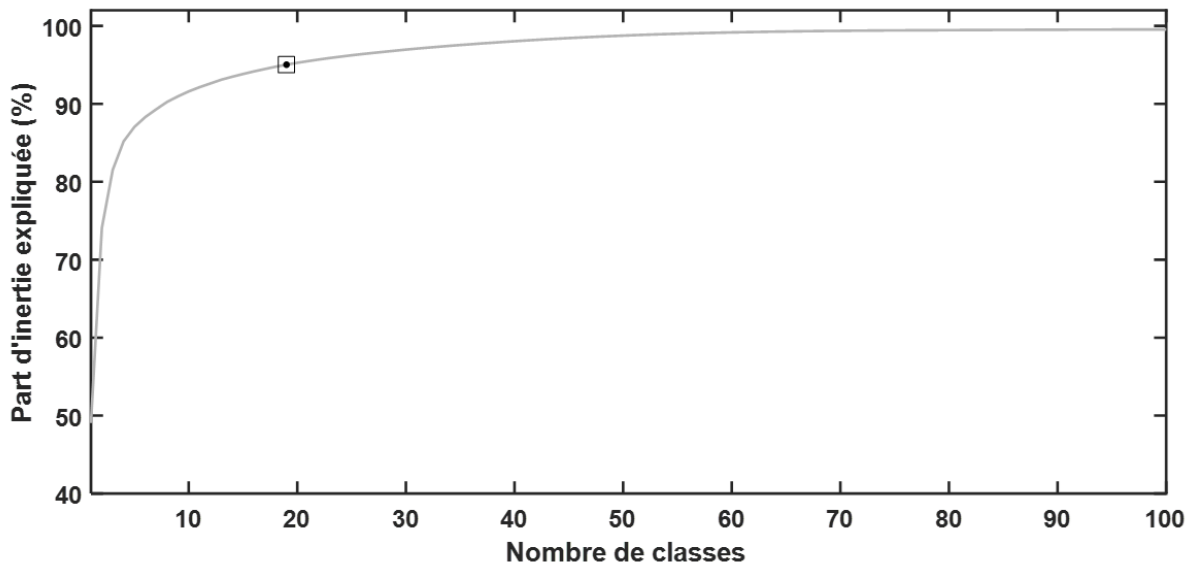


Figure 25 : Part d'inertie cumulée en fonction du nombre de dimensions. La dimension retenue est égale à 19. Cela est représenté par un carré sur la courbe.

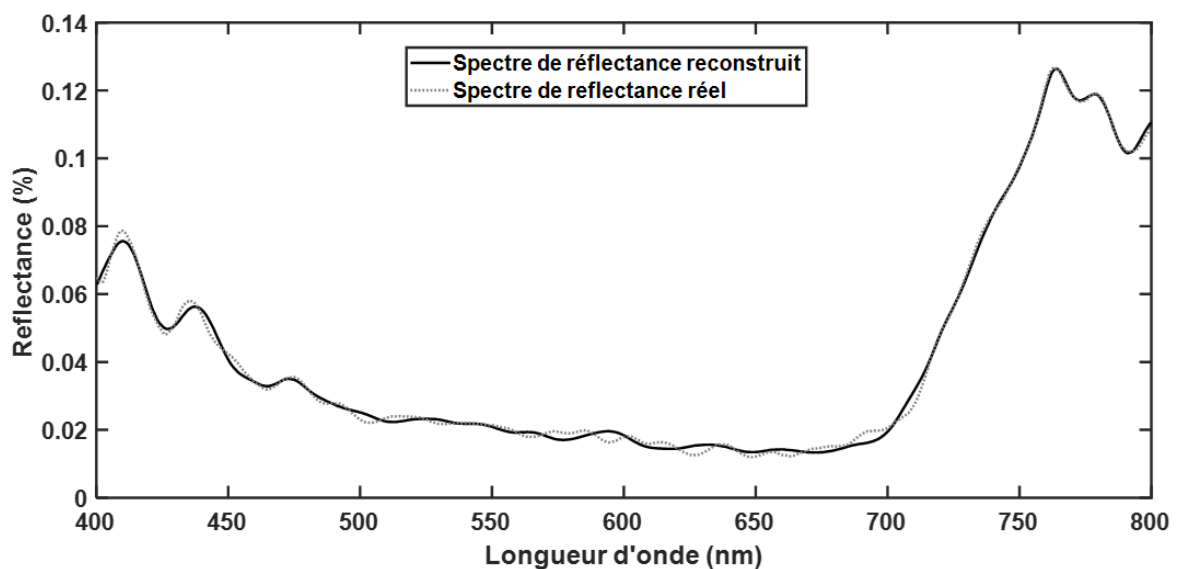


Figure 26 : Spectres de réflectance.

La Figure 26 présente deux spectres de réflectance. La courbe en pointillée est le spectre réel et la courbe en trait plein est le spectre reconstruit avec 95% des valeurs singulières.

Les 19 classes obtenues à partir de la part d'inertie correspondent à 19 espèces d'insectes détectés par notre système lidar. Le résultat est présenté à la Figure 27 et à la Figure 28. Les chiffres alphanumériques en haut à gauche de chaque sous-figure de la Figure 27 indiquent la classe et les chiffres en haut à droite de chaque sous-figure indiquent l'heure de passage de l'insecte dans la zone d'intérêt. Le diagramme circulaire en bas à l'extrême droite représente la répartition des insectes dans chaque classe. Sur chaque sous-figure, nous observons des maxima et des minima. Chaque maximum est associé à une longueur d'onde et représente les points de réflectance diffuse de la lumière par l'insecte. La réflectance diffuse rend compte de la coloration de l'insecte c'est-à-dire des différents pigments présents sur le corps de l'insecte. Autrement dit, la présence de plusieurs maxima montre que les insectes observés ont une coloration multicolore ou plusieurs pigments caractérisant leur coloration. Les insectes de la classe C12 ont une coloration dominée par le jaune. Chaque minimum représente des points d'absorption de certaines longueurs d'onde par les insectes. Cette absorption leur permettrait de réguler la température de leur corps nécessaire à leur survie. Les longueurs d'onde d'absorption sont dues à certains pigments présents sur le corps de l'insectes.

Les empreintes spectrales centrales présentées à la Figure 27 ont été utilisées pour déterminer manuellement les images acquises avec la caméra CCD. Nous avons comparé l'heure de passage de l'insecte dans la zone d'intérêt et l'heure d'acquisition de l'image. Lorsque les heures coïncident, l'image est associée au spectre. Lorsque les heures ne coïncident pas, nous considérons une différence de deux à dix secondes pour identifier l'image. La Figure 28 présente les différentes images capturées à partir du système d'acquisition. Les chiffres alphanumériques à l'extrême droit en haut de chaque sous-figure de la Figure 28 sont les différentes classes d'espèces de spécimens détectés. Ces images sont associées respectivement aux différentes empreintes spectrales présentées à la Figure 27. Les différentes tâches blanches observées sur chaque sous-figure sont les spécimens volants qui se sont introduits hasardement dans le volume sondé par le système d'acquisition.

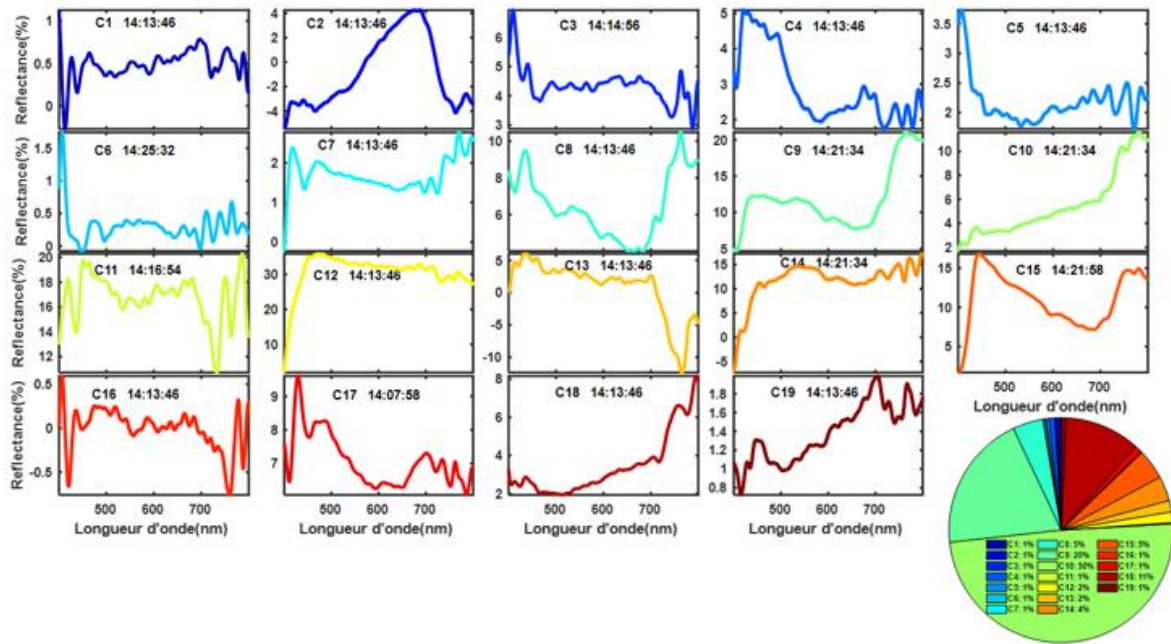


Figure 27 : Spectres de réflectances de chaque espèce de spécimens détectés. La classe C9 représente 20% des observations et la classes C10 représente 50% des observations.

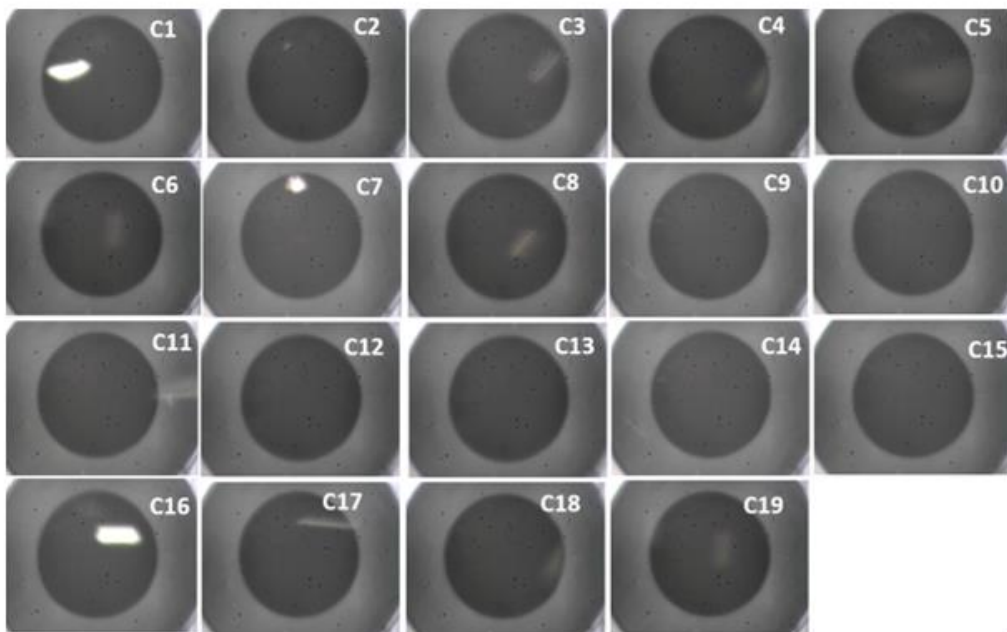


Figure 28 : Images d'insectes associées à chaque classe. Le cercle avec un fond noir est l'orifice de la boîte noire. Les taches blanches observées au niveau de l'orifice de la boîte noire représentent les spécimens volants détectés par le système d'acquisition. Les images C1, C17 et C16 sont saturées dues à la quantité de photons rétrodiffusées par la section efficace du spécimen et au temps d'exposition trop long de la caméra. L'image C11 est probablement une libellule présentant son thorax au système d'acquisition. La quantité de photons rétrodiffusée par la surface présentée est faible cela donne une image moins contrastée.

En comparant les empreintes spectrales de la classe C1 et les empreintes spectrales de la classe C16, nous remarquons une similarité entre les deux empreintes spectrales. À la différence, autour de 760 *nm*, les insectes de la classe C16 absorbent une forte quantité de rayons lumineux de longueurs d'onde 760 *nm*. L'analyse des images montre que les deux insectes sembleraient identiques et la différence au niveau de leur empreinte spectrale se justifierait par le fait qu'il ne présente pas la même surface. Les images capturées par la caméra CCD que nous avons présentées à la Figure 28 ne permettent pas d'identifier correctement les insectes. Cela est dû au fait que la caméra n'est pas suffisamment rapide. Aussi le temps d'exposition de la caméra était long et ne pouvait pas être réglé cela a donc favorisé la saturation des images que nous observons sous forme de taches blanches sur chacune des sous-figures de la Figure 28. Pour pallier à ce problème, nous avons fait varier la luminosité de la caméra. La luminosité est, dans l'espace chromatique, la distance entre le blanc et le noir. Nous avons également joué sur le contraste de la caméra. Ce paramètre des caméras indique l'opposition entre des valeurs fortes (sombre et lumineux) ou des couleurs différentes. Toutes ces méthodes sont des méthodes informatiques et cela n'a pas produit les résultats escomptés. Nous avons donc essayé des méthodes physiques en utilisant un objet blanc fixé sur la boîte noire pour améliorer le contraste de l'image. Les résultats ne furent pas satisfaisants. L'utilisation d'une caméra rapide avec un temps d'exposition programmable serait donc nécessaire pour rehausser la qualité des images acquises.

Certaines empreintes spectrales n'ont pas pu être associées à une image cela serait dû aux fréquences d'acquisition de la caméra CCD et du spectromètre qui ne coïncident pas. En fait, les acquisitions sont effectuées indépendamment. Un autre élément qui pourrait justifier ce fait est la mémoire vive de l'ordinateur qui serait insuffisante pour un enregistrement rapide car le spectromètre et la caméra ont été connectés sur un même ordinateur et piloté par des programmes différents.

Ce travail a permis d'utiliser l'instrument de télédétection passive mis en œuvre pour caractériser, classifier et contrôler les spécimens volants à partir de la mesure de l'empreinte spectrale. Notre contribution se situe au niveau de la mesure simultanée de l'empreinte spectrale et de l'image. Nous avons également développé des techniques d'analyse en grappe pour identifier les groupes d'espèces de spécimens

volants détectés à partir de l’empreinte spectrale. Cependant, dans certains cas, du fait de la réflectance spéculaire et l’iridescence des ailes des insectes, une indétermination est introduite dans les résultats. Nous avons exploré une autre voie, celle de l’utilisation d’un photodétecteur quatre quadrants. Le chapitre suivant traite de cette question.

## **II : Caractérisation des insectes en vol en fonction des paramètres dynamiques et statiques**

Le phénomène d'iridescence est observé lorsqu'une surface fine apparaît différente sous des angles d'observation différents. Les insectes ont en général des ailes fines et l'empreinte spectrale d'un insecte peut apparaître différente au cours de son vol. L'empreinte spectrale devient dès lors un sujet à discussion. L'une des voies de caractérisation des insectes en vol est l'exploitation de la fréquence de battement de leurs ailes. Nous avons monté un dispositif de télédétection composé d'un couple formé par une lunette astronomique et d'un télescope décrit dans le chapitre II pour la mesure de la fréquence de battement d'ailes des insectes en vol. L'exploitation effective des mesures acquises par cet instrument nécessite un calibrage pour avoir accès à la section efficace de l'insecte et à la direction de vol.

Ce chapitre comportera cinq parties essentielles qui traiteront :

- La mesure des paramètres statiques et dynamiques
- La méthode de calibrage de la direction de vol
- La méthode de calibrage de la section efficace
- La méthode d'extraction des données du *QPD* et la méthode d'analyse fréquentielle
- Et les résultats et discussion

### **II-1 : Mesure des paramètres statiques et dynamiques**

Dans cette partie, nous décrivons la méthode de mesure des paramètres statiques et dynamiques que sont la section efficace et la fréquence de battement d'ailes des insectes en vol.

Nous avons effectué la mesure de la section efficace en utilisant le montage expérimental qui a servi à mesurer l'empreinte spectrale décrit à la section I. À la différence, nous avons remplacé le spectromètre par un détecteur quatre quadrants. Nous avons également utilisé une carte d'acquisition convertisseur analogique-numérique pour interconnecter le détecteur quatre quadrants et l'ordinateur. La carte



d'acquisition convertisseur analogique-numérique a servi à échantillonner le flux lumineux rétrodiffusé par les insectes avec une plage de fréquences d'échantillonnage comprises entre 1000 et 20000 échantillons par seconde.

Pour les mesures, le processus d'acquisition des données a été identique à la méthodologie d'acquisition des données de l'empreinte spectrale décrit dans la section I. Des sphères lambertiennes, de différentes tailles, ont été lâchées en chute libre dans le plan focal de la boîte noire. Nous avons utilisé ces sphères lambertiennes pour le calibrage de la section efficace.

## II-2 : Méthode de calibrage de la direction de vol

Dans cette partie, nous décrivons la méthode de calibrage de la direction de vol des insectes.

Pour déterminer la direction dans laquelle volent les insectes, nous avons ajouté un pendule au dispositif expérimental qui a permis de mesurer la section efficace des insectes. Ce pendule, pouvant être en oscillation libre, nous l'avons placé à l'extrême de la face avant de la boîte noire. Il a été placé de telle sorte que la barre en oscillation passe devant le plan focal de la boîte noire. Cette barre en aluminium, au cours de son mouvement de va-et-vient, rétrodiffuse les rayons incidents provenant du soleil. La position de la barre est préalablement identifiée et la date des oscillations est relevée. Les données enregistrées à l'ordinateur lors des oscillations du pendule ont permis de calibrer la direction de vol des insectes (Figure 29).

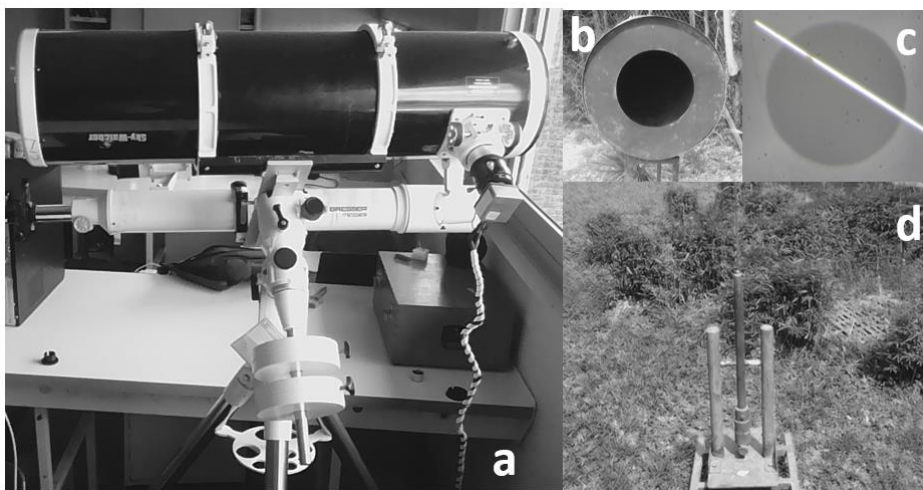


Figure 29 : Vue mosaïque du système de mesure. (a) Récepteur. (b) Boîte noire. (c) Image du pendule en oscillation libre. (d) Photo du pendule de calibration de la direction de vol.

### II-3 : Méthode de calibrage de la section efficace en télédétection passive

Cette partie expose la méthode de calibrage de la section efficace.

Le calibrage de la section efficace en télédétection passive a été effectué en lâchant en chute libre des sphères lambertienne de réflectivité 100% devant la boîte noire à une position proche du plan objet. Cette opération permet de déterminer la section efficace absolue,  $SEO_{term}$ , en fonction du rayon  $r$  de la sphère à partir de l'équation Eq. 26.

$$SEO_{term} = \pi \cdot r^2 \quad \text{Eq. 27}$$

La section efficace se calcule en fonction de l'intensité lumineuse rétrodiffusée par l'insecte ( $I$ ), de l'intensité statique ( $I_{static}$ ) due aux bruits de fond et aux bruits électroniques, de l'intensité lumineuse de la référence ( $I_{sphère}$ ) et de la section efficace de la sphère lambertienne ( $SEO_{term}$ ) à partir de l'équation Eq. 27 :

$$SEO = \frac{I - I_{static}}{I_{sphère} - I_{static}} SEO_{term} \quad \text{Eq. 28}$$

La détermination de la section efficace est précise lorsque les insectes sont à proximité du plan focal objet de la boîte noire, là où les sphères ont été lâchées.

### II-4 : Méthode d'extraction des données du QPD et méthode d'analyse fréquentielle.

Dans cette partie, nous décrivons la structure des données et la méthode d'extraction de l'information des données du QPD que nous avons développée. Nous présentons également quelques résultats.

Pour extraire l'information enregistrée par le photodétecteur quatre quadrants (QPD), nous avons déterminé dans un premier temps, les valeurs médianes de la tension dans chaque quadrant (Figure 30). Ces valeurs médianes correspondent aux valeurs du bruit de fond. Ensuite, ces valeurs ont été soustraites des valeurs des tensions initiales après rééchantillonnage à l'échelle de la matrice initiale. Le QPD délivrant une tension négative (Figure 31a), nous avons pris l'opposé des différentes tensions (Figure 31b).

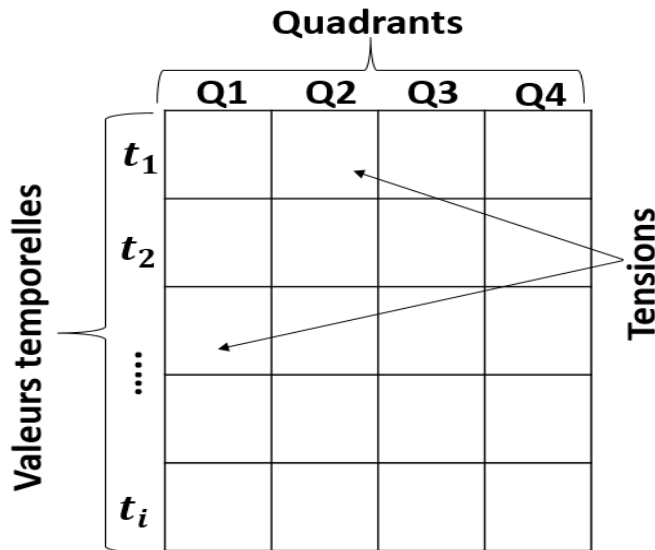


Figure 30 : Structure des données avec le photodétecteur quatre quadrants

Ensuite, nous avons défini un seuil d'intensité égal à la somme de la valeur interquartile et de la déviation standard des intensités sans bruit de fond. Toutes les valeurs des intensités supérieures à ce seuil prennent la valeur 1 et celles inférieures prennent la valeur 0. À ce stade, une image binaire est obtenue. Nous avons appliqué successivement l'érosion avec une fenêtre rectangulaire (élément structurant)  $150 \times 1$  pour délimiter les contours des événements rares et la dilatation avec une fenêtre rectangulaire de dimension  $450 \times 1$  pour la continuité du signal. Pour isoler les événements rares correspondant à chaque pic (Figure 31b), nous avons déterminé les connectiques des objets dans l'image binaire obtenue.

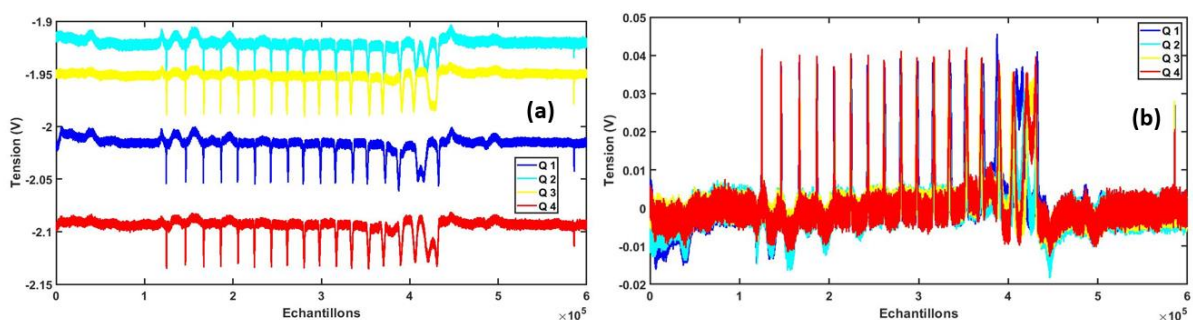


Figure 31 : Oscillation du pendule. (a) Intensités lumineuses converties en tension par le DAQ. (b) Valeurs de la tension après soustraction du bruit de fond.

Nous avons effectué l'analyse fréquentielle en utilisant la transformée de Fourier à temps discret décrit au chapitre I section I-4 avec un fenêtrage gaussien.

## II-5 : Résultats et discussion

La Figure 32 présente l'oscillation du pendule (Est – Ouest) détecté par chaque quadrant du *QPD*. Le signal du quadrant *Q1* est représenté en bleu, le signal du quadrant *Q2* en cyan, le signal du quadrant *Q3* en jaune et celui du quadrant *Q4* en rouge.

Nous constatons que le signal du quadrant *Q1* atteint son pic avant celui du quadrant *Q2*. De même, le quadrant *Q2* atteint son pic avant le signal du quadrant *Q4*. Le quadrant *Q3* est le dernier à détecter des informations sur un insecte volant de l'Est vers l'Ouest. Nous avons donc utilisé l'ordre de détection de l'oscillation du pendule par les quadrants du *QPD* pour calibrer la direction de vol des insectes et déterminer l'orientation des quadrants du *QPD*.

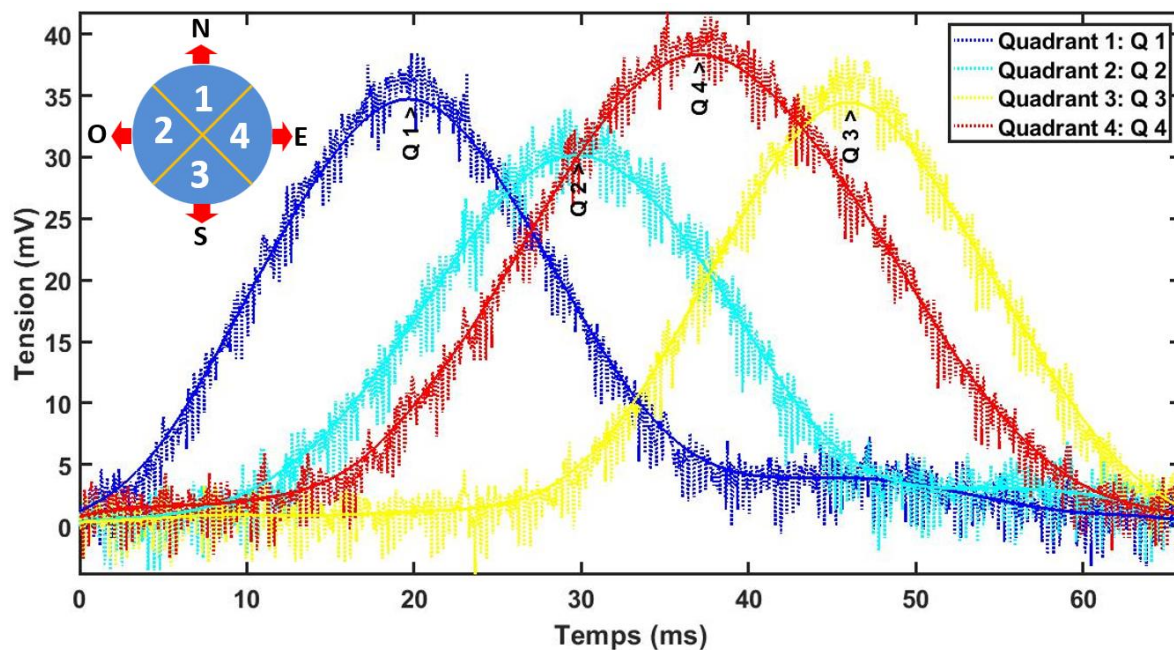


Figure 32 : Oscillation temporelle du pendule Est-Ouest et orientation du *QPD*. Les courbes *Q1*, *Q2*, *Q3* et *Q4* représentent respectivement les signaux des quadrants 1, 2, 3 et 4. L'ordre d'apparition des pics est utilisé pour déterminer l'ordre de détection des quadrants. L'ordre de détection des quadrants lors de l'oscillation du pendule est utilisé pour calibrer la direction de vol des spécimens volants.

La Figure 33 représente la section efficace en fonction du temps de quatre insectes qui se sont introduits hasardeusement dans la zone d'intérêt. Sur la Figure 33 (a), nous observons différents maxima sur chaque quadrant du *QPD*. Nous observons

également un décalage temporaire entre chacune des courbes des quadrants. Ces maxima sont les différents battements d'ailes de l'insecte. Le déploiement des ailes au cours du temps de l'insecte contribue significativement sur la section efficace du corps de l'insecte qui est une grandeur statique. C'est essentiellement cette contribution de la section efficace des ailes qui fait varier la section efficace optique de l'insecte au cours du temps. Le décalage horaire, entre les différentes courbes, nous renseigne sur l'ordre de détection de chaque quadrant. Autrement, cela nous renseigne sur la direction de vol de l'insecte. La boussole, à l'extrême gauche, en haut de chaque figure indique la direction de vol de chaque insecte. Sur la Figure 33 (a) l'insecte vol du sud-est vers le nord-ouest. Sur la Figure 33 (b) seuls les quadrants  $Q2$  et  $Q3$  ont détecté un signal. Le quadrant  $Q3$  d'abord, ensuite le quadrant  $Q2$ , l'insecte volerait alors de sud vers l'ouest et sur la Figure 33 (c), seuls les quadrants  $Q1$  et  $Q2$  ont détecté un signal. Le quadrant  $Q2$  d'abord puis le quadrant  $Q1$  ensuite, l'insecte volerait donc de l'ouest vers le nord.

La présence de maxima sur la Figure 33 (c) est quasiment inexistant. Cela s'expliquerait par le fait que l'insecte observé est de grande taille et aurait un battement d'ailes plus faible.

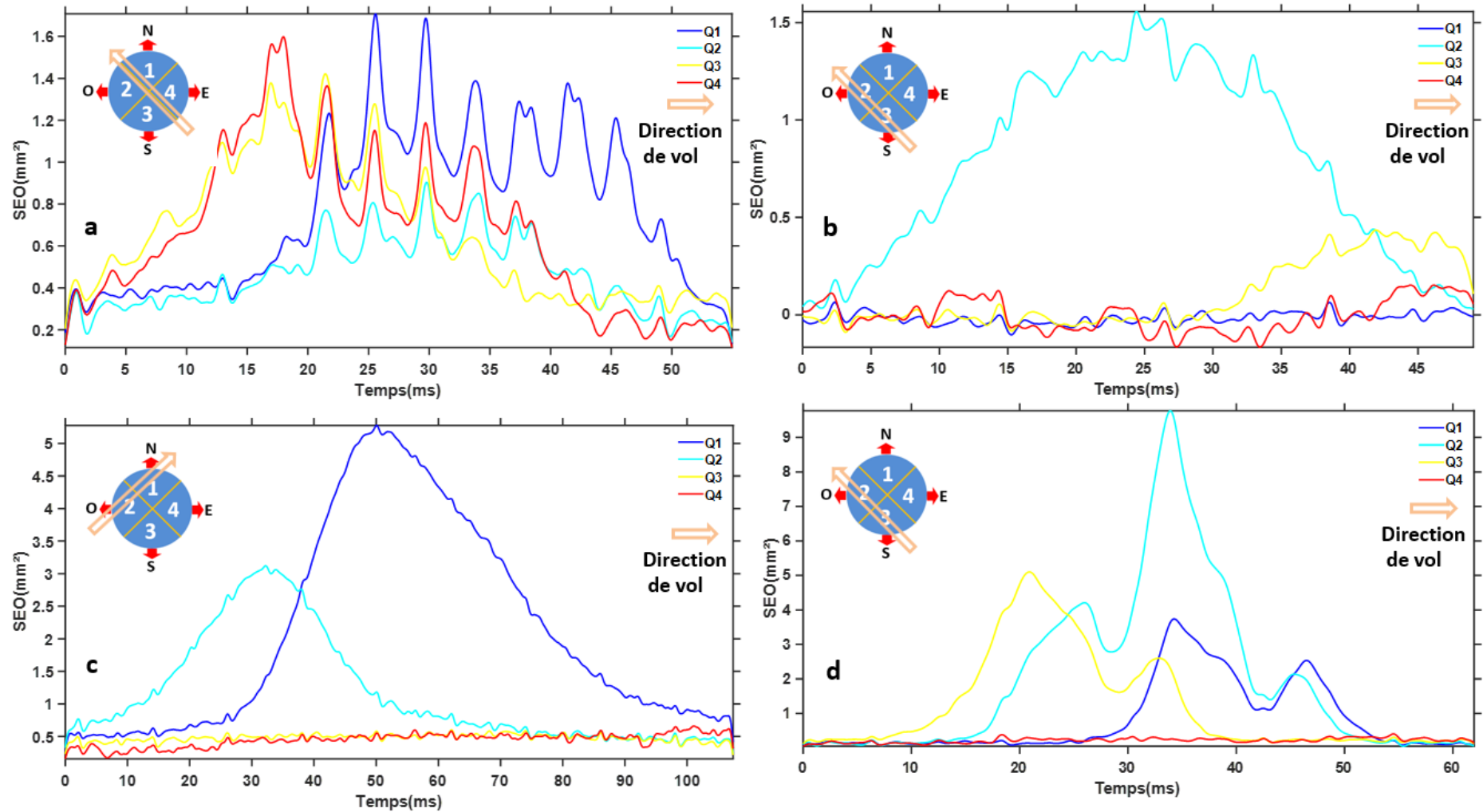


Figure 33 : Section efficace en fonction du temps de quatre insectes et leur direction de vol. (a,b,c,d) Les courbes de couleurs bleu, cyan, jaune et rouge représentent respectivement les signaux dans les quadrants Q1, Q2, Q3 et Q4 calibrés en section efficace. La flèche en marron indique la direction de vol de l'insecte. Par exemple en c) l'insecte vol de l'Ouest vers le Nord et en d) du Sud vers l'Ouest.

La Figure 34 (a) représente le signal de la SEO, la Figure 34 (b) le spectrogramme du signal de la SEO et la Figure 34 (c) la densité spectrale moyenne à partir du spectrogramme.

Sur la Figure 34 (b), nous observons sept tâches appartenant à des domaines de fréquences bien précises. La première tâche à compter du bas est la composante continue du spectrogramme. Elle représente la contribution du corps de l'insecte. La deuxième tâche représente l'harmonique fondamentale. Cette harmonique est caractéristique du signal et correspond à la fréquence fondamentale de battement d'aile de l'insecte. Les autres tâches représentent les harmoniques supérieures.

Sur la Figure 34 (c), Nous observons plusieurs pics. Le pic le plus élevé correspond à la composante continue de la densité spectrale. Cette composante continue est liée à la contribution du corps de l'insecte. Le deuxième pic le plus élevé devrait correspondre à la fréquence fondamentale de l'insecte et les autres pics associés à des harmoniques supérieures multiples entiers de la fréquence fondamentale. Cela n'est pas le cas comme nous pouvons l'observer sur la Figure 34 (c). Le chapitre IV section II propose donc de nouvelles techniques d'estimation de la fréquence fondamentale de battement d'ailes des insectes.

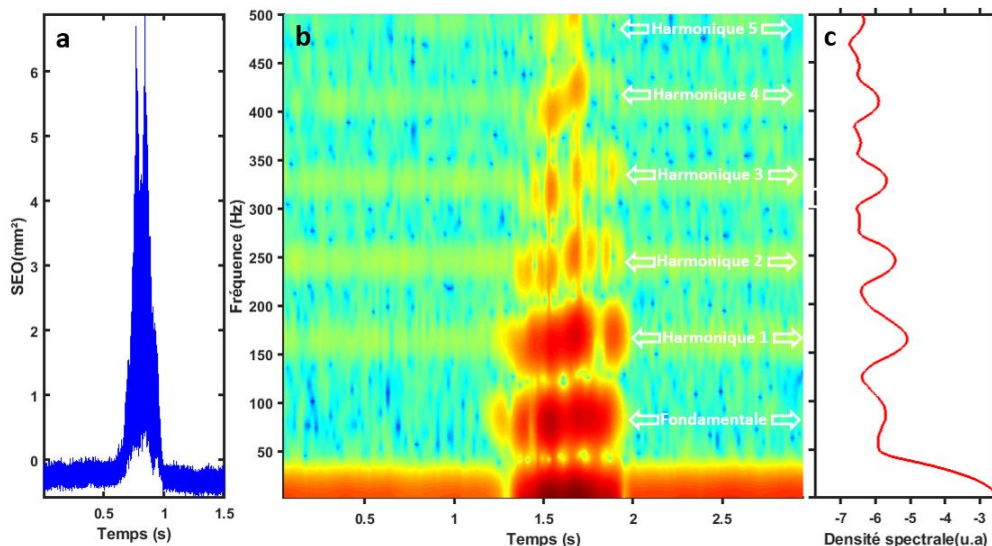


Figure 34 : (a) Section efficace optique en fonction du temps. Les pics représentent les différentes périodes de battements d'ailes de l'insecte. (b) Spectrogramme de la SEO calculé à partir de la transformée de Fourier des signaux à temps court (STFT, Short Time Fourier Transform). (c) Densité spectrale de la SEO

L'utilisation du *QPD* a permis de lever l'ambiguïté sur la nature de certains insectes par la mesure de la fréquence de battement de leurs ailes. Néanmoins, les techniques de mesures passives utilisant le spectromètre et le *QPD* ne permettent pas de géolocaliser les insectes. Aussi, ces instruments ne permettent pas l'étude sur les insectes nocturnes. Le chapitre IV aboutit à un instrument pour faire une application sur une large gamme d'insectes sur une dynamique spatiale de l'activité de ces derniers.



---

## **CHAPITRE IV : Caractérisation des insectes en télédétection active**

---

## **CHAPITRE IV : Caractérisation des insectes en télédétection actives**

### **I : Caractérisation des insectes en vol par télédétection active dans le domaine des kilohertz**

Les pigments des insectes multicolores d'une même espèce peuvent être différents. Leur caractérisation par leur signature spectrale devient une tâche complexe. Aussi l'évaluation de leur abondance géospatiale et leur taille sont des paramètres qui influent les décisions de stratégie de lutte adoptées. Ce travail de thèse vise à proposer une méthode de mesure alternative à la méthode de mesure par télédétection passive. Cette nouvelle approche doit favoriser les mesures de jour comme de nuit et doit permettre la mesure synchrone de la fréquence de battement des ailes des insectes en vol, la mesure de leur taille et la mesure de leur position géospatiale par rapport au système de mesure.

Pour atteindre cet objectif, il a fallu développer une technique de mesure par spectroscopie par télédétection active intégrant à la fois la mesure de la distance de détection, la mesure de la section efficace, la mesure de la fréquence de battement d'ailes des insectes et une nouvelle méthode de calibrage de la section efficace.

Ce chapitre comportera quatre parties essentielles qui traiteront :

- des méthodes de calibrage de la distance et de la section efficace ;
- des méthodes de mesure en spectroscopie par télédétection active ;
- de la méthode d'analyse fréquentielle.
- Et, les résultats et la discussion

#### **I-1 : Méthode de calibrage**

Dans cette partie, nous discuterons la composante télémétrique de la technique mise en œuvre. Par la suite, nous présenterons la méthode de calibrage de la section efficace en utilisant des sphères diffusantes comme des objets de référence d'une part, et d'autre part, en utilisant l'image de l'onde incidente formée sur un tableau noir en néoprène de réflectivité 4% comme image de référence.

### I-1-1 : Méthode de calibrage de la distance

Dans ce qui suit, nous présentons la méthode de calibrage de la distance en utilisant la méthode par triangulation car elle est moins contraignante en instrumentation par rapport aux autres qui s'avèrent onéreuses. Nous présentons et discutons également une distribution géospatiale des insectes en fonction du temps.

Le calibrage de la distance est l'un des aspects les plus importants en télédétection active. Cela permet de déterminer la position exacte du spécimen détecté qui peut être par exemple un insecte ou un oiseau en vol. Dans cette thèse, nous avons effectué le calibrage de la distance en utilisant la méthode par triangulation car elle est plus simple à mettre en œuvre.

Lorsqu'un spécimen passe dans la région d'intérêt et est intercepté par le faisceau laser, il réfléchit une portion de l'intensité de cette onde dans la direction du détecteur. L'onde est localisée par le point B. Ce point correspond à la position du tableau noir en néoprène, prise comme position de référence. Le spécimen est repéré en A. L'image du spécimen formée sur le détecteur est représentée par le point A'. Cette image se forme sur le pixel  $P_i$  du détecteur. Alors, ce qui est mesuré est l'intensité de l'onde rétrodiffusée par l'insecte. La distance de détection du spécimen correspond au trajet AA'. La Figure 35 montre une vue schématique de la configuration du dispositif expérimental.

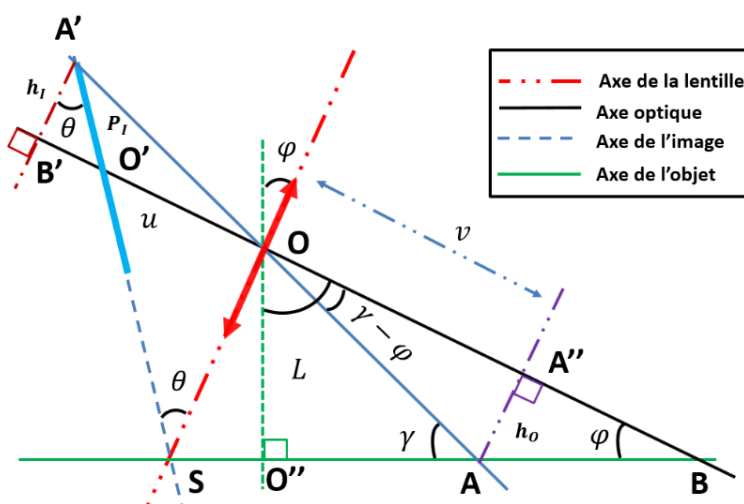


Figure 35 : Représentation schématique du dispositif expérimental dans la configuration de Scheimpflug.

Tableau 3 : Tableau explicatif des variables

Grandeur	
$L$	Distance entre le centre optique et l'axe de l'objet
$f$	Distance focale de la lentille
$\varphi$	Angle formé par l'axe optique et l'axe objet
$\theta$	Angle formé par l'axe de l'image par rapport à l'axe de la lentille
$z$	Distance de détection du spécimen
$\forall$	Angle d'inclinaison du dernier pixel par rapport à l'axe de l'objet
$P_I$	Position de l'image sur le pixel I du détecteur
$(v, h_o)$	Coordonnées du point objet du spécimen
$(u, h_i)$	Coordonnées du point image du spécimen
$A$	Point objet du spécimen
$A'$	Point image du spécimen
$A''$	Projection du point objet A sur l'axe optique
$O$	Centre optique de la lentille
$O'$	Position du pixel central du détecteur
$B'$	Projection de l'image du spécimen sur l'axe optique
$L_{iL}$	Distance entre le pixel central et le centre optique
$S$	Point de Scheimpflug

Pour établir une correspondance entre la position du pixel de l'image du spécimen ( $P_I$ ) sur le détecteur et la distance de détection ( $z$ ) en mètre ( $m$ ), nous avons établi une correspondance entre la distance de séparation télescope-lunette astronomique, la distance focale du télescope, l'angle d'inclinaison du capteur linéaire, la position angulaire de l'objet, la position de l'image sur le capteur et la distance de détection (Eq. 29). Les détails du calcul sont en annexe C.

$$z = \frac{L[P_I(\sin\theta - \cos\theta \cdot \tan\varphi) + f]}{P_I(\cos\theta + \tan\varphi \cdot \sin\theta) + f} \quad \text{Eq. 29}$$

La Figure 36 présente l'évolution de la distance en fonction du pixel. La distance n'est pas linéaire dans la configuration de notre système optique contrairement au système classique de télédétection dans lequel la distance est déterminée à temps de vol.

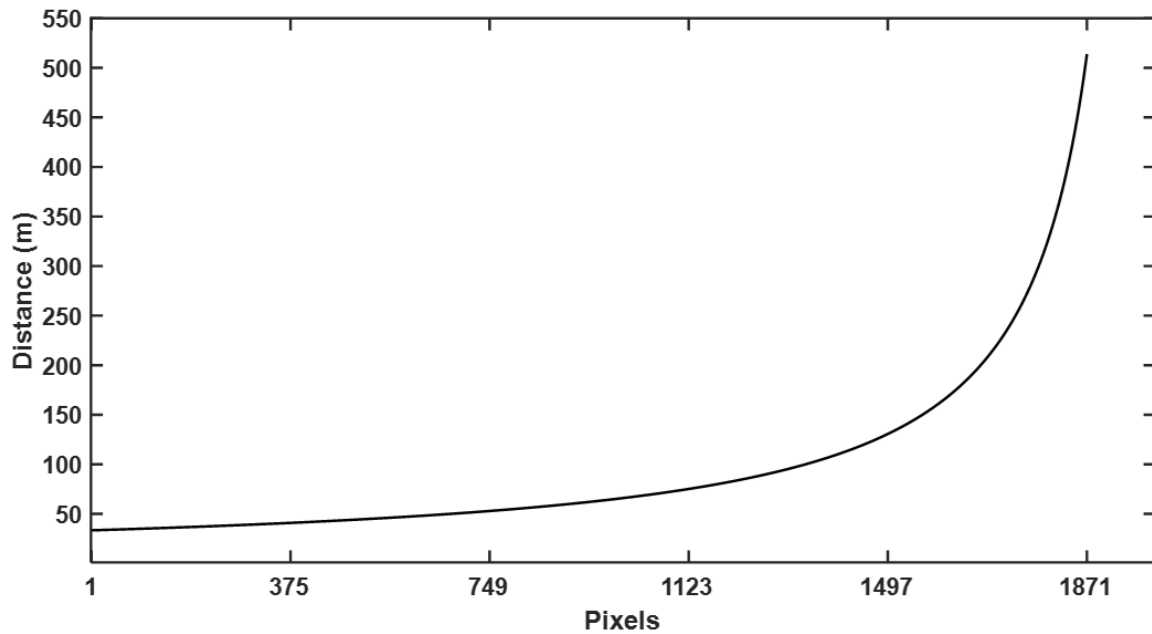


Figure 36 : Distance en fonction de la position du pixel

### I-1-2 : Méthode de calibrage de la section efficace en télédétection active

Comme nous l'avons mentionné plus haut, ce travail vise à proposer une alternative à la méthode de calibrage en télédétection passive du fait de la nouvelle configuration du dispositif expérimental, de la nature de la source lumineuse incidente en vue de minimiser les dangers d'exposition au faisceau laser. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé un objet de référence pour la section efficace qui ne fait pas intervenir un opérateur.

Cette partie traite donc de la technique mise en œuvre pour calibrer la section efficace en télédétection active. Nous présentons ensuite, une distribution de la section efficace des insectes au cours de la journée.

La procédure a consisté à déterminer la largeur et la hauteur du faisceau laser observé sur un tableau noir en néoprène fixé sur un arbre à la distance de calibrage avec une caméra matricielle CCD. La section efficace absolue  $SEO_{term}$  a été alors évaluée à partir de l'équation Eq. 30 en fonction de la largeur du faisceau laser à la distance de référence ( $L_{term}$ ), de la hauteur du faisceau laser à la distance de référence ( $H_{term}$ ) et de la réflectivité du tableau noir en néoprène ( $R_{term}$ ) :

$$SEO_{term} = L_{term} \cdot H_{term} \cdot R_{term} \quad \text{Eq. 30}$$

Connaissant la section efficace absolue et l'intensité lumineuse de référence, la section

efficace d'un insecte ou d'un oiseau en vol a été déduite de l'équation Eq. 31 en fonction de la section efficace à la distance  $r$  ( $SEO$ ), de l'intensité rétrodiffusée à la distance  $r$  ( $I_r$ ) de l'intensité lumineuse rétrodiffusée par le tableau noir en néoprène à la distance de référence ( $I_{term}$ ) :

$$SEO = \frac{I_r}{I_{term}} SEO_{term} \quad \text{Eq. 31}$$

Or, l'intensité lumineuse est atténuée, d'une part, par les particules diffusantes et absorbantes de l'atmosphère et, d'autre part, décroît selon la loi analytique décrite par l'équation Eq. 32 :

$$I(r) = \frac{I_0 [1 + \tanh(\frac{r-r_0}{R})]}{r^2} \quad \text{Eq. 32}$$

$I_0$ ,  $R$ ,  $r_0$  sont des constantes de l'intensité lumineuse et de la distance et  $r$  la distance de la source lumineuse au point d'observation.

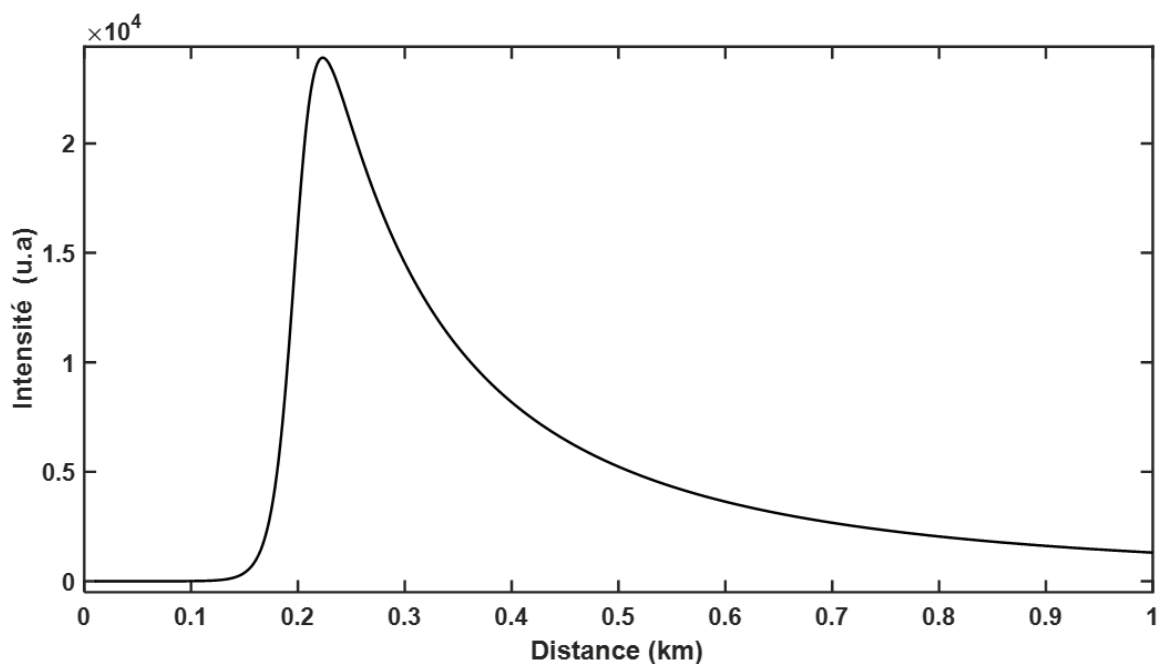


Figure 37 : Simulation de l'atténuation de l'intensité lumineuse en fonction de la distance pour un télescope de Newton.

L'atténuation de l'intensité lumineuse induit des erreurs de mesure. Car un moustique intercepté à 50 m par exemple semblerait plus grand qu'un papillon observé à près de 500 m. Il est clair qu'un recalibrage de la section efficace est nécessaire. La relation Eq. 33 proposée par Mikkel *et al.* pour le recalibrage de la section efficace a été utilisée.

$$SEO = \frac{(I_r - I_{static(r)}) \cdot r^2}{I_{static(r)} \cdot r_{term}^2} SEO_{term} \quad \text{Eq. 33}$$

$I_{static}$  : intensité statique de l'atmosphère supposée homogène

$SEO$  : la section efficace à la distance  $r$

$I_r$  : Intensité rétrodiffusée à la distance  $r$

$I_{term}$  : Intensité rétrodiffusée par la plaque recouverte de néoprène à la distance de référence

$SEO_{term}$  : section efficace de référence

## I-2 : Méthode d'acquisition et d'analyse des données

Dans cette partie, nous présentons la méthodologie d'acquisition des données en spectroscopie par télédétection active, la stratégie d'extraction des données issues des différentes mesures en utilisant les éléments de morphologie mathématique tels que l'érosion, la dilatation. Nous présentons et discutons quelques résultats.

Pour l'acquisition des données, le faisceau laser et la caméra linéaire ont été alignés sur un tableau noir en néoprène de réflectivité 4% fixé sur un arbre à près de 514 m du dispositif d'acquisition. Pour des raisons de sécurité, le tableau noir a été fixé à près de 8 m au-dessus du sol.

La phase d'alignement a consisté à utiliser une caméra ordinaire pour observer le cache noir de dimension  $810 \times 1000 \text{ mm}^2$ . La caméra a été montée d'abord sur le télescope ensuite sur la lunette astronomique pour observer le tableau noir. L'utilisation du tableau noir permet d'éviter la saturation de la caméra linéaire. La fréquence de rafraîchissement du laser a été fixée à  $3500 \text{ Hz}$  ainsi que celle du détecteur linéaire. Le laser s'éteint et s'allume à intervalle de temps régulier, cela a permis d'extraire en temps réel le bruit de fond pour l'accès aux données correspondant aux événements rares. Les données d'acquisition ont été enregistrées sous forme de fichiers binaires de 16 bits de taille  $2048 \times 35000$ . Ce fichier contient les intensités de bruit de fond et les informations spécifiques aux événements rares.

Pour l'extraction des informations, nous avons développé un autre algorithme. Cet algorithme permet d'extraire dans un premier temps le signal du bruit de fond  $I_{off}$ . Les intensités du bruit de fond et les intensités acquises lorsque le laser est allumé ont été identifiées à partir de l'horloge interne du détecteur linéaire. Nous avons obtenu une matrice  $I_{off}$  (2048 x 17500) des intensités de bruit de fond et une matrice  $I_{on}$  (2048 x 17500) des intensités lorsque le laser est allumé. Parfois, le nombre d'échantillons acquis pour le bruit de fond et les intensités des spécimens diffèrent. Dans ce cas, nous effectuons une interpolation linéaire pour égaliser les dimensions des deux matrices. Ensuite, la matrice des intensités du bruit de fond est soustraite de la matrice des intensités lorsque le laser est allumé. Nous avons obtenu une nouvelle matrice  $I$  (Eq. 34).

$$I = I_{on} - I_{off} \quad \text{Eq. 34}$$

Les courbes des valeurs minimales, médianes et maximales de cette nouvelle matrice sont calculées afin d'obtenir un seuil d'intensité pour l'extraction du signal spécifique à un événement rare. Le seuil d'intensité,  $I_{seuil}$ , est calculé selon l'équation (Eq. 35) :

$$I_{seuil} = I_{med} + SNR * I_{iqr} \quad \text{Eq. 35}$$

$I_{iqr}$  est l'écart interquartile des intensités rétrodiffusées  $I$ .

Toutes les intensités excédant le seuil d'intensité calculé (Figure 38) dans la matrice  $I$  prennent la valeur 1, toutes les autres intensités prennent la valeur 0. Une matrice binaire,  $I_{mask}$ , est obtenue. Cette matrice est utilisée comme filtre pour extraire dans la matrice  $I$  la zone qui correspond au mouvement d'un insecte (Eq. 36).

$$I_r = I_{mask} * I \quad \text{Eq. 36}$$



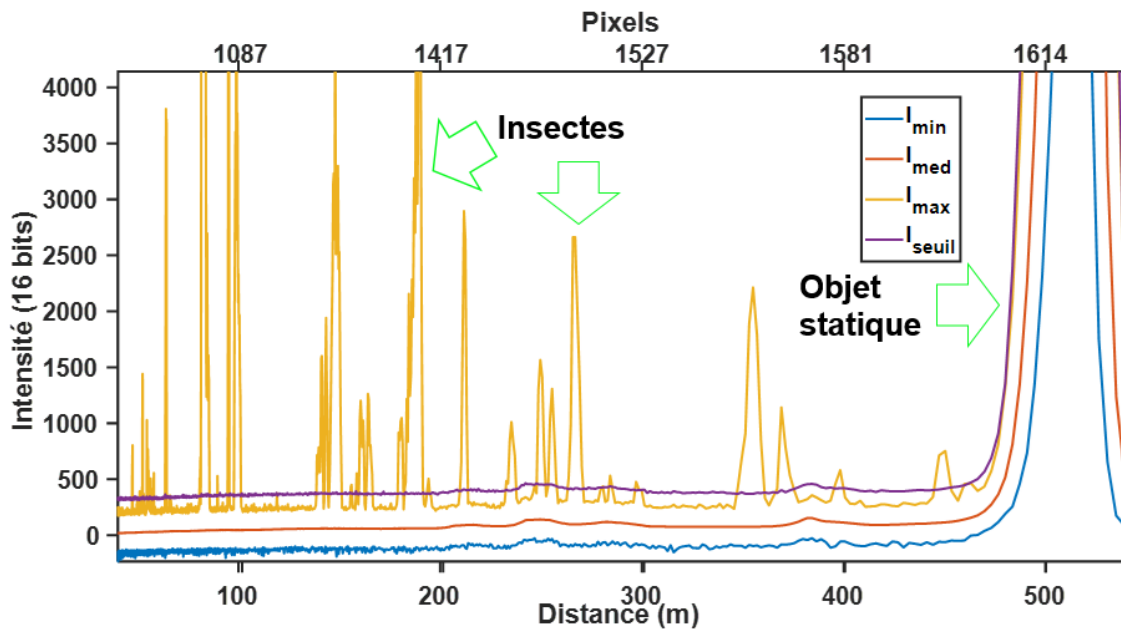


Figure 38 : Courbes de variations des intensités minimales, médianes et maximales. La valeur médiane est insensible aux variations d'intensité. Cette valeur est utilisée pour déterminer le retour du signal du laser par le tableau noir.

### I-3 : Analyse des fréquences

La détermination de la fréquence fondamentale est requise dans de nombreux domaines, par exemple, dans la reconnaissance de la parole, dans l'analyse des notes musicales, et, dans notre cas, la détermination de la fréquence fondamentale du signal rétrodiffusé par les insectes. Parfois, cette fréquence fondamentale n'est pas perçue à cause du phénomène de repliement de fréquence observé lorsque la fréquence du signal est supérieure à la fréquence de Nyquist. Dans cette partie, nous utilisons une méthode fondée sur la reconstruction de signaux en combinant la méthode basée sur la densité spectrale et celle de la statistique des moindres carrées.

Dans cette méthodologie, la densité spectrale de puissance  $P$  de la SEO est obtenue à partir de la Transformée de Fourier Rapide (TFR). Cette densité spectrale de puissance comprend trois contributions : la contribution du corps de l'insecte, l'harmonique fondamentale et les harmoniques supérieures du battement d'ailes de l'insecte. Une estimation initiale de la fréquence fondamentale  $f_0$  est obtenue en prenant la valeur médiane de la distance entre les pics du spectre de puissance. Les positions des pics dans le spectre de puissance sont identifiées avec le même principe que celui utilisé pour extraire les événements rares. Une opération morphologique est utilisée pour

réduire les valeurs appartenant à chaque pic en un point. La différence des médianes entre les positions de fréquence de ces points est définie comme la première estimation de la fréquence fondamentale  $f_{0init}$ .

L'estimation initiale  $f_{0init}$  de  $f_0$  est utilisée pour trouver la combinaison des harmoniques de battement d'ailes (multiples de  $f_0$ ) qui recréent le mieux le signal de la *SEO* original. Premièrement, la section efficace optique (*SEO*) des ailes,  $SEO_{ailes}$ , est isolé de la *SEO* totale, en soustrayant la contribution du corps,  $SEO_{corps}$ . La contribution du corps est obtenue en appliquant d'abord l'érosion sur la *SEO* puis un filtre gaussien avec une largeur égale à la période  $1/f_{0init}$ .

La *SEO* pour les battements d'ailes,  $SEO_{ailes}$  est ensuite exprimée comme une combinaison linéaire d'un ensemble d'harmoniques de base  $\psi_n = \sin(2\pi n f_{0init} t) + \cos(2\pi n f_{0init} t)$  (Eq. 37) :

$$SEO_{ailes} = \sum_n a_n \psi_n \quad \text{Eq. 37}$$

Pour trouver l'ensemble des coefficients,  $a_n$ , correspondant aux différentes harmoniques dans  $SEO_{ailes}$  le système d'équations linéaires Eq. 37 est résolu par la méthode des moindres carrés (Eq. 38) :

$$a_n = (\psi_n^T \psi_n)^{-1} \psi_n^T SEO_{ailes} \quad \text{Eq. 38}$$

Une fois que les coefficients  $a_n$  ont été trouvés, la *SEO* pour les ailes a été recréé en utilisant l'équation Eq. 37. Avant que les fonctions de bases harmoniques ne soient utilisées pour exprimer la *SEO* des ailes, elles sont additionnées avec la contribution du corps de l'insecte,  $SEO_{corps}$ .

Le signal de la *SEO* provenant des ailes est recréé sous la forme d'une combinaison linéaire de fonctions harmoniques pour des fréquences comprises dans un intervalle de bornes inférieure et supérieure égale à 30% de l'estimation initiale  $f_{0init}$  de  $f_0$ . Le résultat pour chaque fréquence est comparé à la *SEO* du signal de rétrodiffusion original, en utilisant un ajustement par moindres carrés (Eq. 39) :

$$\left| \frac{1}{N} \sum_0^N (SEO - SEO_{corps} - SEO_{ailes})^2 \right|_{min} \quad \text{Eq. 39}$$

La fréquence qui donne le meilleur ajustement est définie comme la fréquence fondamentale de battement d'ailes de l'insecte, et ses multiples sont définis comme les harmoniques supérieures [29,43].

#### I-4 : Résultats et discussion

Les figures 39 A et B ci-dessus présentent les densités spectrales de puissance de battement d'ailes (courbe en bleu) et du bruit rose (courbe en rose) des sections efficaces optiques temporelles de deux insectes. Les valeurs de la *DSP* de battement d'ailes inférieures aux valeurs de la *DSP* du bruit rose sont associées aux fréquences de bruit. Les points en rouge indiquent l'estimation initiale de la fréquence fondamentale (46 Hz ; 10 Hz). La valeur de la *DSP* associée à cette fréquence initiale est supérieure aux valeurs de la *DSP* du bruit rose. Cela indique que la fréquence fondamentale initiale n'est pas liée au bruit. L'harmonique de fréquence nulle est la composante constante de la densité spectrale de puissance. Cette composante constante représente la contribution du corps de l'insecte. Les fréquences fondamentales  $f_0$  qui ont permis de reconstruire respectivement les *SEO* des figures C, D ont été évaluées respectivement à 36 Hz et 8 Hz.

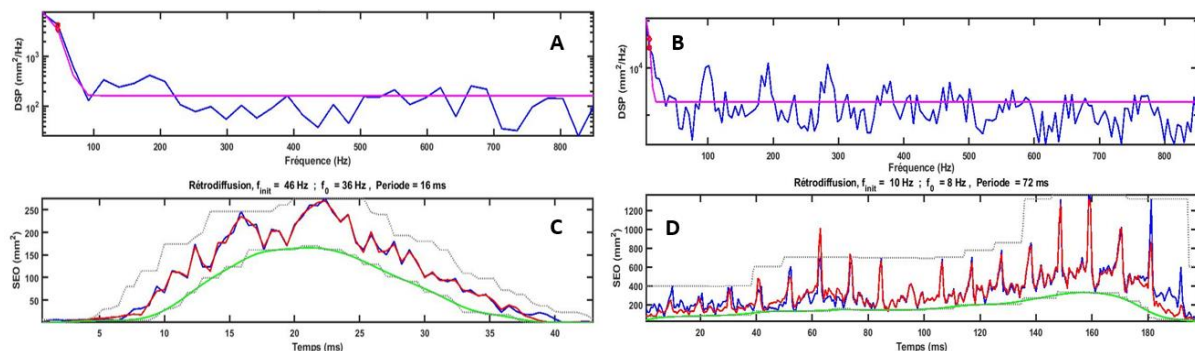


Figure 39: (A, B) Densité spectrale de puissance (*DSP*) ; (C, D) Section efficace optique temporelle (*SEO*).

Les graphes 40 et 41 représentent, après traitement, en utilisant la relation établie précédemment, l'abondance des spécimens interceptés en fonction du temps de détection en abscisse et de la distance de détection en ordonnée. L'ensemble nous donne une image que nous avons choisi de représenter en code de couleurs pour mieux rendre compte des dépendances spatio-temporelles. Le code de couleurs utilisé pour les figures 40 et 41 commence par le noir pour les valeurs minimales (nombre de spécimens) ; il évolue d'un rouge foncé vers un rouge plus clair au fur et à mesure que

le nombre de spécimens augmente et devient blanc pour les valeurs maximales en passant par une teinte jaune. Entre 14 :00 et 18 :00, nous observons une faible abondance d'insectes entre 100 m à 150 m. À partir de 200 m, l'abondance d'insectes est quasiment faible (Figure 41). Entre 18 :00 et 19 :00, nous observons une forte abondance d'insectes entre 50 m à 200 m (Figure 41) et entre 50 m et 400 m (Figure 40) du dispositif expérimental.

Ce dispositif est capable de faire une cartographie de la distribution des insectes dans leur milieu naturel, tout en les dénombrant, permettant ainsi des études prédictives.

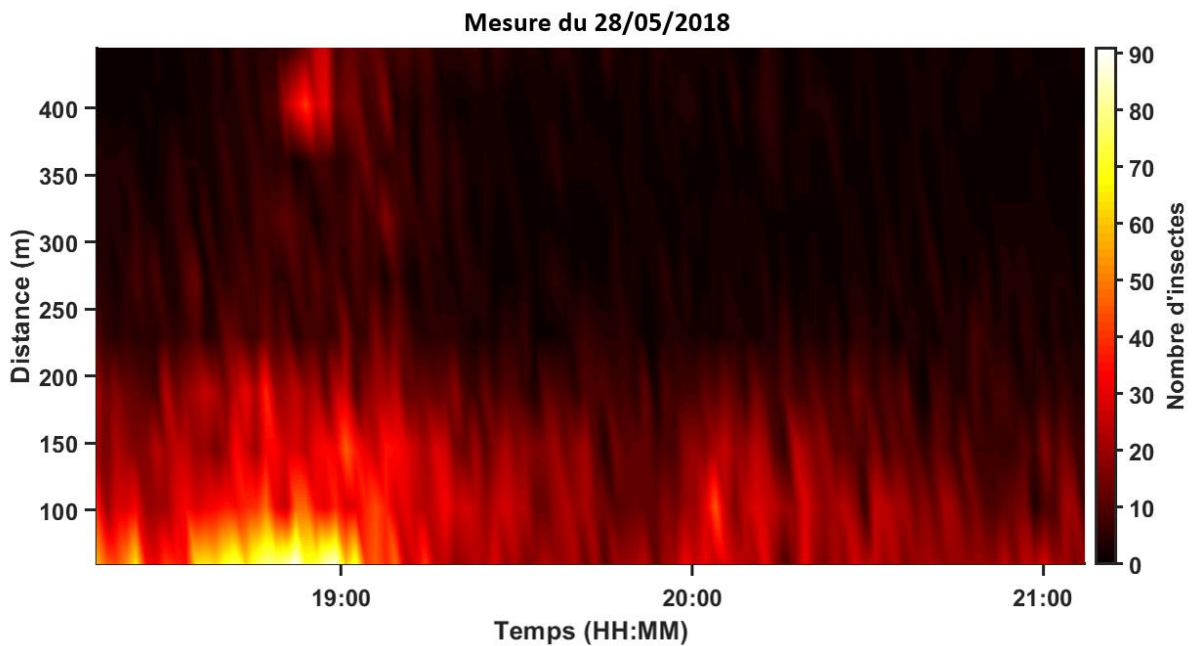


Figure 40 : Histogramme de distribution spatiale des insectes en fonction du temps. Mesure du 28/05/2018 entre 18 :00 et 21 :00.

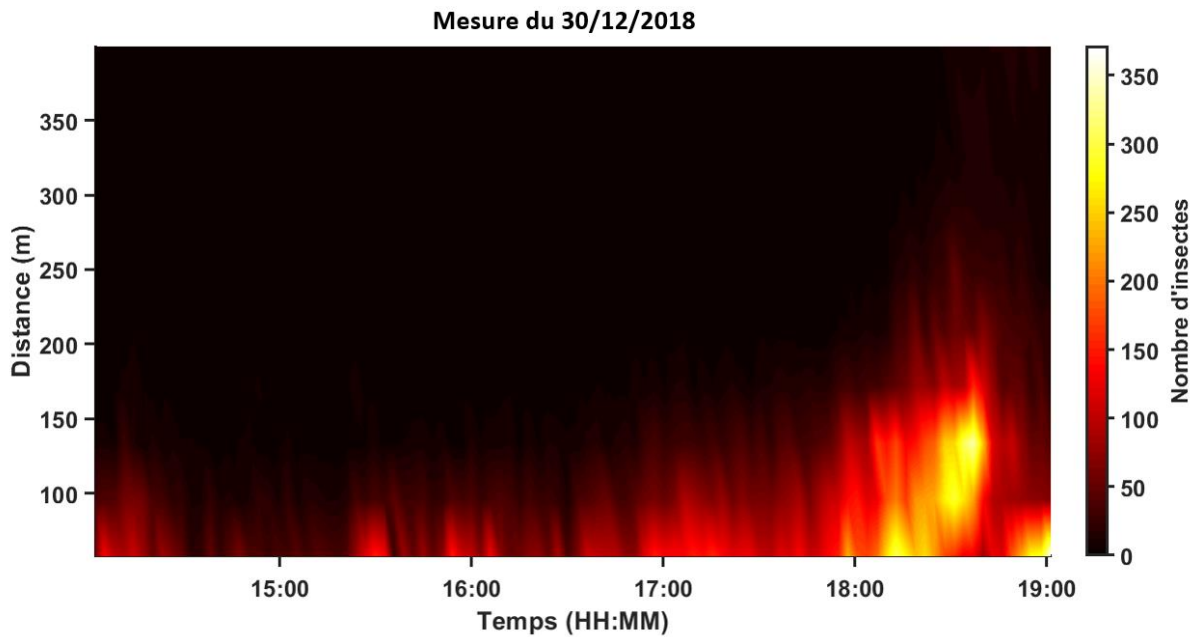


Figure 41: Histogramme de distribution spatiale des insectes en fonction du temps. Mesure du 30/12/2018 entre 14 :00 et 19 :00.

La Figure 42 et la Figure 43 sont les résultats issus des mesures du 28/05/2018 entre 18 :00 et 21 :00 et du 30/12/2018 entre 14 :00 et 19 :00 en utilisant la méthode de mesure et d'extraction des données présentées à la section I. Ces figures représentent la distribution de la section efficace en fonction du temps. La barre de couleurs verticale à l'extrême droite représente le nombre d'insectes. Lorsque la couleur tend vers le blanc, le nombre d'insectes est de plus en plus important. Lorsque la couleur tend vers le noir, le nombre d'insectes est de plus en plus faible. Nous constatons que, les insectes observés ont quasiment une taille comprise entre  $0,1 \text{ mm}^2$  et  $100 \text{ mm}^2$ . Les insectes de petites tailles seraient plus actifs de nuit que de jours.

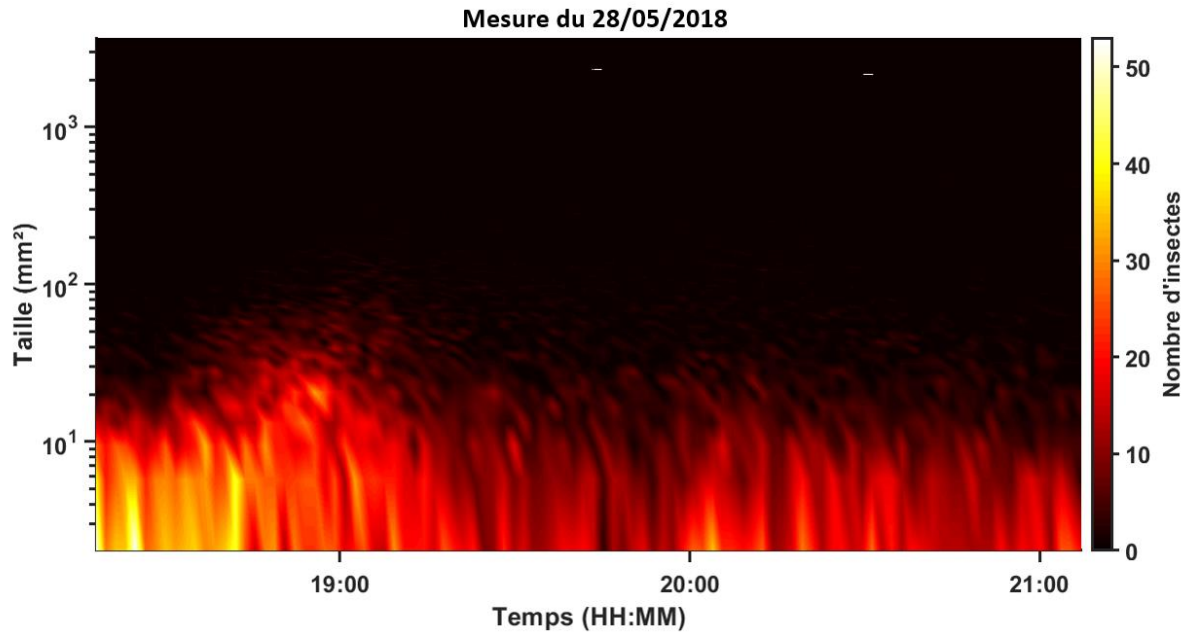


Figure 42 : Histogramme de distribution de la taille des insectes en fonction du temps. Mesure du 28/05/2018 entre 18 :00 et 21 :00.

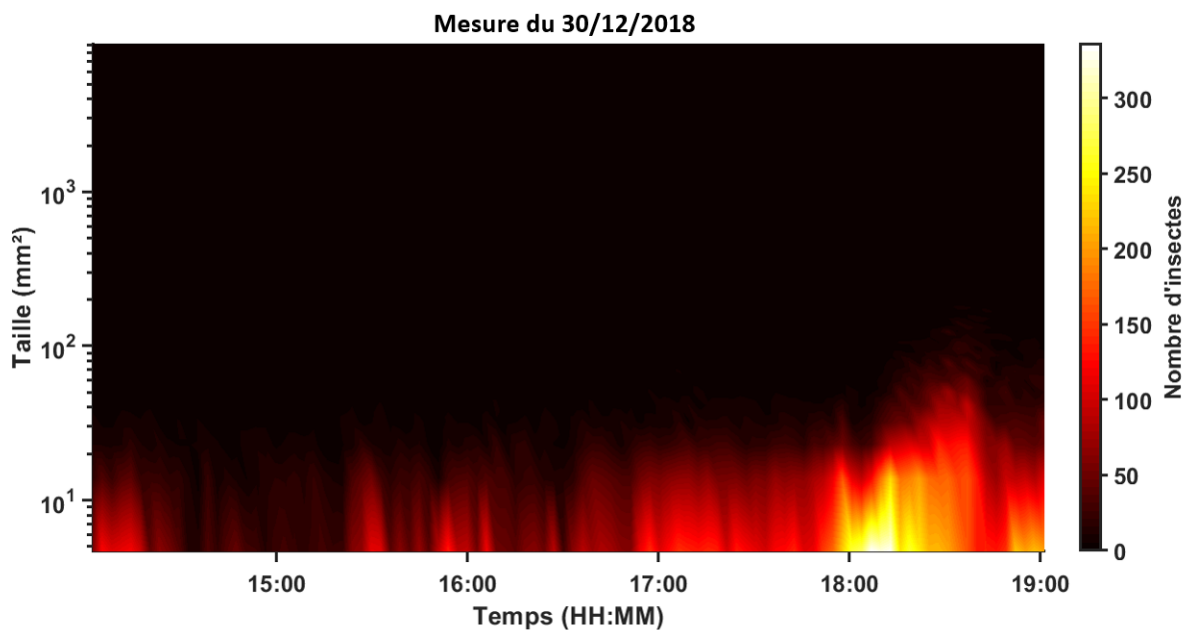


Figure 43 : Histogramme de distribution de la taille des insectes en fonction du temps. Mesure du 30/12/2018 entre 14 :00 et 19 :00.

La rétrodiffusion dans le temps de la lumière par un insecte fournit des informations sur la durée ou le temps de transition ( $\Delta t$ ) (voir Figure 44 d) de l'insecte dans le champ de vision (CV) du télescope, la taille de l'insecte, l'envergure du déploiement des ailes et la fréquence de battement des ailes de l'insecte (Figure 44). La Figure 44 (a, b) présente le déplacement de deux insectes dans la zone d'intérêt. La courbe en noire représente la contribution du corps de l'insecte (Figure 44 c, d) et la courbe en rouge

représente la section efficace de l'insecte qui comprend la contribution du corps de l'insecte et la contribution des ailes de l'insecte. Les différents pics représentent les différentes oscillations des battements d'ailes au cours du temps. L'écart entre deux pics successifs correspond à un cycle de battement.

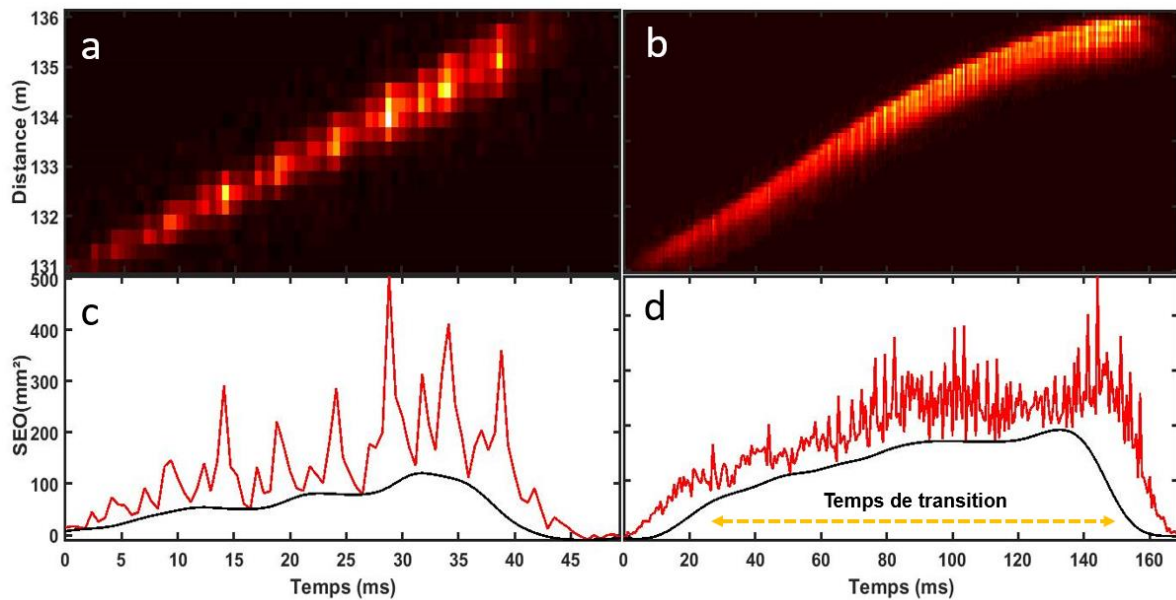


Figure 44 : (a, b) Déplacement temporel de deux insectes dans le champ de vision du télescope. (c, d) Évolutions temporelle de la SEO respectivement de ces deux insectes.

La SEO de l'insecte provient de deux contributions : la réflectance diffuse (diffusion incohérente) du corps (*CoCor*) et de l'aile (*CoAil*) de l'insecte et la réflectance spéculaire (diffusion cohérente) de l'aile de l'insecte. La réflectance spéculaire correspond aux pics importants dans le signal (Figure 45).

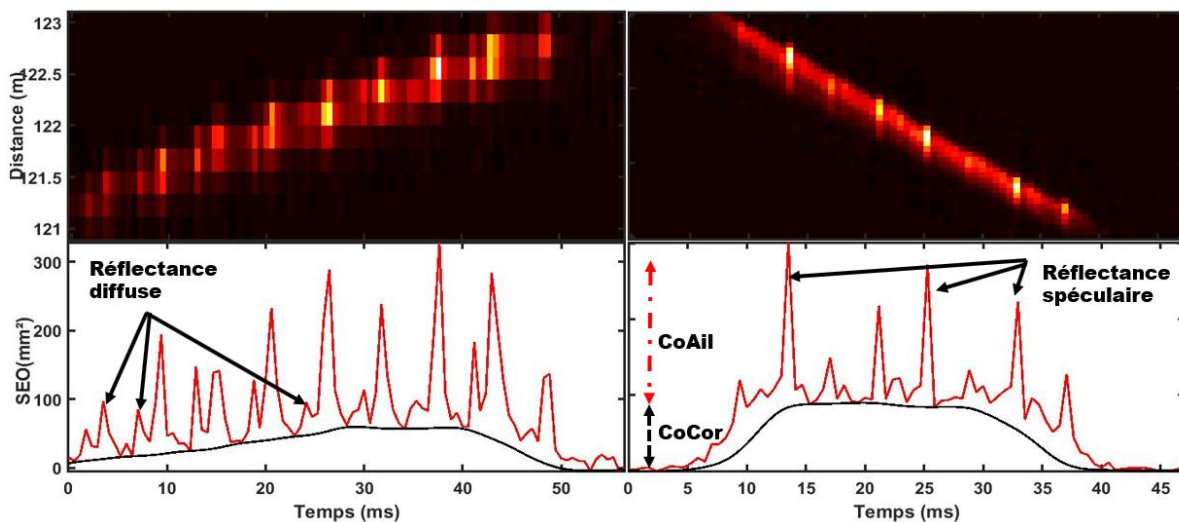


Figure 45: Déplacement temporel de deux insectes et leurs SEO temporelles respectives. La courbe en noire représente la contribution du corps de l'insecte (*CoCor*) évaluée en utilisant

*l'érosion suivi d'un filtre gaussien et les pics correspondent à la contribution de battement des ailes.*

La réflectance spéculaire des ailes, observée dans l'infrarouge (IR) fournit des informations sur l'interférence des franges spectrales de la membrane de l'aile. L'interférence pourrait être constructive ou destructive en fonction de l'indice de réfraction effectif du milieu, de l'épaisseur des ailes et de l'angle d'incidence de l'onde incidente.

Les pics les plus élevés correspondent à des orientations spécifiques de l'insecte lorsque la SEO est la plus grande. De même, les pics les plus bas correspondent à la SEO la plus basse. Cela signifie que chaque pic correspond à une orientation en fonction des différentes phases de battement d'ailes. La SEO oscille dans le temps en fonction de l'orientation de l'insecte dans le champ de vision du télescope. La variation de la SEO peut être paramétrée par un ensemble d'harmoniques. Le paramétrage de la SEO permet de déterminer la fréquence fondamentale de l'insecte ainsi que les autres harmoniques de battement des ailes (Figure 46) [17].

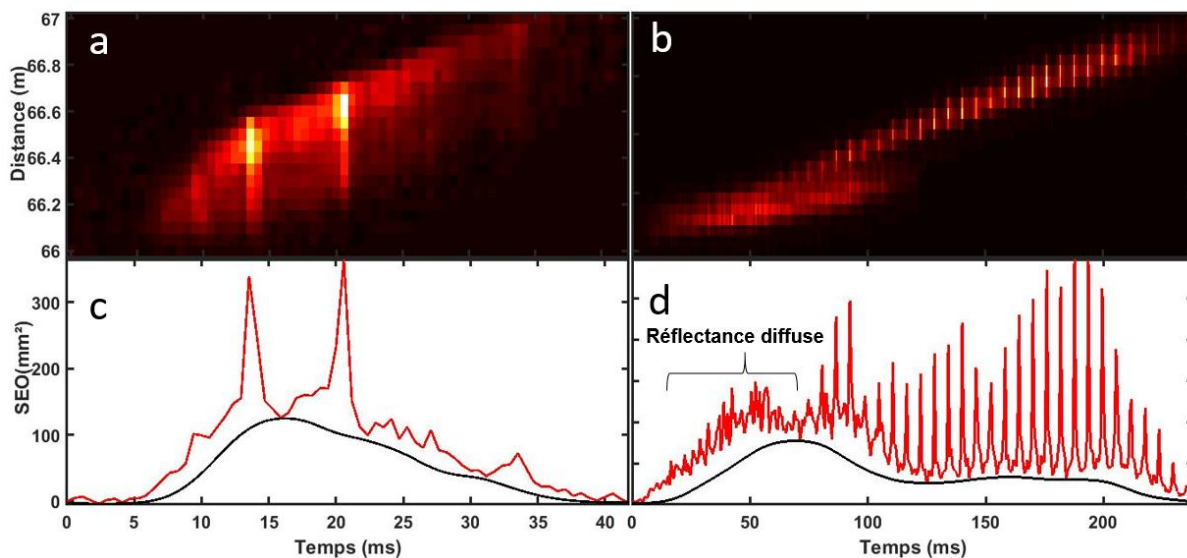


Figure 46 : Déplacement temporel et évolution temporelle de la SEO de deux insectes. Les pics importants entre 100 ms et 200 ms de la Figure 46 d avec une SEO relativement faible comparativement à la Figure 46 c expliquerait une élévation de l'amplitude de l'onde rétrodiffusée.

Les données engendrées par une mesure effectuée au cours d'une journée (24 :00) correspondent à un (1) téraoctet. Pour une étude qui exige une semaine complète (7 jours) de mesures, nous aurons sept (7) téraoctets de données.



Initialement, nous avons envisagé d'effectuer une analyse sur une année pour relier le comportement des spécimens aux paramètres météorologiques et aux saisons. Une telle mesure aurait produit des tailles de données de 360 téraoctets. Nous ne disposons pas d'espace de disques durs pouvant accueillir une telle taille de données. Nous avons donc, en lieu et place, d'une campagne sur une année, choisir de montrer les performances de la technique en identifiant des périodes caractéristiques de l'année et de la journée. Ainsi, nous avons choisi par exemple le mois de mai et le mois de février qui correspondent respectivement à des saisons pluvieuses et sèches dans la région de Yamoussoukro. Nous présentons ici quelques résultats issus des mesures du 12/05/2017, du 26/05/2017 et du 22/02/2018.

Les figures 47 à 49 présentent l'abondance des insectes au cours du temps. Les lignes horizontales observées montrent la présence d'un objet statique à environ 500 m du dispositif d'acquisition. Cet objet statique est le tableau noir en néoprène de réflectivité 4% qui rétrodiffuse l'intensité du laser. Cette intensité a servi de référence pour le calibrage de la section efficace optique. Chaque point lumineux représente un insecte qui a été intercepté par le faisceau incident du laser. En comparant les différentes observations, nous avons remarqué une forte présence d'insectes au coucher du soleil entre 18 :00 et 19 :00 (Figure 48) et au lever du soleil entre 06 :00 et 07 :00 (Figure 49).

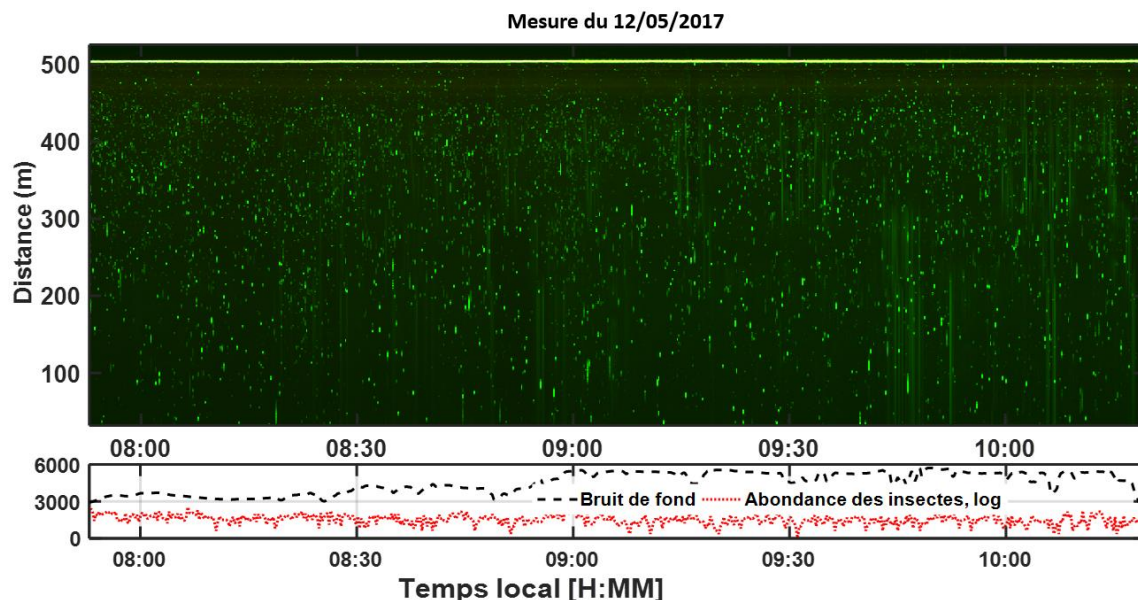


Figure 47 : Distribution géospatiale des insectes au cours de la matinée entre 08 :00 et 11 :00

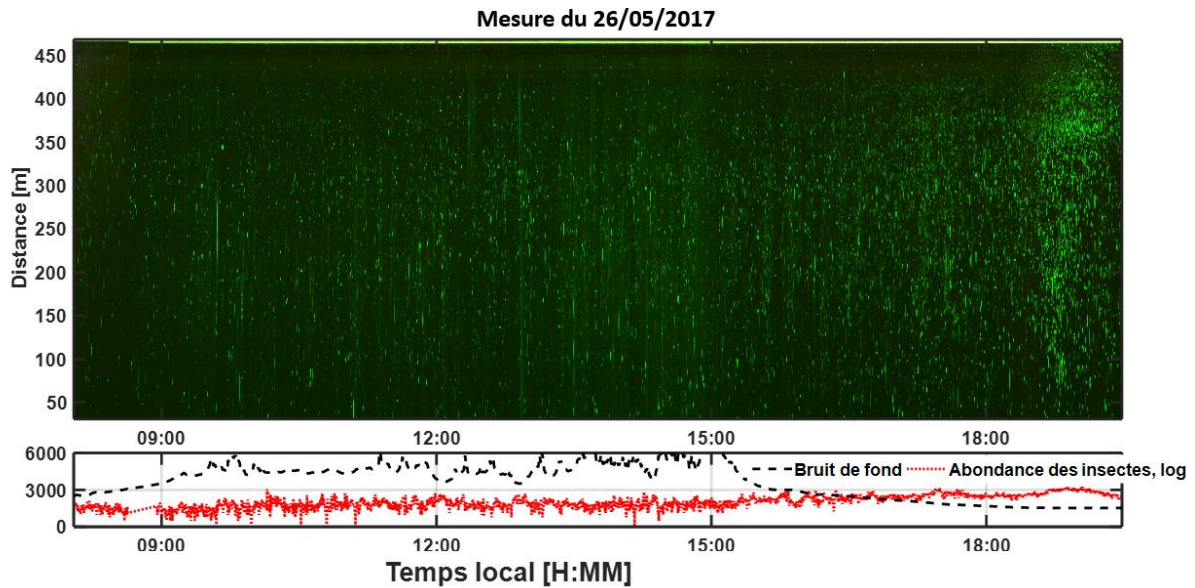


Figure 48 : Distribution géospatiale des spécimens volants entre 08:00 et 19:00

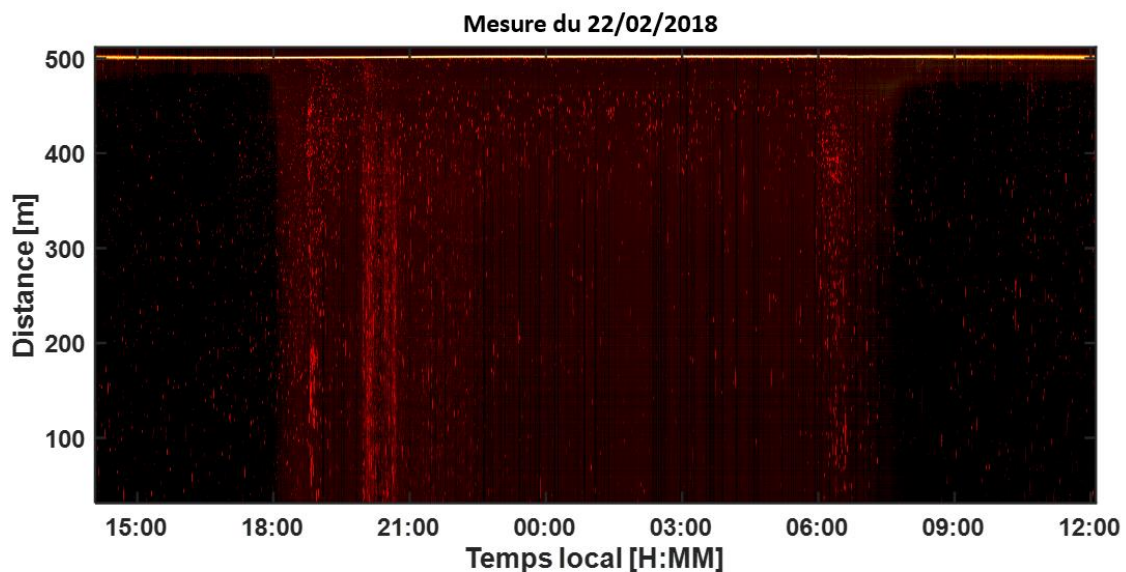


Figure 49 : Évolution de l'abondance des insectes en fonction du temps

Ce travail a permis de mettre en œuvre un dispositif de mesure active qui permet de détecter et de localiser les spécimens volants. Nous avons utilisé un détecteur linéaire de fréquence d'acquisition maximale de 4 kilohertz pour déterminer la fréquence de battement d'ailes rapides d'insectes comme les moustiques. Nous avons également développé de nouvelles techniques de mesure de la section efficace en utilisant la taille du faisceau laser comme référence. Nous avons également observé une activité importante des spécimens volants à l'aube et au crépuscule. Pour étudier le

comportant de ces derniers durant ce changement de temps, nous avons adjoint au dispositif de mesure active une station météo. Aussi, lorsque la section efficace de l'insecte ne contient pas plusieurs périodes de battement d'ailes, cela introduit des incertitudes dans l'évaluation de la fréquence fondamentale d'ailes de ces derniers. Dans la section suivante, nous proposons une alternative à l'évaluation de la fréquence fondamentale et des modèles mathématiques pour étudier le comportement des insectes en fonctions des conditions climatiques.

## II : Proposition de modèles pour le suivi et le contrôle de l'activité des insectes

Les techniques de caractérisations indirectes couramment utilisées pour identifier les insectes et évaluer leur abondance se fondent sur la détermination de la fréquence de battement de leurs ailes en utilisant l'analyse de Fourier. Le phénomène de repliement de fréquence est pratiquement observé dans les signaux des insectes de petites tailles à cause de la haute fréquence de battement de leurs ailes qui est parfois supérieure à la fréquence de Nyquist. Cela limite la plage de fréquences de détection de notre dispositif lidar et par conséquent le nombre d'insectes quantifiés n'est pas représentatif. Aussi, le comportement des insectes dépend en majorité de la température de leur milieu.

Dans ce manuscrit, il est question de proposer de nouvelles techniques d'évaluation du nombre d'insectes et de proposer une alternative à l'analyse spectrale pour évaluer la fréquence de battement d'ailes des insectes et ainsi les quantifier. Il est aussi question de l'étude de leur abondance en fonction des conditions météorologiques pour des études préventives.

Ce chapitre traite donc de l'ensemble des procédés mis en œuvre pour déterminer l'abondance des espèces d'insectes en vol, étudier leur comportement en fonction de la météo et déterminer la fréquence de battement de leurs ailes dans le domaine temporel.

Il comportera trois parties indispensables :

- La technique d'analyse statistique et spectrale ;
- L'évaluation de la fréquence de battement d'ailes des insectes dans le domaine temporel ;
- La modélisation de l'abondance des insectes en fonction de la température et de l'humidité.

## II-1 : Analyse statistique et spectrale

Dans ce travail, nous avons proposé une méthodologie de dénombrement et d'identification d'espèces d'insectes à partir du spectre de modulation de fréquence de battement des ailes.

Dans la méthodologie proposée, nous avons déterminé et regroupé les temps de transition de toutes les observations d'insectes. La Figure 50 montre l'histogramme de probabilité des temps de transition.

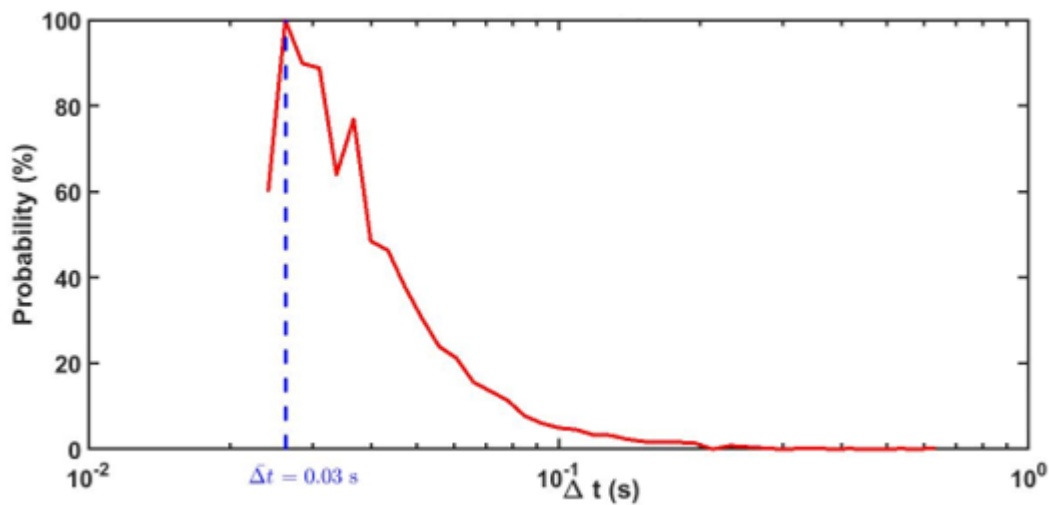


Figure 50 : Histogramme de probabilité de temps de transition. Le temps modal de transition des insectes dans le volume défini par le faisceau laser est d'environ  $(\Delta t) = 30 \text{ ms}$

À ce stade, avant l'application de l'analyse de la transformée de Fourier (*FFT*), nous avons déterminé le nombre de segments à utiliser en multipliant le mode de temps de transition par la fréquence d'échantillonnage. Les 80% du nombre de segments déterminé sont utilisés dans le calcul de la transformée de Fourier, cela nous a permis d'avoir la même longueur du spectre de modulation de battement d'ailes des insectes. Ensuite, nous avons calculé la densité spectrale de battement d'ailes de chaque insecte pour lequel la longueur des segments des signaux est supérieure ou égale à la longueur de segment utilisée pour le calcul de la *FFT* (Figure 51), puis nous les avons normalisées pour la classification hiérarchique.

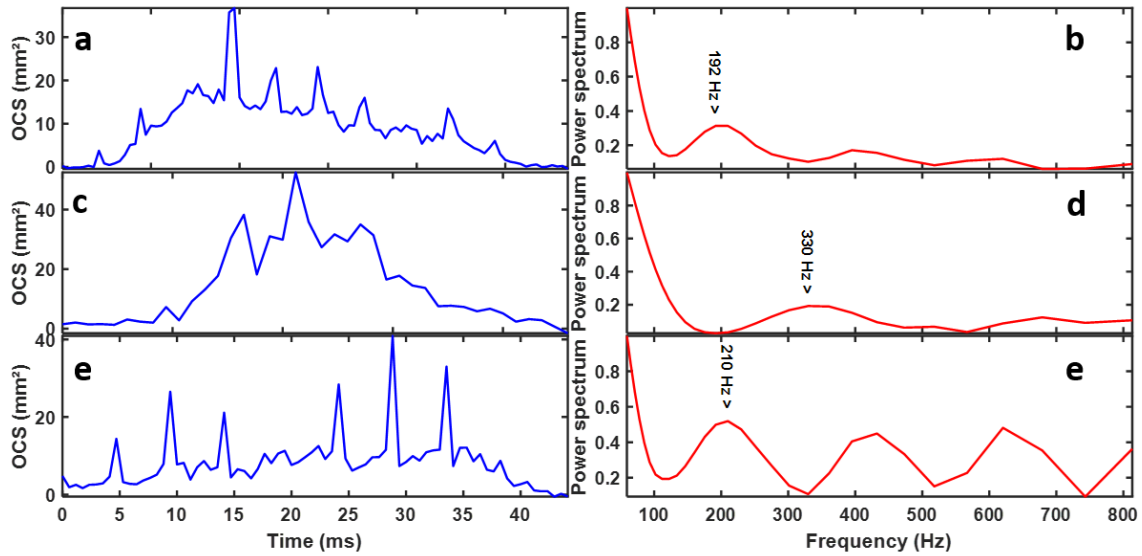


Figure 51: (a, c, e) Section efficace de trois insectes en fonction du temps. (b, d, f) Densités spectrales de battement d'ailes respectivement des insectes observés à la figure 6- a, c, e.

Dans l'analyse par classe, l'étape critique consiste à évaluer le nombre approprié de classes. De nombreux critères de décision fondés sur la connaissance de la partition des données et des informations intrinsèques de la géométrie de la structure de données ont été utilisés [42,51,71–73]. Dans la présente étude, le nombre de classes (clusters) a été évalué à l'aide d'une méthode de détection efficace du "point du genou" proposée par Zagarous. Cette méthode de détection du "point du genou" est appelée L-méthode. La L-méthode est utilisée indépendamment de l'algorithme de classification. C'est son principal avantage. La méthodologie de la L-méthode consiste en un graphique d'évaluation. Ce graphique contient sur l'axe des x le nombre de groupes et sur l'axe des y les valeurs de l'indice de validité (ici la distance euclidienne). Chaque point est présumé être un "point du genou" probable. De part et d'autre du point, à gauche (L) et à droite (R), toutes les paires possibles d'ajustements linéaires sont créées (Figure 52). L'erreur quadratique totale est calculée en fonction du nombre de classes appropriées ( $\alpha$ ), et du nombre total maximal de classes ( $\beta$ ) fixé arbitrairement à 1000. Les paires d'ajustement linéaire qui minimisent la racine carrée de la moyenne de l'erreur quadratique totale (Eq. 40) sont évaluées en tant que paire d'ajustement linéaire appropriée de la monotonie de la courbe. Le nombre approprié de classes est déterminé par le minimum de l'erreur quadratique totale définie par l'équation Eq. 40 [74–78]:

$$RMSE_T = \frac{\alpha-1}{\beta-1} rmse_L + \frac{\beta-\alpha}{\beta-1} rmse_R \quad \text{Eq. 40}$$

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des variables

Variables	Signification
$\alpha$	Projection verticale sur l'axe des abscisses des discontinuités de L et R
$\beta$	Nombre maximum de classes (Clusters)
$RMSE_T$	Somme des erreurs quadratique moyenne
$rmse_L$	Erreur quadratique moyenne des ajustements des point de gauche
$rmse_R$	Erreur quadratique moyenne des ajustements des points de droite

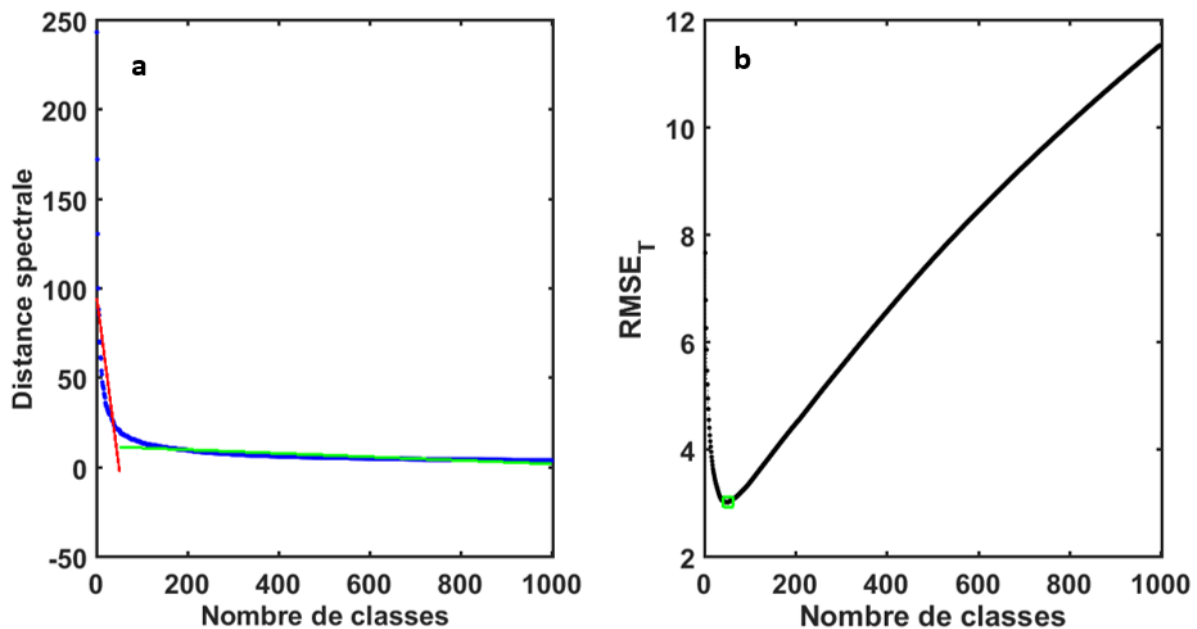


Figure 52 : Évaluation du nombre de classe. (a) Mesure d'évaluation en fonction du nombre de classes. La métrique utilisée dans cette étude est la distance euclidienne. Le nombre maximal de classes est défini de manière arbitraire par 1000. Les deux droites représentent les meilleurs ajustements possibles pour les jets de données de gauche et de droite. Ce graphique montre une limite de décision entre le nombre de clusters appropriés. (b) Erreur de la racine carrée par rapport au nombre de classes. Le meilleur nombre de classes est donné par la valeur minimale du RMSE. Dans cette étude, le nombre de classes appropriées est 51.

Après avoir déduit le nombre de groupes, toutes les densités de spectres de puissances ont été regroupés en fonction de la similarité entre les différentes espèces. La Figure 53 présente le dendrogramme des 51 groupes ou familles d'insectes. Les centroïdes de chaque groupe spectral et la taille des insectes associés à la classe centrale a été trouvée. La fréquence fondamentale de chaque groupe de centroïdes a été comparée à la fréquence de battement d'ailes des insectes dans [26,47,79] avec un intervalle de confiance d'un dixième pour cent pour une identification automatique des espèces. Cette base de données couvre environ 160 familles d'espèces. Lorsque la fréquence observée ne correspond à aucune fréquence de cette base de données, l'insecte est nommé « Battement rapide » si la pulsation est supérieure à 100 Hz, sinon, il est nommé « Battement lent ».

La figure 54 représente le spectre de modulation de battement de chacune des 51 espèces d'insectes détectés. Les losanges indiquent la fréquence fondamentale de battement d'ailes des insectes. Les signes « + » et « x » indiquent respectivement le deuxième et le troisième harmonique. La fréquence fondamentale est spécifique à chaque espèce d'insecte. Elle permet de les discriminer. Des études ont été effectuées par certains chercheurs pour déterminer la fréquence de battement d'ailes de certains insectes. Pour l'abeille, par exemple, la fréquence de battement de ces ailes est autour de 200 Hz. Cet insecte présente un intérêt particulier pour les entomologistes car il fait partie des agents pollinisateurs des plantes. Des familles d'abeilles ont été identifiées dans les classes C10, C42-44. La classe C19 est présumée être des moustiques males (~ 600 Hz).



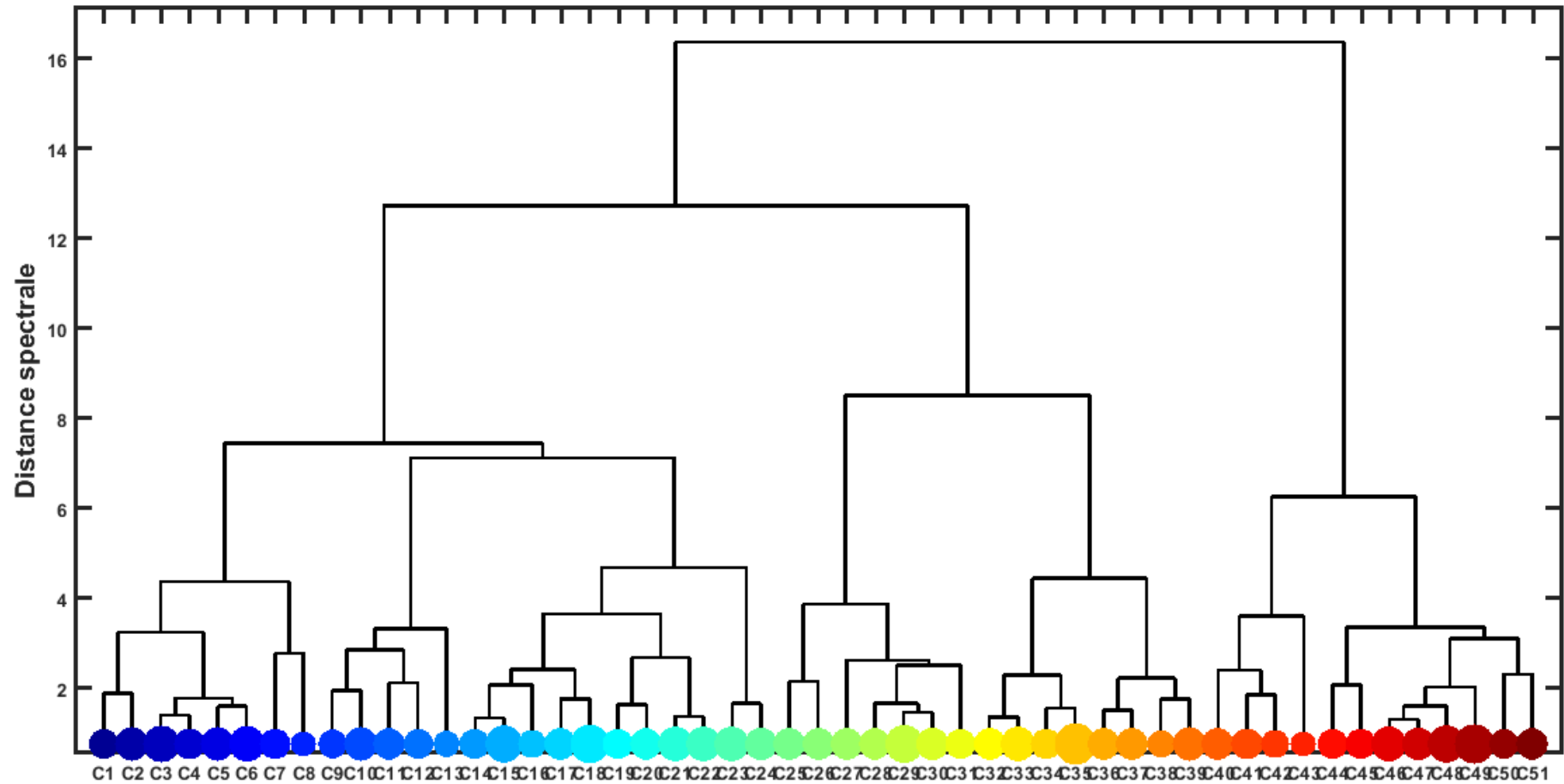


Figure 53 : Distance euclidienne entre chaque groupe. Le dendrogramme montre la ressemblance entre chaque insecte. 51 groupes d'espèces ont été identifiés.

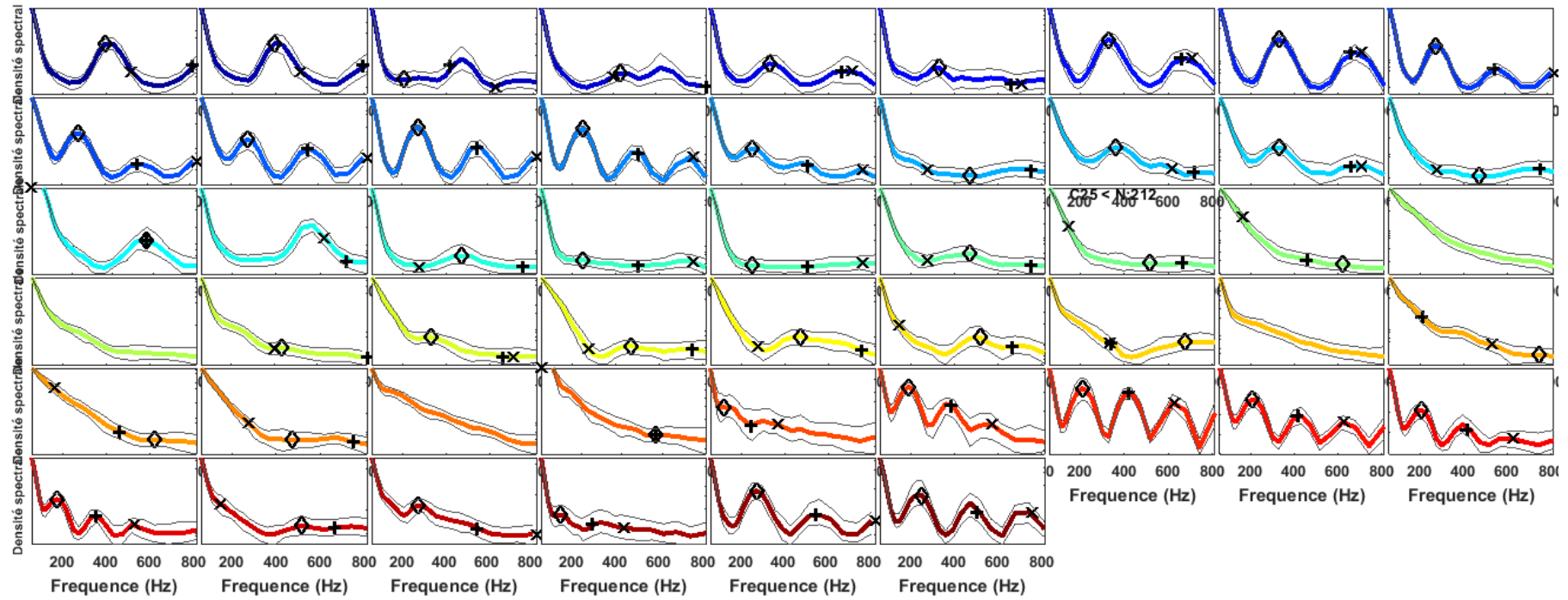


Figure 54 : Toutes les observations groupées en 51 classes.

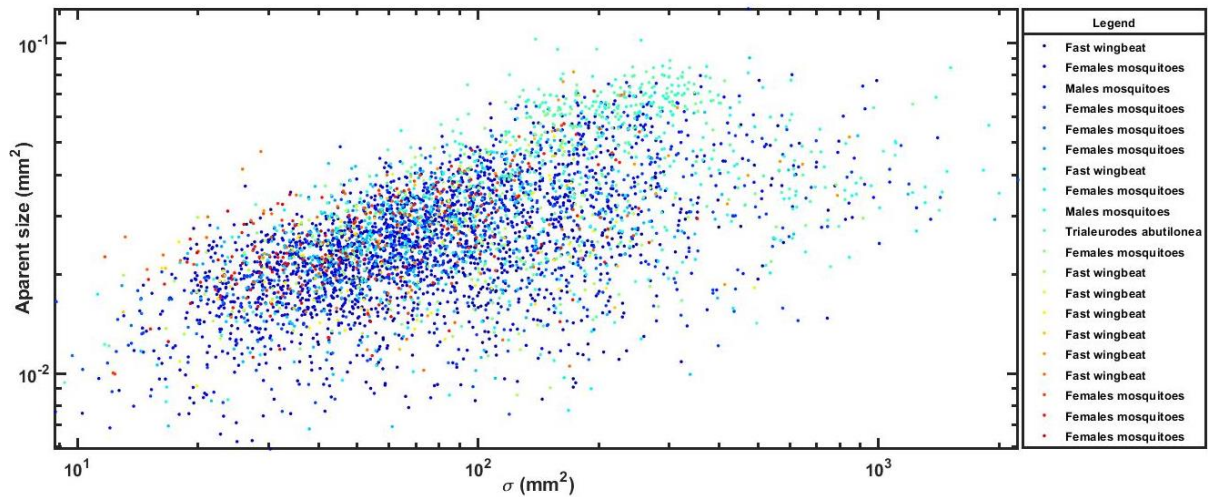


Figure 55 : Section efficace apparente en fonction de la section efficace.

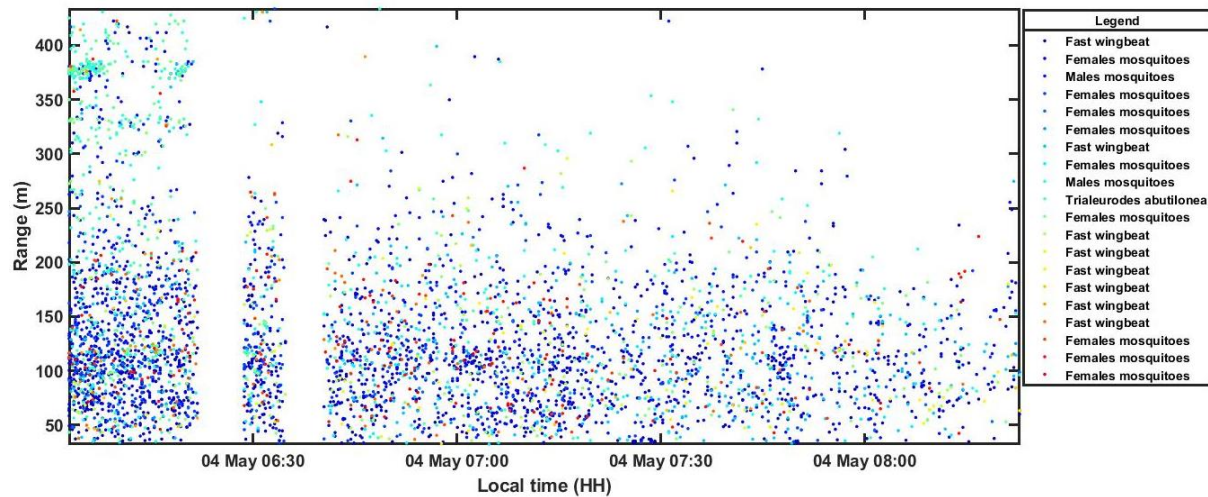


Figure 56 : Distribution spatio-temporelle des insectes

La densité spectrale de battement d'ailes des insectes et associée à l'analyse en composantes principales peuvent être utilisées pour évaluer les activités des insectes en temps réel. Cette instrumentation peut également être utilisée comme outil d'aide à la décision par les entomologistes afin de décider à quel moment ils peuvent utiliser des pesticides et des insecticides afin de lutter contre les parasites et les vecteurs de maladies.

## II-2 : Estimation des fréquences fondamentales

La caractérisation et la classification des insectes nuisibles et des insectes pollinisateurs sont parmi les principaux défis rencontrés en entomologie lidar. La caractérisation et la classification peuvent être effectuées grâce à une détermination précise de la fréquence de battements d'ailes des insectes. Les méthodes utilisées pour la

détermination de la fréquence de battement d'ailes des insectes sont souvent mises en œuvre en utilisant une méthode spectrale via la transformée de Fourier rapide (*FFT*) ou la transformée de Fourier discrète (*DFT*) de la section efficace temporelle de battement d'ailes de l'insecte. Dans ce travail, nous avons proposé une analyse alternative en utilisant une méthode temporelle à partir de l'autocorrélation en conjonction avec la série de Fourier pour estimer la fréquence fondamentale de battement d'ailes d'insectes et paramétrer le signal de la section efficace [80].

Dans notre méthodologie, nous avons supposé que le signal de rétrodiffusion  $\sigma_{event}(t)$  se divise en deux parties : la première partie est due à la contribution du corps et des ailes  $\sigma_s(t)$  de l'insecte, tandis que la seconde partie  $b(t)$  est due au bruit (Eq. 41).

$$\sigma_{event}(t) = \sigma_s(t) + b(t) \quad \text{Eq. 41}$$

La fonction d'autocorrélation  $\sigma_{autocorr}$  de la série temporelle de rétrodiffusion  $\sigma_{event}(t)$  sur une durée de transition  $\Delta t$  correspondant au temps que met l'insecte pour traverser le volume décrit par la source laser incidente est donnée par l'équation Eq. 42 :

$$\sigma_{autocorr}(\tau) = \sum_{t=-\Delta t/2}^{\Delta t/2} \sigma_{event}(t) * \sigma_{event}(t - \tau) \quad \text{Eq. 42}$$

Puisque  $\sigma_s(t)$  et  $b(t)$  sont indépendants, l'autocorrélation entre les deux signaux est égale à zéro. L'autocorrélation du bruit est également nulle. La combinaison des équations Eq. 41 et Eq. 42 aboutit à l'équation Eq. 43 qui définit la fonction d'autocorrélation du signal périodique.

$$\sigma_{autocorr}(\tau) = \sum_{t=-\Delta t/2}^{\Delta t/2} \sigma_s(t) * \sigma_s(t - \tau) \quad \text{Eq. 43}$$

où  $\tau$  est le décalage horaire

Avec cette méthode, il n'est pas possible de déterminer la composante de phase et de reconstituer ensuite le signal de rétrodiffusion. Pour cela, nous avons combiné cette technique avec la décomposition en série de Fourier de la section efficace temporelle de l'insecte pour reconstruire le signal.

Dans cette méthodologie, nous avons isolé la section efficace optique (*SEO*) des ailes ( $\sigma_{wings}$ ) (Figure 57 a) de la *SEO* total ( $\sigma_{event}$ ) en soustrayant la contribution du corps,  $\sigma_{body}$  (Figure 57 c). La contribution du corps a été obtenue en appliquant une érosion avec une fenêtre rectangulaire sur le signal de rétrodiffusion  $\sigma_{event}$ , puis un filtre gaussien.

Ensuite, nous avons calculé la fonction d'autocorrélation normalisée  $ACF$  du signal de rétrodiffusion  $\sigma_{wings}$  des ailes (Figure 57 b) en fonction du décalage horaire. La valeur maximale de cette fonction est centrée sur zéro. Cela révèle que la  $SEO$  de battement d'ailes de l'insecte est un signal périodique en raison de la modulation de battement des ailes de l'insecte. Nous avons évalué la période en divisant l'indice de décalage temporel moyen de tous les pics de la fonction d'autocorrélation par la fréquence d'échantillonnage. À ce stade, nous avons obtenu une première estimation de la fréquence fondamentale  $f_{init}$ . Cette valeur initiale de la fréquence fondamentale, nous l'avons utilisée pour trouver la combinaison d'autres harmoniques qui recrée la série temporelle de rétrodiffusion  $\sigma_{event}$  avec le meilleur résidu ( $BestRes$ ) et le meilleur ratio des normes du signal original et du signal estimé ( $BestRsN$ ).

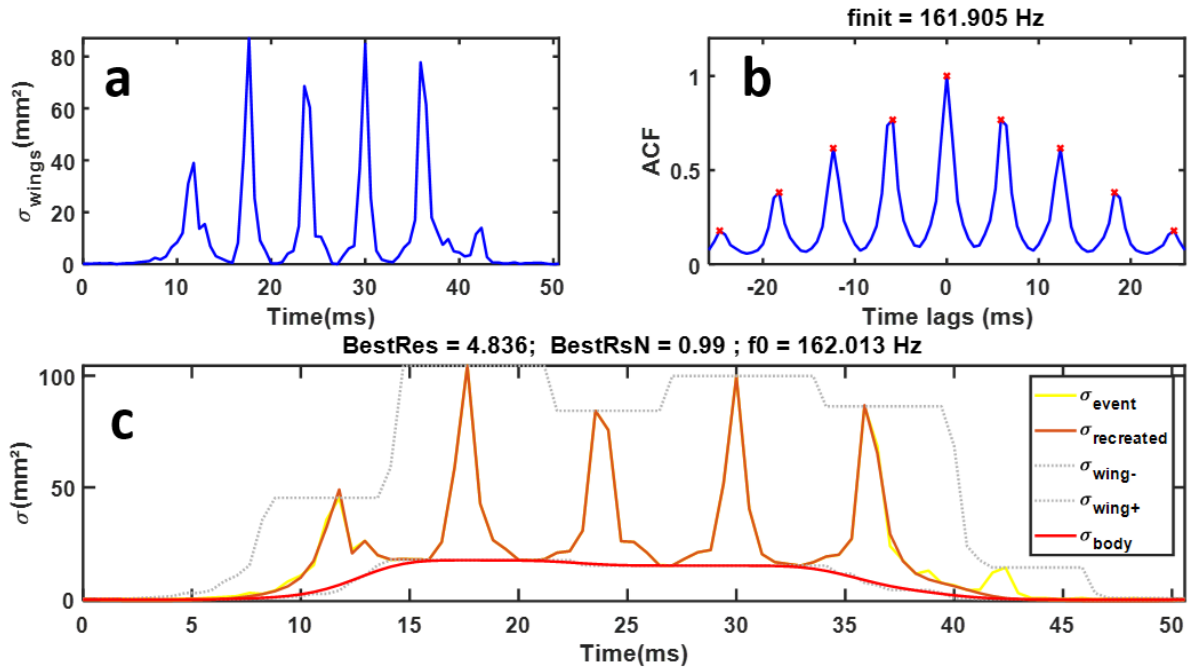


Figure 57: (a) Section efficace temporelle de battement. (b) Fonction d'autocorrélation normalisée en fonction du décalage horaire. (c) Signal de la section efficace optique

La  $SEO$  de battement d'ailes,  $\sigma_{wings}$  a été exprimée sous la forme d'une combinaison linéaire d'un ensemble d'harmoniques (Eq. 44) :

$$\sigma_{wings} = a_0 + \sum_{n>0} a_n \cos(2\pi nft) + b_n \sin(2\pi nft) \quad \text{Eq. 44}$$

Pour trouver tous les coefficients,  $a_0$ ,  $a_n$  et  $b_n$  associés aux différentes harmoniques dans  $\sigma_{wings}$ , l'équation linéaire Eq. 44 a été réécrite sous la forme matricielle (Eq. 45) et a été résolue par la méthode des moindres carrés :

$$\sigma_{wings} = \begin{pmatrix} 1 & \cos(2\pi ft) & \sin(2\pi ft) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(2\pi nft) & \sin(2\pi nft) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_n \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 45}$$

Une fois que les coefficients  $a_0$ ,  $a_n$  et  $b_n$  ont été déterminés, la *SEO* des ailes a été recréée à l'aide de l'équation Eq. 44. Les fonctions de base des harmoniques d'ailes ont été ajoutées à la contribution du corps de l'insecte  $\sigma_{body}$ .

Le signal de la *SEO* des ailes a été recréé sous la forme d'une combinaison linéaire de fonctions harmoniques pour les fréquences comprises entre 0,60% et 0,30% de l'estimation initiale  $f_{init}$  de la fréquence.

Le résultat de chaque fréquence a été comparé à la *SEO* de la *SEO* originale,  $\sigma_{event}$ , à l'aide de la méthode des moindres carrés ;

La fréquence qui donne le meilleur ajustement minimise le résidu (Eq. 46) et maximise le ratio de la norme carrée (*RsN*) (Eq. 47) du signal original et du signal recréé. Cette fréquence particulière a été définie comme la fréquence fondamentale du signal.

$$residue = \left| \frac{1}{N} \sum_0^N (\sigma_{event} - \sigma_{body} - \sigma_{wings})^2 \right|_{min} \quad \text{Eq. 46}$$

$$RsN = \left\| \frac{\sigma_{recreated}}{\sigma_{event}} \right\|_{max} \quad \text{Eq. 47}$$

L'inventaire de l'abondance temporelle des insectes en vol libre est un besoin important pour l'entomologiste. Ce paramètre peut aider à décider à quel moment les pesticides peuvent être utilisés sous un seuil afin de préserver les populations de pollinisateurs. La Figure 58 et la Figure 59 illustrent une distribution temporelle des insectes qui ont intercepté le volume sondé à différentes périodes de la mesure. Chaque couleur est associée à une fréquence fondamentale de battements des ailes des insectes, comme indiqué par la barre de couleurs en haut des figures (Figures 58 et 59). Au coucher du soleil, vers 18 heures et demie, nous observons une forte densité d'insectes qui ont interceptés le volume sondé. Leur nombre diminue au cours de la nuit (Figure 58). Au coucher du soleil, deux types d'insectes peuvent être rencontrés,

les insectes diurnes et les insectes nocturnes. Les insectes diurnes seraient de retour dans leurs gîtes et couverts. Parmi ces insectes il y'a certains insectes pollinisateurs tels que les papillons (fréquence  $\sim 200$  Hz), les moucherons (fréquence de battement des ailes  $\sim 100$  Hz). Parmi les insectes nocturnes, les moustiques sont identifiés par la fréquence de battement de leurs ailes entre 400 Hz à 500 Hz pour les femelles et 500 Hz à 600 Hz pour les mâles (Figure 58 et Figure 59). Les sous-figures des Figure 58 et Figure 59 présentent un histogramme logarithmique des activités des moustiques qui diminue pendant la nuit. Cela peut s'expliquer par leur déplacement probable vers la ferme (Figure 60) à proximité du site de mesure, où ils pourraient trouver des animaux à sang chaud pour nourriture. Après la pluie, l'humidité augmente et les activités nocturnes des insectes augmentent également (Figure 59) [81–83].

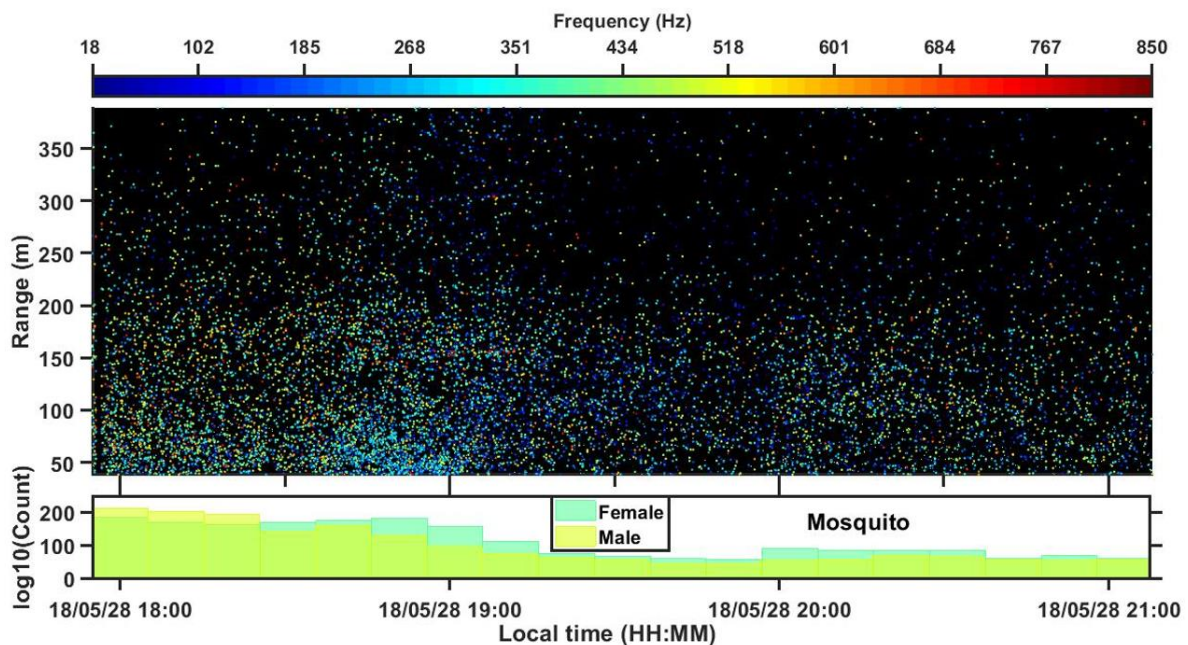


Figure 58: Répartition temporelle de l'abondance des insectes. La couleur des points est associée à la fréquence fondamentale de battement d'ailes des spécimens, comme indiqué par la barre de couleur en haut de la figure. La sous-figure, en bas, affiche l'historgramme logarithmique de l'abondance des moustiques. Mesure du 28/05/2018

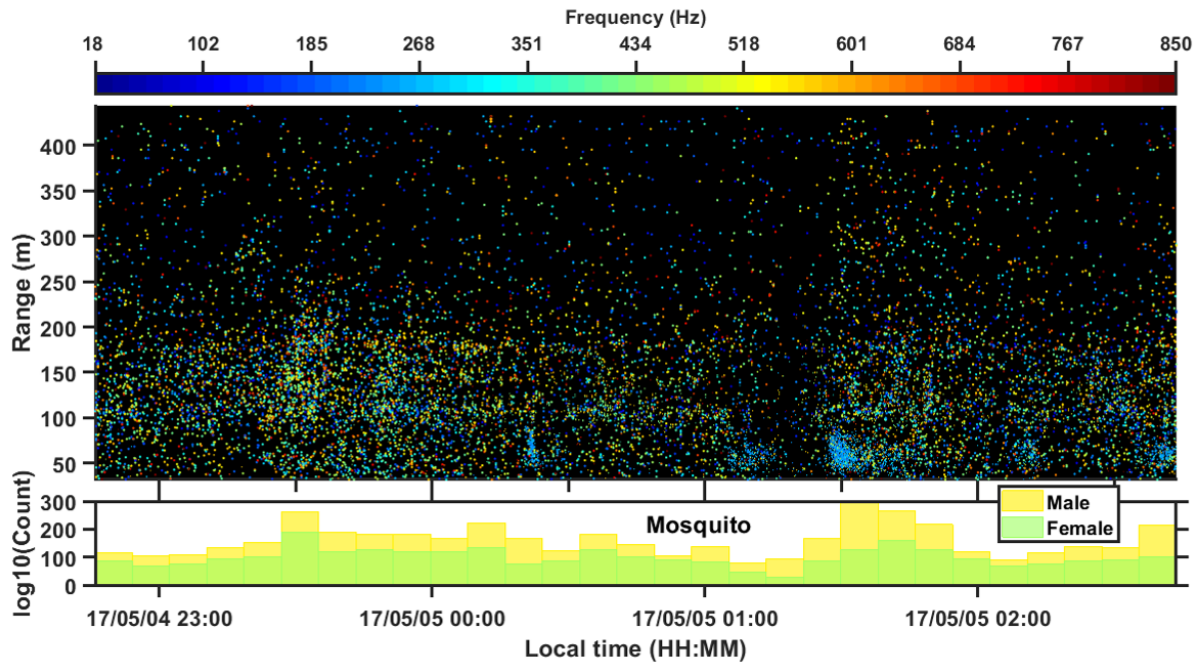


Figure 59: Répartition dans le temps de l'abondance des insectes. Cette carte montre l'abondance des insectes nocturnes. Mesure du 17/05/05. La mesure a commencé après la pluie.

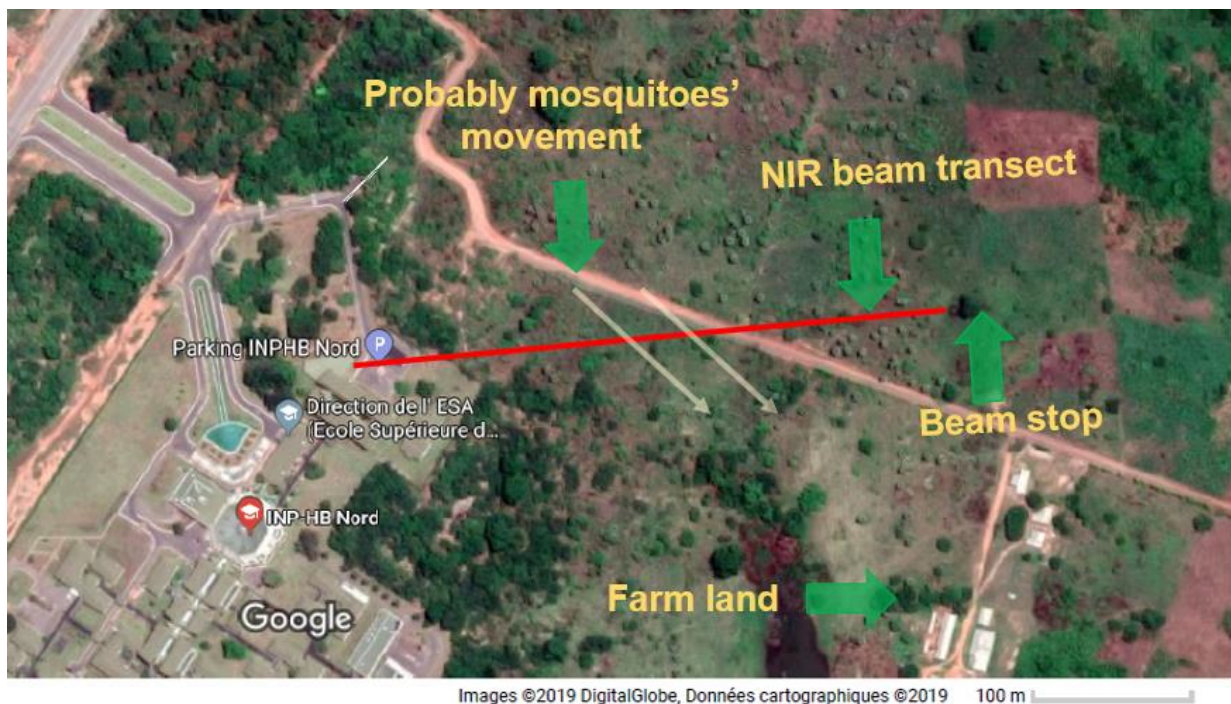


Figure 60 : Vue aérienne du site de mesure à partir de Google Map.

Le bref temps de transition des insectes dans le volume sondé influence la précision de l'application de la *FFT* pour évaluer la fréquence fondamentale de battement des ailes des insectes. De plus, la plupart des insectes sont petits et l'intensité rétrodiffusée par ces derniers est sujette au bruit. Une source incidente cohérente a été modulée pour



réduire l'effet du bruit. Cela a réduit également de moitié la fréquence d'échantillonnage. Aussi, le critère de Nyquist réduit la résolution fréquentielle lors de l'analyse par la transformée de Fourier.

Cette étude a montré qu'il est possible d'avoir une bonne résolution fréquentielle du dispositif expérimental en faisant une analyse temporelle pour déterminer la fréquence fondamentale de battement d'ailes des insectes. L'écart entre la fréquence dérivant de l'autocorrélation et la fréquence obtenue après reconstruction du signal est de 0,6% de la fréquence initiale.

### **II-3 : Estimation des effets des paramètres météorologiques**

Dans ce paragraphe, nous avons investigué la corrélation entre l'abondance des insectes et les paramètres météorologiques en utilisant la méthode des moindres carrées et la méthode des réseaux de neurones. L'idée est de proposer un modèle mathématique qui permettrait de prévoir l'abondance des insectes en fonction des données de la météo pour mener une lutte en amont contre les insectes volants nuisibles.

#### **II-3-1 : Évolution temporelle de l'abondance des insectes en fonction de la température et de l'humidité**

L'évaluation de l'abondance des insectes en fonction des données météorologiques est un paramètre important en entomologie. La figure 61 présente l'histogramme thermohumidité de l'évolution temporelle par minute de l'abondance des insectes au cours de la période du 4 au 5 février 2018 et celle présentée à la figure 62 représente l'histogramme thermohumidité de l'abondance des insectes au cours de la période du 22 au 23 février 2018. Dans l'intervalle de 17 :00 à 00 :00, le taux d'humidité augmente avec une observation moyenne de 130 insectes par minutes. L'humidité favoriserait alors la prolifération des insectes qui ont une faible température corporelle. On parle d'insectes poïkilothermes. À partir de 00 :00, lorsque l'humidité atteint un certain seuil (80%), la température devient minimale (25°C). Le nombre d'observation diminue. Cela présagerait d'un seuil de prolifération thermohumidité des insectes. Au lever du soleil, le nombre d'observation croît avec une hausse de la température qui induit une baisse du taux d'humidité. Les insectes observés pendant le jour sont des insectes diurnes. Ils ont besoin des rayonnements solaires pour réchauffer la température de

leur corps pour leur survie. Ces insectes sont connus sous le nom d'insectes ectothermes. Les insectes poïkilothermes sont nocturnes tandis que les insectes ectothermes sont diurnes. La modélisation de l'abondance des insectes en fonction des conditions météorologiques et du temps peut aider à prévoir leur abondance.

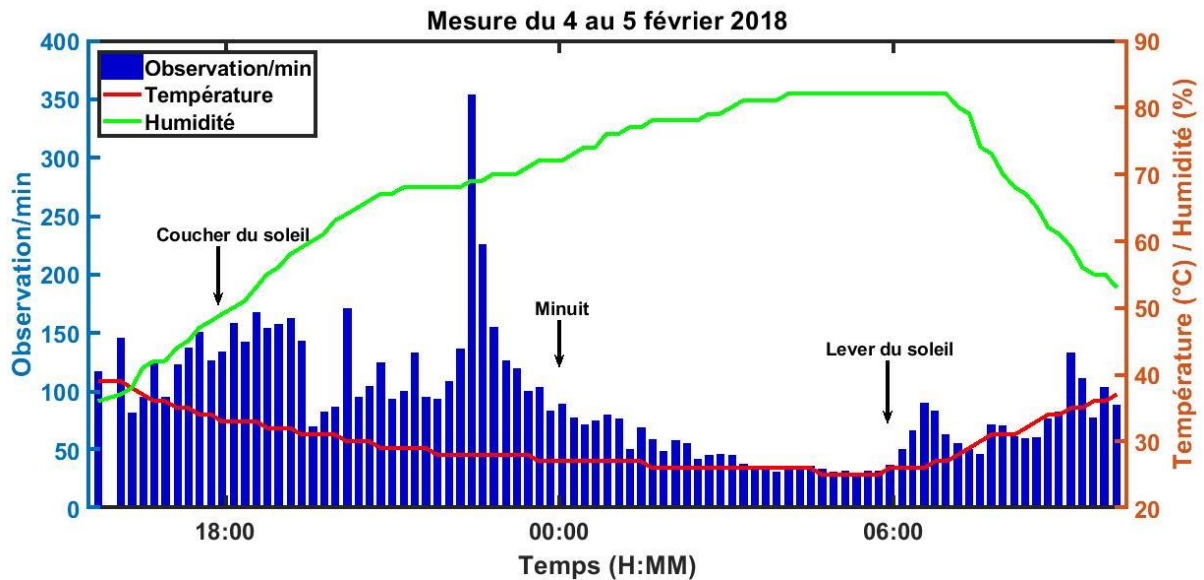


Figure 61 : Histogramme thermohumidité de l'abondance temporelle des insectes. Mesure du 4 au 5 février 2018

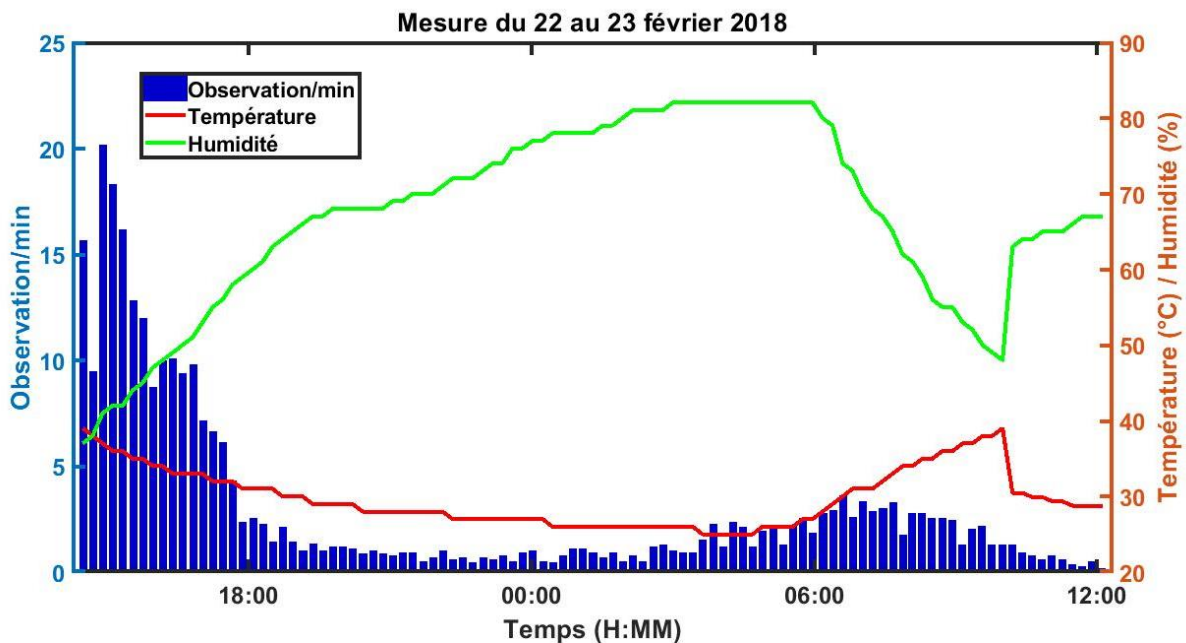


Figure 62 : Histogramme thermohumidité de l'abondance temporelle des insectes. Mesure du 22 au 23 février 2018

### II-3-2 : Modélisation de l'abondance des insectes par la méthode des moindres carrées

Des travaux ont montré que l'activité des organismes peut être modélisée en fonction de la température par la relation Eq. 48 :

$$Act(T) = Act_0 \cdot \sqrt{T_{max} - T} \cdot e^{\frac{-T_a}{T-T_{act}}} \quad \text{Eq. 48}$$

Ce modèle peut être mis en œuvre lorsque l'expérimentation se fait au laboratoire. Dans ces conditions, la température est contrôlée ce qui n'est pas le cas en dehors du laboratoire comme notre cas. Alors, le développement en série de Taylor à l'ordre 2 de l'équation Eq. 48 permet d'obtenir un modèle simplifié de l'activité des insectes en fonction de la température  $T$  (Eq. 49) où les  $a_i$  sont des constantes inconnues du modèle. À cela sont ajoutés les paramètres de l'humidité et du temps.

$$Act(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3Hum + a_4Hum^2 + a_5temps \quad \text{Eq. 49}$$

Sous forme matricielle, l'équation Eq. 50 peut se mettre sous la forme de l'équation Eq. 50 :

$$Act = (1 \ T \ T^2 \ Hum \ Hum^2 \ temps) \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 50}$$

Le nombre d'inconnues étant supérieur au nombre d'équations, le problème est mal posé. L'une des méthodes utilisées pour résoudre ce type de problème, est la régression des moindres carrées. Cette méthode a été utilisée pour déterminer les constantes  $a_i$ .

Ce modèle peut être rendu robuste en ajoutant d'autres paramètres météorologiques telles que la direction du vent.

Les variations de la température et de l'humidité en fonction du temps (Figure 61, Figure 62) suggèrent une variation temporelle du second degré de la température et de l'humidité en fonction du temps. Nous avons proposé l'équation Eq. 51 pour modéliser le nombre d'observations d'insectes comme fonction de la température, de l'humidité et du temps. La Figure 63(b) présente le nombre d'observations d'insectes prédits en fonction du nombre d'observations d'insectes ayant interceptés le champ de

vision du système d'acquisition. Le coefficient de régression est de 0,714. Cette valeur du coefficient de régression montre qu'il y'a une bonne accointance entre le model et les valeurs issues de l'expérimentation.

$$\text{Obs}(\text{prédite}) = 2,812 \cdot 10^8 + 103,13 \text{ Hum} - 1,1836 \text{ Hum}^2 + 2,665 \text{ Temp} - 1,852 \text{ Temp}^2 - 381.520 \text{ temps} \quad \text{Eq. 51}$$

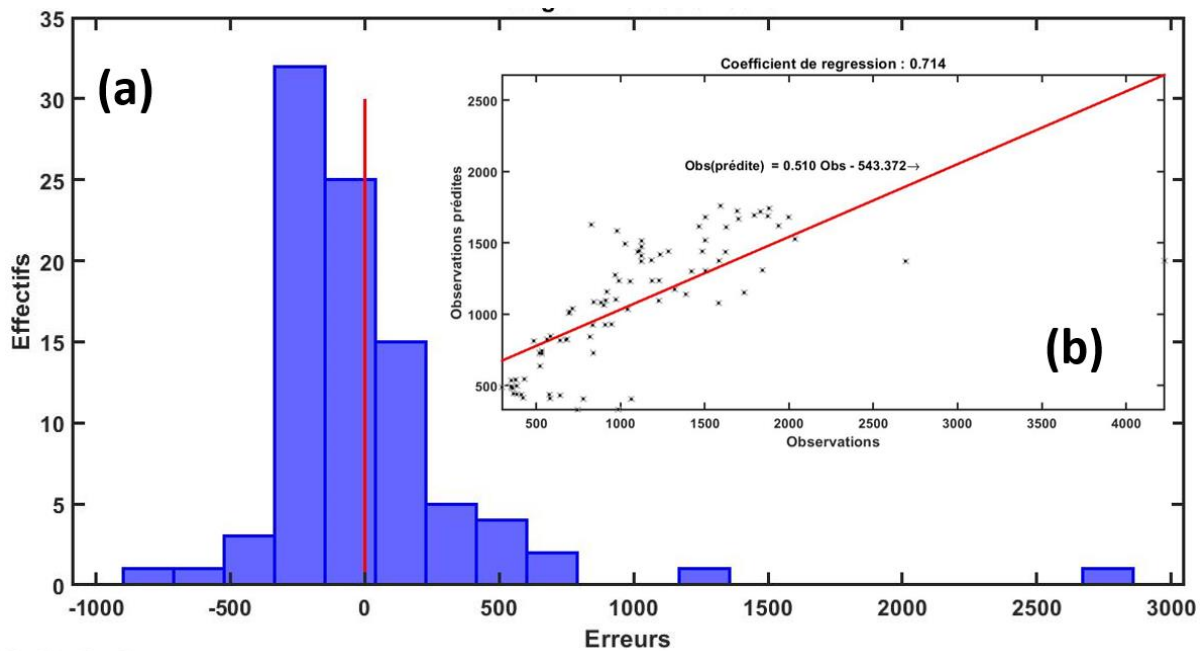


Figure 63: (a) Histogramme des erreurs. (b) Nombre d'observations prédites en fonction des données expérimentales. Mesures du 4 au 5 février 2018

### II-3-3 : Modélisation de l'abondance des insectes par le réseau de neurones artificiels

Dans les phénomènes physiques où la loi de distribution n'est a priori connue ou dans le cas de phénomènes complexes, les réseaux de neurones artificiels sont généralement utilisés pour modéliser le phénomène physique. Dans ce paragraphe, il est question de modéliser l'abondance des insectes en fonction de la température et de l'humidité à partir des réseaux de neurones artificiels (RNA).

Un RNA de régression multilinéaire a été créé à partir de l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Le nombre de nœuds de couches cachées a un impact sur la taille et la capacité de généralisation du RNA. Plus le nombre de nœuds cachés est faible, plus la

taille du réseau et la capacité de généralisation sont faibles. Si le nombre de nœuds cachés est trop important, les informations de non-régularité des échantillons d'apprentissage peuvent être mémorisées avec précision. C'est le phénomène de surajustement. Par conséquent, le nombre de nœuds cachés a été déterminé à partir de l'équation Eq. 52 :

$$\text{Noeuds} = \sqrt{E} + S_o + \delta \quad \text{Eq. 52}$$

$E$  est le nombre de variables d'entrée,  $S_o$  est le nombre de variables de sortie et  $\delta$  est une constante comprise entre 1 et 10.

Les composantes principales des variables d'entrée (humidité, température, temps) ont été extraites après la suppression des grandeurs répétitives. Pour le test du *RNA*, 70% des données en entrée ont été utilisées et 15% pour le test et 15% pour la validation. La fonction de transfert du *RNA* est la fonction *tan-sigmoid*.

La Figure 64 présente le nombre d'observations prédites par le *RNA* en fonction du nombre d'observations issu de l'expérimentation. La valeur du coefficient de régression est égale à 0,91 (Figure 64 d). Cette valeur montre qu'il y a une bonne relation entre les valeurs générées par le modèle du réseau de neurones et les valeurs issues de l'expérimentation. Le modèle généré par le *RNA* a été bien assimilé avec un coefficient de régression égal à 0,92 (Figure 64 a). La Figure 64 (b) présente le test de validation du modèle avec un coefficient de régression de 0,83. Cette valeur étant supérieure à 0,50 montre que le modèle généré a été validé par le *RNA*.

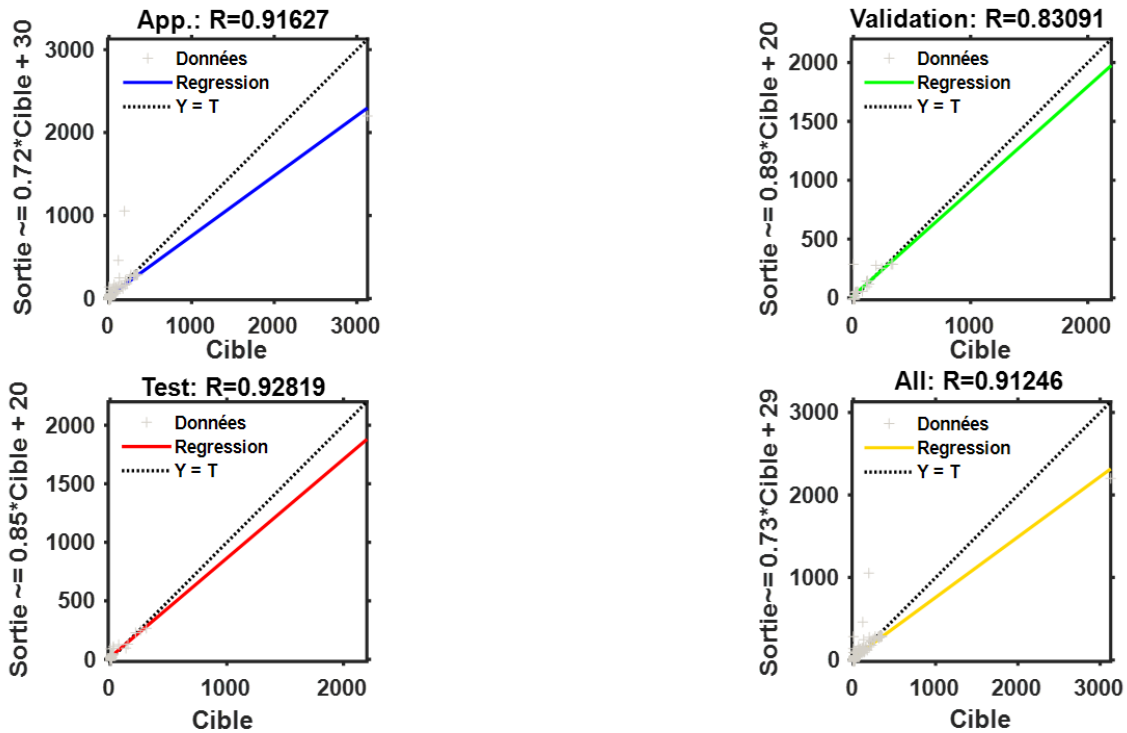


Figure 64 : Valeurs prédites (Sortie) en fonction des valeurs expérimentales (Cible).

La Figure 65 présente l'histogramme des erreurs entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites. Les marges d'erreurs entre les valeurs prédites par le modèle du réseau de neurones et les valeurs de l'expérimentation sont centrées en zéro et suivent une loi gaussienne (Figure 65). Cela consolide la bonne corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales.

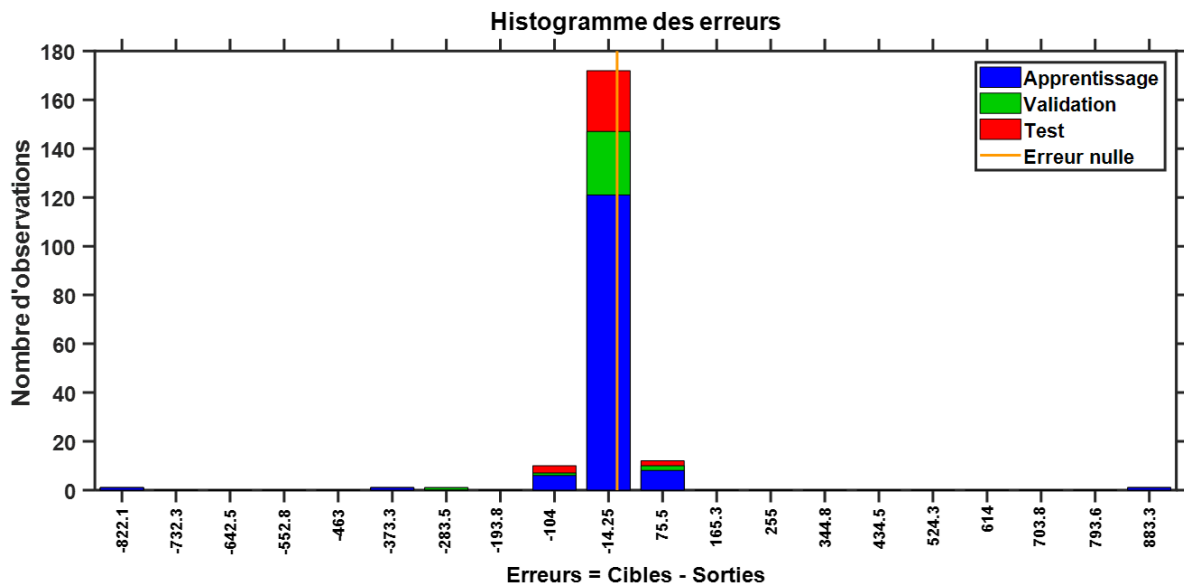


Figure 65 : Histogramme des erreurs de l'apprentissage, de validation et de test.

La performance du *RNA* généré est mesurée en termes d'efficacité de prédiction. Cette efficacité détermine la capacité du *RNA* à prédire correctement les valeurs inconnues. La performance du *RNA* généré a été évaluée à partir de la matrice de confusion.

La matrice de confusion contient des informations sur les classifications effectives et prédites effectuées par un système de classification. La performance de tels systèmes est généralement évaluée à l'aide des données de la matrice de confusion.

La Figure 66 montre la matrice de confusion pour un système de classification à deux classes. Dans cette matrice,  $a$  est le nombre de prédictions correctes du groupe négatif,  $b$  est le nombre de prédictions incorrectes du groupe positif,  $c$  est le nombre de prédictions incorrectes du groupe négatif, et  $d$  est le nombre de prédictions correctes du groupe positif. Plusieurs termes standard ont été définis pour la matrice de confusion à 2 classes :

L'efficacité ou la performance ( $AC$ ) est la proportion du nombre total de prédictions correctes. Elle a été déterminée en utilisant l'équation Eq. 53 :

$$AC = \frac{a+d}{a+b+c+d} \quad \text{Eq. 53}$$

- Le véritable taux positif ( $VP$ ) est la proportion de cas positifs correctement classés. Il a été calculé à l'aide de l'équation Eq. 54 :

$$VP = \frac{d}{c+d} \quad \text{Eq. 54}$$

Le taux de faux positifs ( $FP$ ) est la proportion de cas négatifs classés incorrectement comme positifs, calculée à l'aide de l'équation Eq. 55 :

$$FP = \frac{b}{a+b} \quad \text{Eq. 55}$$

Le véritable taux négatif ( $VN$ ) est défini comme la proportion de cas négatifs correctement classés, calculé à l'aide de l'équation Eq. 56 :

$$VN = \frac{a}{a+b} \quad \text{Eq. 56}$$

Le taux de faux négatifs ( $FN$ ) est la proportion de cas positifs mal classés comme négatifs, calculée à l'aide de l'équation Eq. 57 :

$$FN = \frac{c}{c+d} \quad \text{Eq. 57}$$

Enfin, la précision ( $P$ ) est la proportion des cas positifs prédits qui sont corrects, calculée à l'aide de l'équation Eq. 58 :

$$P = \frac{d}{b+d} \quad \text{Eq. 58}$$

		Valeurs Prédites		
		Négatif	Positif	
Valeurs	Négatif	a $\frac{a}{a+b+c+d}$	b $\frac{b}{a+b+c+d}$	VN <sup>2</sup> FP <sup>2</sup>
	Positif	c $\frac{c}{a+b+c+d}$	d $\frac{d}{a+b+c+d}$	VP <sup>2</sup> FN <sup>2</sup>
		VN <sup>1</sup> FP <sup>1</sup>	VP <sup>1</sup> FN <sup>1</sup>	$\frac{AC}{AC}$

Figure 66 : Diagramme explicatif de la matrice de confusion. Les exposants indiquent l'ordre des taux calculés.

Les données de la diagonale principale (couleur vert-pâle) de la matrice de confusion de la Figure 67 représentent les données classées correctement. Et les données de la diagonale inférieure (couleur rouge-pâle) représentent les données mal classées. La proportion des données classées correctement est supérieure à la proportion des données classées incorrectement dans les matrices de confusion de l'apprentissage (App.), de confusion (Confus.), de test (Test.) et de toutes les données (All.). L'efficacité de la classification pour l'apprentissage est de 84,1%, pour la validation de 86,7%, pour le test de 73,3% et pour toutes les données réunies de 82,8%. Ces valeurs sont largement supérieures à 50%, cela témoigne de l'efficacité du RNA généré à prédire les données expérimentales. Les véritables vrai-positifs d'ordre 1,  $VP1$ , et vrai-négatifs d'ordre 1,  $VN1$ , de chacune des matrices de confusion sont supérieurs aux taux de faux-négatif,  $FN1$ , et de faux-positif,  $FP1$ . Cela montre également que le RNA généré prédit les valeurs expérimentales avec un faible taux d'erreurs comme nous l'avons observé à partir de l'histogramme des erreurs (Figure 65).



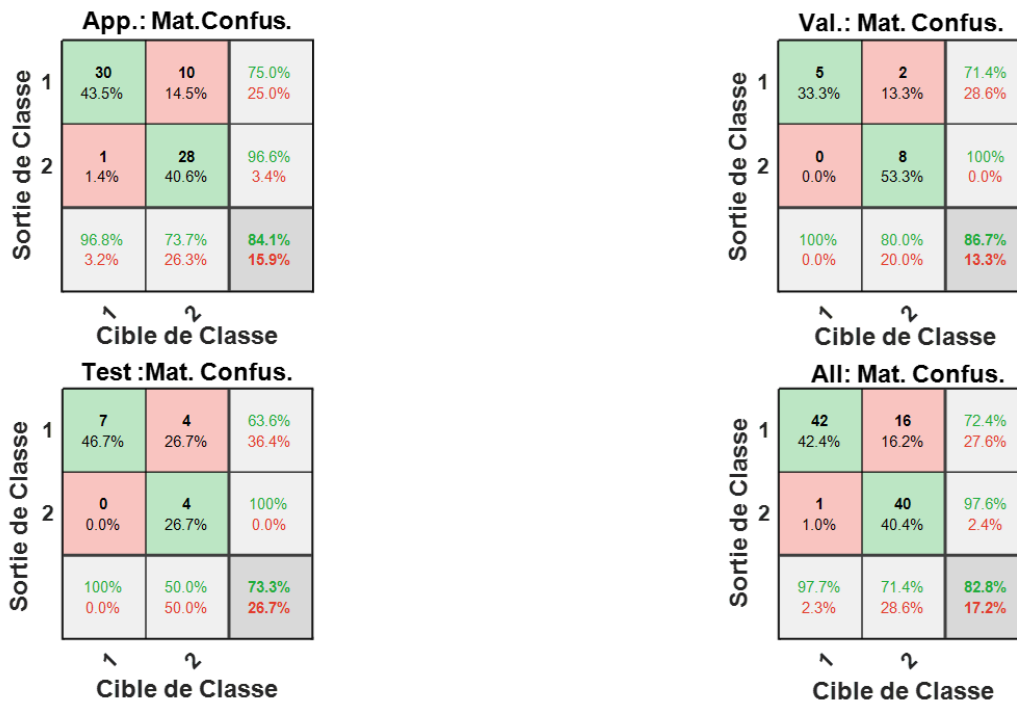


Figure 67 : Matrice de confusion entre les valeurs prédites (Sortie) et les valeurs expérimentales (Cible).

Les différents poids qui ont été générés par le réseau de neurones pour la première couche cachée ont été regroupés dans la matrice  $IW$ .

$$IW = \begin{pmatrix} 19,5008 & 3,7148 \\ 2,1660 & -2,6217 \\ 0,5434 & 4,1611 \\ -3,4680 & -1,3363 \\ -2,9641 & -2,6610 \\ -2,5739 & -2,6606 \\ 3,7440 & 1,3269 \\ -2,5239 & -0,2995 \end{pmatrix}$$

b

$$= \begin{pmatrix} -24,2154 & -4,2900 & -1,3007 & 0,6021 & -0,3211 & -1,1677 & 2,7995 & -4,8581 \\ -3,1364 & -2,775 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{pmatrix}$$

La sortie du RNA de la première couche a généré le modèle donné par l'équation Eq. 59 :

$$Act_i = \frac{2}{1 + e^{IW_{i,1:8} * p + b_{1,1:8}}} - 2 \quad \text{Eq. 59}$$

Avec  $p = p(\text{Temp}, \text{Hum}, \text{temp})$

Les différents poids qui ont été générés par le RNA pour la deuxième couche ont été regroupés dans la matrice  $LW$ .

$$LW = \begin{pmatrix} -5,4563 & 0,8619 & -0,1032 & 0,2097 & 0,1494 & -0,0033 & 0,0052 & 0,5285 \\ -6,6401 & 2,3339 & 0,5594 & 0,4806 & 0,4043 & -0,0060 & 0,0553 & 1,2815 \end{pmatrix}$$

La sortie du *RNA* de la deuxième couche a généré le modèle donné par l'équation Eq. 60 :

$$Act_i = LW_i * Act_i + b_{2,1:8} \quad \text{Eq. 60}$$

Enfin, nous avons constaté que la constante de correction générée par le modèle de *RNA* est plus faible que celle obtenue par la méthode des moindres carrés. Cela est due au fait que le modèle proposé pour rendre compte de la variation du temps n'est pas approprié. Pour des phénomènes dont la loi de variation n'est à priori connu, la méthode de *RNA* peut fournir une loi de variation robuste à condition de donner un nombre raisonnable de nombres de couches cachées.

## CONCLUSION

Les travaux réalisés ont concerné la réalisation d'un instrument optique capable d'identifier des objets à grande distance en utilisant une source lumineuse et le couple télescope lunette astronomique. Deux types d'instruments de télédétection ont été montés au cours de nos travaux. La première configuration proposée utilise la technique de spectroscopie par télédétection passive. Elle est constituée de deux récepteurs. L'un pour l'acquisition de l'image et l'autre pour la mesure de l'empreinte spectrale et/ou de la fréquence de battement d'ailes de spécimens volants. Cette configuration diffère de la configuration classique des instruments de télédétection proposés par certains auteurs. À l'aide de cet instrument, l'image et l'empreinte spectrale ainsi que la fréquence de battement d'ailes de spécimens volants sont acquis conjointement. Les images obtenues n'étant pas bien résolue, nous n'avons pas pu identifier distinctement les insectes, mais à partir d'analyse multivariée nous avons pu identifier douze espèces d'insectes pour une durée de mesure de 4h, allant de 10h30 à 13h00. La deuxième configuration utilise la technique de spectroscopie par télédétection active. Un émetteur laser à impulsion proche infrarouge avec une fréquence de répétition de l'ordre de kilohertz et un récepteur intégrant un capteur linéaire ont été utilisés. Le capteur linéaire a été incliné de 45° par rapport à l'axe du rayon incident du faisceau laser. Cela nous a permis de détecter les insectes sur une distance de près de 500 m sur le site nord de l'Institut National Polytechnique Houphouët Boigny (INP-HB). Pour une durée de mesure de 3 :00, près de 23000 insectes soit 7666 insectes/h ont été détectés. Le critère de choix utilisé nous a permis d'identifier près de 51 espèces d'insectes en 3 heures ce qui ne serait pas possible par les méthodes classiques utilisées par les spécialistes de l'entomologie en si peu de temps. Aussi, à partir d'analyses prédictives en utilisant les réseaux de neurones artificiels et la méthode des moindres carrées, nous avons montré que le comportement des espèces volantes est lié au changement climatique (température, humidité, heure). Enfin, Cet instrument aide à la décision et permet de disposer d'un outil indispensable d'anticipation et de réflexion, en particulier pour tout ce qui concerne les investissements à programmer dans la lutte vectorielle tant dans le domaine de la santé qu'agricole pour le bien-être des populations. Dans les travaux futurs, nous effectuerons des mesures de campagne en vue d'évaluer le caractère épidémiologique

de certains insectes vecteurs de maladie tels que les drosophiles, les moustiques et bien d'autres dans les grandes villes de Côte d'Ivoire.

## Références

1. K. G. Boone and D. S. Holder, "Current approaches to analogue instrumentation design in electrical impedance tomography," *Physiol. Meas.* (1996).
2. M. Brydegaard, A. Merdasa, A. Gebru, H. Jayaweera, and S. Svanberg, "Realistic Instrumentation Platform for Active and Passive Optical Remote Sensing," *Appl. Spectrosc.* (2016).
3. J. K. Patel, S. Konda, O. A. Perez, S. Amini, G. Elgart, and B. Berman, "Newer technologies/techniques and tools in the diagnosis of melanoma," *Eur. J. Dermatology* (2008).
4. J. Hodgkinson and R. P. Tatam, "Optical gas sensing: A review," *Meas. Sci. Technol.* (2013).
5. S. Svanberg, "Environmental monitoring using optical techniques," in *12th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications* (2003).
6. K. Bensalah, J. Fleureau, D. Rolland, N. Rioux-Leclercq, L. Senhadji, O. Lavastre, F. Guillé, J.-J. Patard, and R. de Crevoisier, "La spectroscopie optique : une nouvelle approche pour l'étude des tumeurs urologiques," *Progrès en Urol.* (2010).
7. W. Trettnak, W. Gruber, F. Reininger, and I. Klimant, "Recent progress in optical oxygen sensor instrumentation," *Sensors Actuators B. Chem.* (1995).
8. V. R. Kondepati and H. M. Heise, "Recent progress in analytical instrumentation for glycemic control in diabetic and critically ill patients," *Anal. Bioanal. Chem.* (2007).
9. A. Marc, T. F. Achille, G. Mory, P. V. Niaba Koffi, and A. N. guessa. Georges, "Minerals composition of the cashew apple juice (*Anacardium occidentale* L.) of Yamoussoukro, Cote d'ivoire," *Pakistan J. Nutr.* (2011).
10. T. Ganchev, I. Potamitis, and N. Fakotakis, "Acoustic monitoring of singing insects," in *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings* (2007).
11. R. W. Mankin, "Applications of acoustics in insect pest management," *CAB Rev. Perspect. Agric. Vet. Sci. Nutr. Nat. Resour.* (2012).
12. R. W. Mankin, D. W. Hagstrum, M. T. Smith, A. L. Roda, and M. T. K. Kairo, "Perspective and promise: A century of insect acoustic detection and monitoring," *Am. Entomol.* (2011).
13. R. M. Hennig, K. G. Heller, and J. Clemens, "Time and timing in the acoustic recognition system of crickets," *Front. Physiol.* (2014).
14. M. Brydegaard, Z. Guan, M. Wellenreuther, and S. Svanberg, "Insect monitoring with fluorescence lidar techniques: Feasibility study," *Appl. Opt.* (2009).
15. Z. Guan, M. Brydegaard, P. Lundin, M. Wellenreuther, A. Runemark, E. I. Svensson, and S. Svanberg, "Insect monitoring with fluorescence lidar techniques: Field experiments," *Appl. Opt.* (2010).

16. A. Runemark, M. Wellenreuther, H. H. E. Jayaweera, S. Svanberg, and M. Brydegaard, "Rare events in remote dark-field spectroscopy: An ecological case study of insects," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* (2012).
17. A. Gebru, S. Jansson, R. Ignell, C. Kirkeby, J. C. Prangsma, and M. Brydegaard, "Multiband modulation spectroscopy for the determination of sex and species of mosquitoes in flight," *J. Biophotonics* (2018).
18. ..M. Brydegaard and S. Jansson, "Advances in entomological laser radar," *J. Eng.* (2019).
19. L. Mei and M. Brydegaard, "Development of a Scheimpflug Lidar System for Atmospheric Aerosol Monitoring," in *EPJ Web of Conferences* (2016).
20. M. Brydegaard, A. Gebru, and S. Svanberg, "Super resolution laser radar with blinking atmospheric particles — application to interacting flying insects," *Prog. Electromagn. Res.* (2014).
21. S. Jansson and M. Brydegaard, "Passive kHz lidar for the quantification of insect activity and dispersal," *Anim. Biotelemetry* (2018).
22. M. Brydegaard, A. Gebru, C. Kirkeby, S. Åkesson, and H. Smith, "Daily Evolution of the Insect Biomass Spectrum in an Agricultural Landscape Accessed with Lidar," in *EPJ Web of Conferences* (2016).
23. G. Zhao, M. Lian, Y. Li, Z. Duan, S. Zhu, L. Mei, and S. Svanberg, "Mobile lidar system for environmental monitoring," *Appl. Opt.* (2017).
24. M. Brydegaard, "New mobile observatory for aero-fauna studies," *SPIE Newsroom* (2015).
25. C. Kirkeby, M. Wellenreuther, and M. Brydegaard, "Observations of movement dynamics of flying insects using high resolution lidar," *Sci. Rep.* (2016).
26. M. Brydegaard, S. Jansson, E. Malmqvist, Y. P. Mlacha, A. Gebru, F. Okumu, G. F. Killeen, and C. Kirkeby, "Lidar reveals activity anomaly of malaria vectors during pan-African eclipse," *Sci. Adv.* (2020).
27. D. S. Hoffman, A. R. Nehrir, K. S. Repasky, J. A. Shaw, and J. L. Carlsten, "Range-resolved optical detection of honeybees by use of wing-beat modulation of scattered light for locating land mines," *Appl. Opt.* (2007).
28. A. Gebru, E. Rohwer, P. Neethling, and M. Brydegaard, "Investigation of atmospheric insect wing-beat frequencies and iridescence features using a multispectral kHz remote detection system," *J. Appl. Remote Sens.* (2014).
29. E. Malmqvist, S. Jansson, S. Torok, and M. Brydegaard, "Effective parameterization of laser radar observations of atmospheric fauna," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* (2016).
30. K. M. Greenland, "Les Capteurs en Instrumentation Industrielle," *Opt. Acta Int. J. Opt.* (1983).

31. E. G. Gauglitz, *Handbook of Spectroscopy Near-Infrared Spectroscopy Handbook of Analytical Techniques In-Situ Spectroscopy in Heterogeneous Catalysis* (2003).
32. G. G. ; T. Vo-Dinh, "Handbook of spectroscopy," *Choice Rev. Online* (2004).
33. C. D. Wagner, W. M. Riggs, L. E. Davis, J. F. Moulder, and G. E. Muilenberg, "Handbook of X-ray Photo- electron Spectroscopy," *J. Electroanal. Chem. J. Electroanal. Chem. J. Catal. Electrochim. Acta Bull. Chem. Soc. Jpn. Inorg. Chem. Fuel Cells Their Electrochem. Dokl. Akad. Nauk SSSR* (1973).
34. R. Meier, "Handbook of Vibrational Spectroscopy," *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* (2003).
35. M. Sauer, J. Hofkens, and J. Enderlein, *Handbook of Fluorescence Spectroscopy and Imaging* (2011).
36. V. V. Tuchin, "Polarized light interaction with tissues," *J. Biomed. Opt.* (2016).
37. R. B. Miles, W. R. Lempert, and J. N. Forkey, "Laser Rayleigh scattering," *Meas. Sci. Technol.* (2001).
38. S. L. Jacques, J. R. Roman, and K. Lee, "Imaging superficial tissues with polarized light," *Lasers Surg. Med.* (2000).
39. N. Ghosh, "Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook," *J. Biomed. Opt.* (2011).
40. S. E. Piovan, "Remote Sensing," in *Springer Geography* (2020).
41. ... W. G. Rees, "Physical principles of remote sensing," *Phys. Princ. Remote Sens.* (1990).
42. ... R. E. Francis and R. G. Reeves, "Manual of Remote Sensing," *J. Range Manag.* (1977).
43. E. Malmqvist, *From Fauna to Flames* (2019).
44. K. Mollazade, M. Omid, F. A. Tab, and S. S. Mohtasebi, "Principles and Applications of Light Backscattering Imaging in Quality Evaluation of Agro-food Products: A Review," *Food Bioprocess Technol.* (2012).
45. R. Corey, M. Kissner, and P. Saulnier, "Coherent backscattering of light," *Am. J. Phys.* (1995).
46. M. Carnevale and L. R. Abbozzo, "Atmospheric optics," *Opt. Acta (Lond).* (1979).
47. S. Jansson, P. Atkinson, R. Ignell, and M. Brydegaard, "First polarimetric investigation of malaria mosquitoes as lidar targets," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* (2018).
48. M. Brydegaard and C. R. Lazzari, "Towards quantitative optical cross sections in entomological laser radar - Potential of temporal and spherical parameterizations for identifying atmospheric fauna," *PLoS One* (2015).

49. A. Moore and R. H. Miller, "Automated identification of optically sensed aphid (*Homoptera: Aphidae*) wingbeat waveforms," *Ann. Entomol. Soc. Am.* (2002).
50. M. J. Tauc, K. M. Fristrup, K. S. Repasky, and J. A. Shaw, "Field demonstration of a wing-beat modulation lidar for the 3D mapping of flying insects," *OSA Contin.* (2019).
51. K. S. Repasky, J. A. Shaw, R. Scheppelle, C. Melton, J. L. Carsten, and L. H. Spangler, "Optical detection of honeybees by use of wing-beat modulation of scattered laser light for locating explosives and land mines," *Appl. Opt.* (2006).
52. G. M. Khan, "Artificial neural network (ANNs)," in *Studies in Computational Intelligence* (2018).
53. T. R. Cook, "Neural Networks," in *Advanced Studies in Theoretical and Applied Econometrics* (2020).
54. P. Del Moral and C. Vergé, "Traitement du signal," in (2014).
55. F. J. Taylor, "Digital signal processing," in *The Computer Engineering Handbook* (2001).
56. J. H. Won and T. Pany, "Signal Processing," in *Springer Handbooks* (2017).
57. F. A. Horrigan, "SIGNAL PROCESSING FUNDAMENTALS.," *Electron. Prog.* (1987).
58. R. Telemetry, "Radio telemetry and bird movements," *Wild Birds Avian Infl. an Introd. to Appl. F. Res. Dis. Sampl. Tech.* (2005).
59. A. Lozano-Nieto, "Telemetry," in *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays* (2003).
60. G. T. Crossin, M. R. Heupel, C. M. Holbrook, N. E. Hussey, S. K. Lowerre-Barbieri, V. M. Nguyen, G. D. Raby, and S. J. Cooke, "Acoustic telemetry and fisheries management," *Ecol. Appl.* (2017).
61. V. A. Drake and D. R. Reynolds, *Radar Entomology: Observing Insect Flight and Migration* (2012).
62. M. Brydegaard, E. Malmqvist, S. Jansson, G. Zhao, J. Larsson, and S. Török, "The Scheimpflug lidar method," in (2017).
63. L. Mei and M. Brydegaard, "Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system," *Opt. Express* (2015).
64. L. Mei, Z. Kong, and P. Guan, "Implementation of a violet Scheimpflug lidar system for atmospheric aerosol studies," *Opt. Express* (2018).
65. M. Brydegaard, *Aspects of Optical Broad Band Spectroscopy and Information Extraction - Applications in Medicine and Ecology* (2009).
66. K. F. Renk, "Basics of Laser Physics," *Saudi Med J* (2012).



67. T. Popmintchev, M. C. Chen, D. Popmintchev, P. Arpin, S. Brown, S. Ališauskas, G. Andriukaitis, T. Balčiunas, O. D. Mücke, A. Pugzlys, A. Baltuška, B. Shim, S. E. Schrauth, A. Gaeta, C. Hernández-García, L. Plaja, A. Becker, A. Jaron-Becker, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, "Bright coherent ultrahigh harmonics in the keV x-ray regime from mid-infrared femtosecond lasers," *Science* (80-. ). (2012).
68. E. Kannatey-Asibu, *Principles of Laser Materials Processing* (2008).
69. D. Malacara-Hernández and Z. Malacara-Hernández, "Astronomical Telescopes," in *Handbook of Optical Design, Third Edition* (2013).
70. B. Bourouga, V. Goizet, and J.-P. Bardon, "Les aspects théoriques régissant l'instrumentation d'un capteur thermique pariétal à faible inertie," *Int. J. Therm. Sci.* (2000).
71. G. W. Milligan and M. C. Cooper, "An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set," *Psychometrika* (1985).
72. D. L. Davies and D. W. Bouldin, "A Cluster Separation Measure," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* (1979).
73. S. Salvador and P. Chan, "Learning states and rules for detecting anomalies in time series," *Appl. Intell.* (2005).
74. O. Arbelaitz, I. Gurrutxaga, J. Muguerza, J. M. Pérez, and I. Perona, "An extensive comparative study of cluster validity indices," *Pattern Recognit.* (2013).
75. R. Tibshirani, G. Walther, and T. Hastie, "Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic," *J. R. Stat. Soc. Ser. B Stat. Methodol.* (2001).
76. A. Zagouras, A. Kazantzidis, E. Nikitidou, and A. A. Argiriou, "Determination of measuring sites for solar irradiance, based on cluster analysis of satellite-derived cloud estimations," *Sol. Energy* (2013).
77. A. Zagouras, H. T. C. Pedro, and C. F. M. Coimbra, "Clustering the solar resource for grid management in island mode," *Sol. Energy* (2014).
78. A. Zagouras, R. H. Inman, and C. F. M. Coimbra, "On the determination of coherent solar microclimates for utility planning and operations," *Sol. Energy* (2014).
79. S. Jansson, A. Gebru, R. Ignell, J. Abbott, and M. Brydegaard, "Correlation of mosquito wing-beat harmonics to aid in species classification and flight heading assessment," in *Optics InfoBase Conference Papers* (2019).
80. A. Shukla and S. S. Jibhakte, "Feasibility Analysis and Comparative study of FFT and Autocorrelation Algorithms," *Int. J. Comput. Appl.* (2010).
81. O. Šebesta, I. Gelbič, and J. Peško, "Daily and seasonal variation in the activity of potential vector mosquitoes," *Cent. Eur. J. Biol.* (2011).

82. A. P. Genoud, R. Basistyy, G. M. Williams, and B. P. Thomas, "Optical remote sensing for monitoring flying mosquitoes, gender identification and discussion on species identification," *Appl. Phys. B Lasers Opt.* (2018).

83. A. P. Genoud, R. Basistyy, G. M. Williams, and B. P. Thomas, "Correction to: Optical remote sensing for monitoring flying mosquitoes, gender identification and discussion on species identification (*Applied Physics B*, (2018), 124, 3, (46), 10.1007/s00340-018-6917-x)," *Appl. Phys. B Lasers Opt.* (2018).

---

## ANNEXES

---

## ANNEXES

### ANNEXE A : Algorithme d'acquisition des données avec le spectromètre

```

% Effacer l'écran commandWindow de matlab
clc ;
% Effacer toutes les variables de la mémoire de matlab
clear all ;
% Fermer toutes les figures ouvertes
close all ;
% Déclaration des propriétés de l'algorithme
threshol=1E-2; % Seuil de détection
it=20000; % Temps d'intégration en microseconde
horizon=1000; % Nombre d'échantillons
fd=1; %diamètre de la fibre optique
% Charger la librairie des fonctions de commandes du spectromètre
javaaddpath('C:\Program
Files\OceanOptics\OmniDriver\OOI_HOME\OmniDriver.jar\');
import('com.oceanoptics.omnidriver.api.wrapper.Wrapper');
% Récupérer toutes les fonctions de commandes du spectromètre
OO=Wrapper();
cmds=methods(Wrapper);
% Ouvrir le spectromètre pour une acquisition
noOO=OO.openAllSpectrometers();
[t1 ,t2 ,javmem]=inmem;
OOtc=OO.getFeatureControllerBoardTemperature(0);
% Recupérer les longueurs d'ondes
w=OO.getWavelengths(0);
OO.setScansToAverage(0,0);
% Obtenir les informations sur la température du spectromètre
CCDTempt0=OOtc.getBoardTemperatureCelsius;
% Lien du répertoire de sauvegarde des données. Peut-être changé
target='C:\Users\Benoit_KOUAKOU\Desktop\BackUp10_05_2019\';
fileNumStart=length(dir([target '*.mat']))-1;
% Obtenir le temps de démarrage de l'algorithme
OO.setIntegrationTime(0,it);
% Obtenir les informations de la configuration
newSpec=OO.getSpectrum(0);
specHistory=repmat(newSpec,[1 horizon]);
Imean=0;
Imin=0;
Imax=0;

```

```

% Sauvegarder les informations de la configuration
save([target'info'],'w','CCDTempt0','tstart','it','fd','horizon')
% Débuter l'acquisition
n=0;
k=0;
trig=[]; % Nom de fichier de sauvegarde
tstart=now;
t=0;
numBins=30;
bins=linspace(0,2^16-1,numBins);
Hm=0;
kSmooth=0.01;
% tic
figure(1)
while true
n=n+1;
if n>horizon
n=1;
tstart=now;
end
if n==horizon
tend=now;
k=k+1;
CCDTemp=OOtc.getBoardTemperatureCelsius;
t(k)=now;
save([target'trig' num2str(fileNumStart+k)],'CCDTemp','specHistory','tstart','tend',
'it')
meanSpec=mean(specHistory);
Imin(k)=min(min(specHistory));
Imax(k)=max(max(specHistory));
Imean(k)=median(meanSpec);
%Afficher les informations sur la dernière acquisition
subplot(2,2,1)
t_latest=linspace(tstart,tend,horizon);
plot( t_latest,meanSpec)
datetick
axis tight
title(['Average intensity, latest ' num2str(horizon) ' measurements'])
subplot(2,2,2)
set(gca,'YScale','log')

```

```

[N,xOut]=hist(meanSpec, bins);
Hm=kSmooth*N+(1-kSmooth)*Hm; % Calcul de la moyenne mobile
bar(xOut,N)
set(gca,'YScale','log')
hold on
plot(xOut,Hm,'*r')
xlabel('f')
ylabel('counts')
hold off
axis tight
subplot(2,2,3:4)
plot(t,[Imean;Imin;Imax])
axis tight
legend('I_{mean}S','I_{min}','I_{max}')
set(gca,'XTick',t)
datetick('x','HH:MM:SS','keeplimits')
drawnow
disp(['trig number' num2str(k)]);
end
newSpec=OO.getSpectrum(0);
specHistory(:,n)=newSpec;
end

```

**ANNEXE B : Algorithme d'analyse des données de mesure lidar**

```

clear all %#ok<*CLALL>
clc
close all
commandwindow;
%% Directory
dn='I:\Lidar data\LIDAR 06092016\';
saveDrive='I:\Lidar data\LIDAR 06092016\';
fn=dir([dn '*.dat']);
[~,ind]=sort([fn.datenum]);
fn=fn(ind);
noFiles=length(fn);
fs=3000;
noPix=2048;
clock=20e6;
SNR=5;
tDiff=0;
cpt=1;
marginToTerm=4;
shrink=ones(2,5);
grow=ones(5,30);
observation=[ ];
inc=[ ];
transFoc=0.5;
transDiam=0.102;
recFoc=0.8;
recDiam=0.205;
pixLength=200e-6;
pixPitch=14e-6;
sensTilt=45;
sepDist=0.814;
termDist=514;
chipLength=200e-6;
chipPitch=20e-6;
spotWidth=chipPitch*termDist/transFoc;
spotHeight=chipLength*termDist/transFoc;
termRefl=0.018;
P1=polyfit([0 termDist],[transDiam spotWidth],1);
P1=@(r) P1(1)*r+P1(2);
P2=polyfit([0 termDist],[transDiam spotHeight],1);

```

```

P2=@(r) P2(1)*r+P2(2);
frDark=zeros(noPix,noFiles);
frMin=zeros(noPix,noFiles);
frMed=zeros(noPix,noFiles);
frMax=zeros(noPix,noFiles);
frIqr=zeros(noPix,noFiles);
frThresh=zeros(noPix,noFiles);
frTermIntensity=zeros(1,noFiles);
frTermPos=zeros(1,noFiles);
frTermWidth=zeros(1,noFiles);
frAct=zeros(1,noFiles);
frTime=zeros(1,noFiles);
frRange=zeros(noPix,noFiles);
frProbeVol=zeros(1,noFiles);
frOCSconv=zeros(noPix,noFiles);
frTermOCS=zeros(noPix,noFiles);
frMinDet=zeros(noPix,noFiles);
frMaxDet=zeros(noPix,noFiles);
saveEveryNfile=100; % archiveNo=14;%9;
archiveNo=1;
saveNo=0;
startInd=1; % startInd=651;%721;
st=now;
for k=startInd:noFiles
saveNo=saveNo+1;
%% Opens, reads and shapes the file
fid=fopen([dn fn(k).name], 'r','b');
noLines=fread(fid,1,'*uint16');
[~]=fread(fid,1,'*uint16');
[~]=fread(fid,1,'*uint32');
newLine=fread(fid,1,'*uint8');
timeStamp=zeros(noLines,1);
slotIncr=zeros(noLines,1);
slotInd=zeros(noLines,1);
Draw=[ ];
l=1;
while newLine==1
timeStamp(l)=fread(fid,1,'*uint32');
slotIncr(l)=fread(fid,1,'*uint16');
slotInd(l)=fread(fid,1,'*uint8');

```



```

Draw(:,l)=fread(fid,noPix,'*uint16');
l=l+1;
newLine=fread(fid,1,'*uint8');
end
while noLines>size(Draw,2)
timeStamp(end)=[];
slotIncr(end)=[];
slotInd(end)=[];
noLines=noLines-1;
end
while slotInd(end)~=0
Draw(:,end)=[];
timeStamp(end)=[];
slotIncr(end)=[];
slotInd(end)=[];
noLines=noLines-1;
end
fclose(fid);
Draw=flipud(Draw);
timeStamp=timeStamp/clock;
brightSlots=find(slotInd);
darkSlots=find(~slotInd);
bgr=interp1(timeStamp(darkSlots),Draw(:,darkSlots),timeStamp(brightSlots),'linear')
D=Draw(:,brightSlots)-bgr;
noLines=length(D);
%% Uses the file name to define when the file was recorded
name=fn(k).name;
yy=str2double(name(end-26:end-23));
mm=str2double(name(end-21:end-20));
dd=str2double(name(end-18:end-17));
HH=str2double(name(end-15:end-14))+tDiff;
MM=str2double(name(end-12:end-11));
SS=str2double(name(end-9:end-8))+str2double(name(end-6:end-4))/1000;
frTime(k)=datenum([yy mm dd HH MM SS]);
%% Retrieve statistics
frDark(:,k)=median(Draw(:,darkSlots),2);
Dsort=sort(D,2);
frMin(:,k)=Dsort(:,1);
frMed(:,k)=Dsort(:,round(end/2));
frMax(:,k)=Dsort(:,end);

```

```

frIqr(:,k)=Dsort(:,round(3/4*end))-Dsort(:,round(1/4*end));
frThresh(:,k)=frMed(:,k)+SNR*frIqr(:,k);
D=D-repmat(frMed(:,k),1,noLines);
if max(frMed(:,k))<300
bgScan=1;
else
bgScan=0;
end
%% Termination
if bgScan ==0
[frTermIntensity(k),frTermPos(k)]=max(frMed(:,k));
termEnd=frTermPos(k)-
1+find(frMed(frTermPos(k):end,k)>frTermIntensity(k)/exp(2),1,'last');
termStart=flipud(frMed(:,k));
termStart=frTermPos(k)+1-find(termStart((2049-
frTermPos(k):end)<frTermIntensity(k)/exp(2),1,'first');
termInd=termStart:termEnd;
startPoints=[termStart frTermPos(k) termEnd];
[f1,gof]= fit(termInd',frMed(termInd,k),'gauss1','StartPoint', startPoints);
b=coeffvalues(f1);
frTermWidth(k)=round(abs(b(:,3)));
frTermPos(k)=round(b(:,2));
frTermIntensity(k)=b(:,1);
termPix=frTermPos(k);
else
frTermPos(k)=frTermPos(k-1);
frTermWidth(k)=frTermWidth(k-1);
frTermIntensity(k)=frTermIntensity(k-1);
end
%% Regions of interest
if bgScan==0
ROImask=zeros(noPix,noLines);
ROImask(1:(frTermPos(k)-marginToTerm*frTermWidth(k)),:)=1;
FOVregion=1:min(frTermPos(k)+marginToTerm*frTermWidth(k),noPix);
end
%% Range vector
termPixDist=1/(1/recFoc-1/termDist);
pix_y=sind(sensTilt)*pixPitch*(noPix/2-(1:noPix)');
termPix_z=sqrt(termPixDist^2-pix_y(frTermPos(k))^2);
pix_z=cosd(sensTilt)*pixPitch*(1:noPix)';

```

```

pix_z=flipud(pix_z)+termPix_z;
pix_z=pix_z-(pix_z(frTermPos(k))-pix_z(end));
termAng=atand(sepDist/termDist);
termPixAng=atand(pix_y(frTermPos(k))/pix_z(frTermPos(k)));
alpha=termAng-termPixAng;
pixAng=atand(pix_y./pix_z);
rAng=pixAng+alpha;
frRange(:,k)=sepDist./tand(rAng);
dr = interp1((frRange(1:(end-
1),k)+frRange(2:end,k))/2,diff(frRange(:,k)),frRange(:,k),'pchip','extrap');
%% Probe Volume
beamWidth=P1(frRange(FOVregion,k));
beamHeight=P2(frRange(FOVregion,k));
FOVwidth=pixLength*frRange(FOVregion,k)./pix_z(FOVregion);
FOVheight=sind(sensTilt)*pixPitch*frRange(FOVregion,k)./pix_z(FOVregion);
probeVolWidth=min(beamWidth,FOVwidth);
probeVolHeight=min(beamHeight,FOVheight);
probeVolume=dr(FOVregion).*probeVolWidth.*probeVolHeight;
frProbeVol(k)=sum(probeVolume(1:frTermPos(k)));
%% OCS calibration
frTermOCS(k)=probeVolWidth(frTermPos(k))*probeVolHeight(frTermPos(k))*termR
efl*1e6; %mm2
frOCSconv(:,k)=((frTermOCS(k)).*(frRange(:,k).^2)./(frMed(:,k)*(frRange(frTermPos(k)
),k).^2));
frOCSconv((length(FOVregion)+1):end,k)=0;
OCSmap= (D.*repmat(frOCSconv(:,k),1,noLines));
frMinDet(:,k)= (frOCSconv(:,k).*(frThresh(:,k)-frMed(:,k)));
frMaxDet(:,k)= (frOCSconv(:,k).*((216-1)-frMed(:,k)));
%% Find insects observations
Dmask=(D>repmat(frThresh(:,k)-frMed(:,k),1,noLines)).*ROImask;
Dmask=imerode(Dmask,shrink);
Dmask=imdilate(Dmask,grow);
T=bwconncomp(Dmask);
%% Extract and parameterize observations
entry=[];
if T.NumObjects>0
for l=1:T.NumObjects
[rr,tt]=ind2sub(size(D),T.PixelIdxList{l});
entry(l).fn=k;
entry(l).timeStmp=fn(k).date;

```

```

entry(l).ft=fn(k).datenum;
entry(l).fs=fs/2;
entry(l).rInd=min(rr):max(rr);
entry(l).tInd=min(tt):max(tt);
noiseTind=ceil(rand*length(Dmask));
if (noiseTind+length(entry(l).tInd)>length(Dmask))
entry(l).noiseInd=(noiseTind-length(entry(l).tInd)+1):noiseTind;
else
entry(l).noiseInd=noiseTind:(noiseTind+length(entry(l).tInd)-1);
end
while find(Dmask(entry(l).rInd,entry(l).noiseInd))
noiseTind=round(rand*length(Dmask));
if (noiseTind+length(entry(l).tInd)>length(Dmask))
entry(l).noiseInd=(noiseTind-length(entry(l).tInd)+1):noiseTind;
else
entry(l).noiseInd=noiseTind:(noiseTind+length(entry(l).tInd)-1);
end
end
entry(l).rtMap=OCsmap(entry(l).rInd,entry(l).tInd).*Dmask(entry(l).rInd,entry(l).tInd);
entry(l).bsTS=sum(entry(l).rtMap,1);
entry(l).noiseMap=OCsmap(entry(l).rInd,entry(l).noiseInd).*Dmask(entry(l).rInd,entry(l).tInd);
entry(l).noiseTS=sum(entry(l).noiseMap,1);
entry(l).timeInFile=timeStamp(brightSlots(round(mean(entry(l).tInd))));
entry(l).dt=length(entry(l).tInd)/(fs/2);
entry(l).centralPix=round(mean(entry(l).rInd));
entry(l).range=frRange(entry(l).centralPix,k);
[~,entry(l).pixCoverage]=mode(tt);
entry(l).appSize=sind(sensTilt)*pixPitch*entry(l).pixCoverage* ...
entry(l).range/sqrt(pix_y(entry(l).centralPix)^2+pix_z(entry(l).centralPix)^2);
entry(l).pixAng=pixAng(entry(l).rInd);
noEvent=sum(isnan(entry(l).bsTS));
if noEvent==0
perSmpl=round(length(entry(l).bsTS)/10);
wingMin=imerode(entry(l).bsTS,ones(1,perSmpl));
wingMax=imdilate(entry(l).bsTS,ones(1,perSmpl));
bodyBS=(wingMin');
smoothWind=normpdf(0:perSmpl,perSmpl/2,perSmpl/(4*sqrt(2*log(2))))/...

```

```

sum(normpdf(0:perSmpl,perSmpl/2,perSmpl/(4*sqrt(2*log(2))))); % Gauss, remember
to start at zero for symmetry
bodyBS= conv(bodyBS,smoothWind,'same');
entry(l).start=find(bodyBS>max(bodyBS)/10,1,'first');
entry(l).end=find(bodyBS>max(bodyBS)/10,1,'last');
entry(l).wingMin=wingMin;
entry(l).wingMax=wingMax;
entry(l).bodyBS=bodyBS;
entry(l).minDetOCS=sum(frMinDet(entry(l).rInd,k));
entry(l).maxDetOCS=sum(frMaxDet(entry(l).rInd,k));
entry(l).roi=frRange((entry(l).rInd),k);
entry(l).bgScan=bgScan;
if isempty(entry(l).start)
entry(l).start=1;
entry(l).end=length(entry(l).bsTS);
end
interv=entry(l).start:entry(l).end;
entry(l).bsOCS=median(bodyBS(interv));
entry(l).bodyBSMax=max(entry(l).bodyBS);
if entry(l).bodyBSMax>=entry(l).maxDetOCS
entry(l).saturated=1;
else
entry(l).saturated=0;
end
end
'pixLength','recFoc',...
'frMaxDet','fn','frAct','transDiam','termRefl','termDist','termPix','spotWidth','termAng
','spotHeight','recDiam','transFoc','shrink','grow','-v7.3')
disp('Saved.')
saveNo=0;
archiveNo=1+archiveNo;
startInd=startInd+saveEveryNfile;
observation=[];
entry=[];
end
end
disp('Saving...')
save([saveDrive 'sessionStats' num2str(archiveNo) '.mat'],'-v7.3','-nocompression')
disp('Saved.')

```

## ANNEXE C : Calibration de la distance

Pour calibrer la distance, nous avons, dans un premier temps, calculé la position angulaire de chaque pixel  $\varphi$  à partir de l'équation de conjugaison de la lentille mince et des relations trigonométriques dans un triangles.

En effet, la relation de conjugaison de formation d'une image de la lentille mince en fonction de la distance focale  $f$ , de la distance de l'objet au centre optique  $u$  et de la distance de l'image au centre optique  $v$  est donnée par (1) :

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Avec  $u = B'O' + O'O$

$$u = P_I \sin \theta + L_{II} \quad (2)$$

Ensuite, en remplaçant l'expression de  $u$  dans l'équation (1) cela a abouti à l'équation (3)

$$\frac{1}{P_I \sin \theta + L_{II}} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Alors, à partir du triangle rectangle  $A'B'O'$ , nous avons déterminé la tangente de l'angle entre l'axe optique et l'axe passant par le pixel de l'image du spécimen sur le détecteur linéaire (5) :

$$\tan(\gamma - \varphi) = \frac{h_I}{u} \quad (5)$$

En remplaçant l'expression de  $u$  dans l'équation (5) nous avons abouti à l'équation (6)

$$\tan(\gamma - \varphi) = \frac{h_I}{P_I \sin \theta + L_{II}} \quad (6)$$

$$h_I = P_I \cos \theta \quad (7)$$

$$\tan(\gamma - \varphi) = \frac{P_I \cos \theta}{P_I \sin \theta + L_{II}} \quad (8)$$

$$\tan(\gamma) = \frac{L}{z} \quad (9)$$

Lorsque le laser est à la focale de la lentille,  $\gamma$  et  $\varphi$  deviennent très petits par conséquent  $z \approx v$  et le point  $O'$  coïncide avec le point de Scheimpflug.

$$\gamma - \varphi = \frac{P_I \cos \theta}{P_I \sin \theta + L_{II}} \quad (10)$$

L'angle d'inclinaison  $\varphi$  peut être calibré en mesurant l'intensité de la lumière rétrodiffusée d'un objet fixe situé à une distance connue.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{L}{z_{\text{ref}}}\right) - \arctan\left(\frac{P_{I,\text{ref}} \cdot \cos\theta \cdot (z_{\text{ref}} - f)}{z_{\text{ref}} \cdot f}\right) \quad (11)$$

Pour une position quelconque, en développant l'équation (11) on obtient l'équation (12).

$$\frac{\sin\gamma \cdot \cos\varphi - \cos\gamma \cdot \sin\varphi}{\cos\gamma \cdot \cos\varphi + \sin\gamma \cdot \sin\varphi} = \frac{P_I \cos\theta}{P_I \sin\theta + L_{II}} \quad (12)$$

En divisant le numérateur et de dénominateur du membre de gauche de l'équation (12) par  $\cos\gamma \cdot \cos\varphi$  et en remplaçant  $\tan\gamma$  par son expression, il vient (13) :

$$\frac{L - z \cdot \tan\varphi}{z + L \cdot \tan\varphi} = \frac{P_I \cos\theta}{P_I \sin\theta + L_{II}} \quad (13)$$

À partir de l'équation 13, on en déduit la distance  $z$  (14) :

$$z = \frac{L[P_I(\sin\theta - \cos\theta \cdot \tan\varphi) + L_{II}]}{P_I(\cos\theta + \tan\varphi \cdot \sin\theta) + \tan\varphi \cdot L_{II}} \quad (14)$$

Lorsque le faisceau laser est focalisé à l'infini  $L \cdot \tan\theta \approx L_{II} \approx f$ . Alors l'équation 14 devient (15) :

$$z = \frac{L[P_I(\sin\theta - \cos\theta \cdot \tan\varphi) + f]}{P_I(\cos\theta + \tan\varphi \cdot \sin\theta) + f} \quad (15)$$

La position du pixel  $P_I$  est donnée par le nombre de pixel  $n_P$  et la taille d'un pixel  $W_P$  (16) :

$$P_I = \left(\frac{N_P}{2} - n_P\right) \cdot W_P \quad (16)$$

Où  $N_P$  désigne le nombre total de pixels

---

**PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES**

---



## Publications scientifiques

### Articles parus

1. BK Kouakou, OK Bagui, JT Zoueu, "Développement de techniques optiques d'identification d'insectes volants basée sur la spectroscopie par télédétection. Application à l'activité des insectes nuisibles aux cultures vivrières". *Afrique science* (2016).
2. Benoit K. Kouakou, Samuel Jansson, Mikkel Brydegaard, Jeremie T. Zoueu, "Entomological Scheimpflug lidar for estimating unique insect classes in-situ field test from Ivory Coast". *OSA Continuum* (2020).
3. M. Brydegaard, B. Kouakou, S. Jansson, J. Rydell, J. Zoueu, "Lidar profiling biological targets: - detection limits and dynamic range". *International Conference on Laser Optics (ICLO)* (2020).

### Articles soumis

4. Benoit Kouassi Kouakou, Eliane Koko Nadine Assoi, Adolphe Yatana Gbogbo, Jeremie Zoueu, "Entomological remote dark field signal extraction by maximum noise fraction and unsupervised clustering for species identification". *Royal Society Open Science* (2020).
5. Mikkel Brydegaard, Benoit Kouakou, Samuel Jansson, Jens Rydell, Jeremie Zoueu, "High Dynamical Range in Entomological Scheimpflug Lidars". *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* (2020).

## **Développement de techniques optiques d'identification d'insectes volants basées sur la spectroscopie par télédétection. Application à l'activité des insectes nuisibles aux cultures vivrières**

**Benoît K. KOUAKOU, Olivier K. BAGUI et Jérémie T. ZOUEU**

*Laboratoire d'Instrumentation, d'Image et de Spectroscopie, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, BP 1013, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire*

---

\* Correspondance, courriel : [jeremie.zoueu@inphb.edu.ci](mailto:jeremie.zoueu@inphb.edu.ci)

### **Résumé**

La caractérisation des insectes volants par des méthodes traditionnelles est fastidieuse. Nous avons développé des méthodes optiques basées sur la spectroscopie par télédétection ainsi que des stratégies d'analyse associées pour identifier des espèces volantes par leur signature spectrale et par la fréquence de vibration de leurs ailes en utilisant un télescope et une lunette astronomique. Les résultats obtenus montrent que la spectroscopie par télédétection est un atout majeur pour l'étude et la caractérisation des insectes volants nuisibles aux cultures vivrières.

**Mots-clés :** *télédétection, spectroscopie, culture vivrière, optique, insectes volants.*

### **Abstract**

**Development of optical techniques for the identification of flying insects on the basis of spectroscopic remote sensing. Application to the activity of insect pests in food crops**

Insects characterization with traditional methods is challenging. In this paper we developed a powerful optical methods based on remote sensing spectroscopy followed by a post processing multivariate statistical analysis, in order to identify insects by their spectral signature and wings beats. We have used simultaneously a refractor and a reflector. The result suggest that remote sensing spectroscopy seems to be a powerful instrumentation for the identification and characterization, in real time, harmful insects in a crop food's field in order to conduct a targeted fight.

**Keywords :** *remote sensing, spectroscopy, crop food, optic, harmful insect.*

### **1. Introduction**

L'évolution galopante de l'urbanisation dans les pays développés et du tiers-monde a réduit considérablement les terres cultivables. Par conséquent, les productions agricoles sont en dessous de la demande de la population. Ce qui induit une flambée du coût des denrées alimentaires. Fort est de constater que les populations de classe moyenne n'arrivent pas à manger à leur faim. Dès lors, la question de sécurité

alimentaire demeure une problématique majeure. Pour faire face à ce problème, des politiques d'autosuffisance alimentaire sont adoptés sur presque tout le continent. De nouvelles techniques culturales sont mises en jeu en vue d'une production maximale. Par exemple, les organismes génétiquement modifiés (OGM), l'apport d'engrais, l'utilisation de pesticides, etc., sont des techniques couramment utilisées. Bien que cela ait permis d'améliorer dans une certaine mesure le taux de production des cultures agricoles, leur inefficacité s'est avérée limitée à cause de l'impact des insectes ravageurs. Selon [1], les insectes ravageurs représentent une part importante des agents destructeurs des cultures, soit par la consommation directe des stocks [2], soit par la dégradation de leur valeur nutritive. Par ailleurs, les pesticides utilisés contre les insectes ravageurs tuent presque toutes les espèces d'insectes lorsqu'ils sont administrés dans les champs. Pourtant, certains insectes jouent un rôle important dans la biodiversité agricole [3]. Face à cet enjeu, il est crucial de développer d'autres stratégies de lutte contre les insectes nuisibles aux cultures vivrières en vue d'optimiser les productions agricoles. C'est dans ce contexte que certaines études ont été menées afin de caractériser des insectes destructeurs de cultures vivrières. La méthode traditionnelle utilisée consiste en la capture des insectes.

Cette méthode est laborieuse et inefficace dans le cas des insectes volants et ne permet pas d'avoir en temps réel des informations sur le type d'espèces présent majoritairement dans la plantation. Le radar a permis de lever un peu cette contrainte. Initialement utilisé dans les domaines militaire et météorologique, le radar a été adapté à l'observation des insectes dès les années 1968. Cela a été possible grâce à un appareil-radar construit par G.W. Schaefer. Cet appareil a été utilisé pour caractériser les insectes au sud du Sahara, en Afrique de l'Ouest, avec des résultats satisfaisants. Cependant le radar présente des insuffisances. Il ne permet pas de déterminer les espèces, ni les effectifs de chaque contact (écho ou point radar). Sauf exception, on ne peut différencier un gros oiseau d'un groupe de petits oiseaux en vol compact [4]. Ces dernières années, une équipe de chercheurs de l'université de Suède a développé une technique optique basée sur la spectroscopie par télédétection appliquée à l'étude des insectes en utilisant un spectromètre et un télescope [5 - 8]. Dans cet article, nous présentons une exploitation de cette technique spectroscopique par télédétection ainsi que des stratégies d'analyse associée en utilisant le couple télescope - lunette astronomique et une caméra CCD afin de lier l'information spectrale et spatiale.

## **2. Matériel et méthodes**

### **2-1. Méthodes d'acquisition des données**

#### ***2-1-1. Mesure de la réflectance par télédétection***

Pour l'acquisition des données par télédétection, nous avons utilisé un télescope de newton (Sky-Watcher) de diamètre 200 mm et de distance focale 1000 mm ainsi qu'une lunette astronomique (Bresser Messier AR 90). Le télescope et la lunette astronomique sont montés en parallèle sur un trépied et une monture. Le télescope et la lunette astronomique sont alignés sur une boîte noire (diamètre : 58 cm) se trouvant à 1 mètre au-dessus du sol, à environ 60 m du dispositif expérimental (*Figure 1*). Cette phase d'alignement consiste à utiliser d'abord, un oculaire, puis une caméra CCD connectée à un ordinateur pour observer le même objet (boîte noire). Elle permet de lier l'information spectrale et spatiale de l'évènement. L'utilisation de la boîte noire supprime les bruits de fond et amplifie l'information. Une fois la phase d'alignement terminée, la caméra CCD est connectée à la lunette astronomique puis à un ordinateur pour enregistrer l'information spatiale d'un évènement rare (passage d'un insecte par exemple) et un spectromètre à réseaux (Ocean Optic, USB 4000) est connecté au télescope et au même ordinateur pour enregistrer l'information spectrale du même évènement

rare. Les mesures de références sont effectuées en lâchant des billes de polystyrène blanc dans le plan focal de la boîte noire. La lumière rétrodiffusée par le passage d'un évènement dans la zone d'intérêt est collectée par le télescope et la lunette astronomique. La caméra CCD et le spectromètre sont pilotés chacun par un programme d'acquisition automatique (le seuil d'intensité est fixé à 100 pour capter tous les objets ou insectes traversant la zone d'intérêt). Le dispositif expérimental reste fixe durant le temps de mesure.

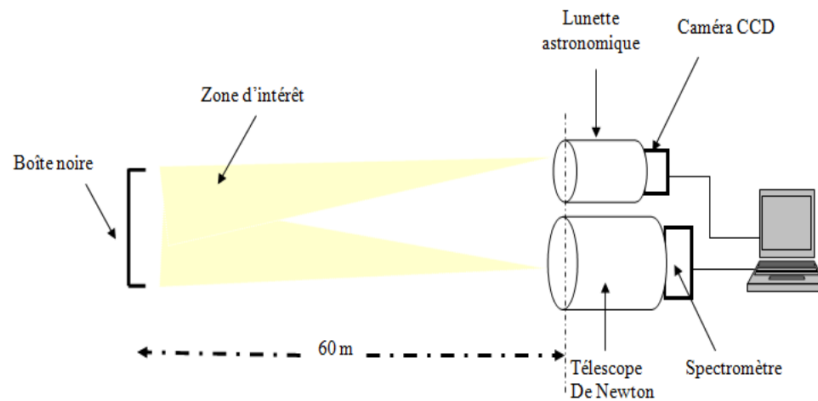


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental. Mesure spectroscopique par télédétection

### 2-1-2. Mesure de la fréquence de vibration des ailes des insectes

Le montage expérimental précédent est utilisé. Le spectromètre est remplacé par un détecteur à quatre quadrants. Un convertisseur analogique-numérique USB 6009 est utilisé comme point d'interconnexion entre l'ordinateur et le détecteur quatre quadrants.

### 2-2. Méthode d'analyse des données

Pour le traitement des données un programme a été écrit avec le logiciel de programmation Matlab. Ce programme est fondé sur les **Formules** ci-dessous :

$$R = \frac{I_R - I_B}{I_{ref} - I_B} \quad (1)$$

$I_{ref}$ : intensité lumineuse de référence ;  $I_B$ : intensité lumineuse du bruit de fond ;  $I_R$ : intensité lumineuse rétrodiffusée ;  $R$ : réflectance.

$$OCS = \frac{I_R - I_B}{I_{ref} - I_B} (S) \quad (2)$$

$S$ : Surface de la bille de référence ;  $OCS$ : Section efficace

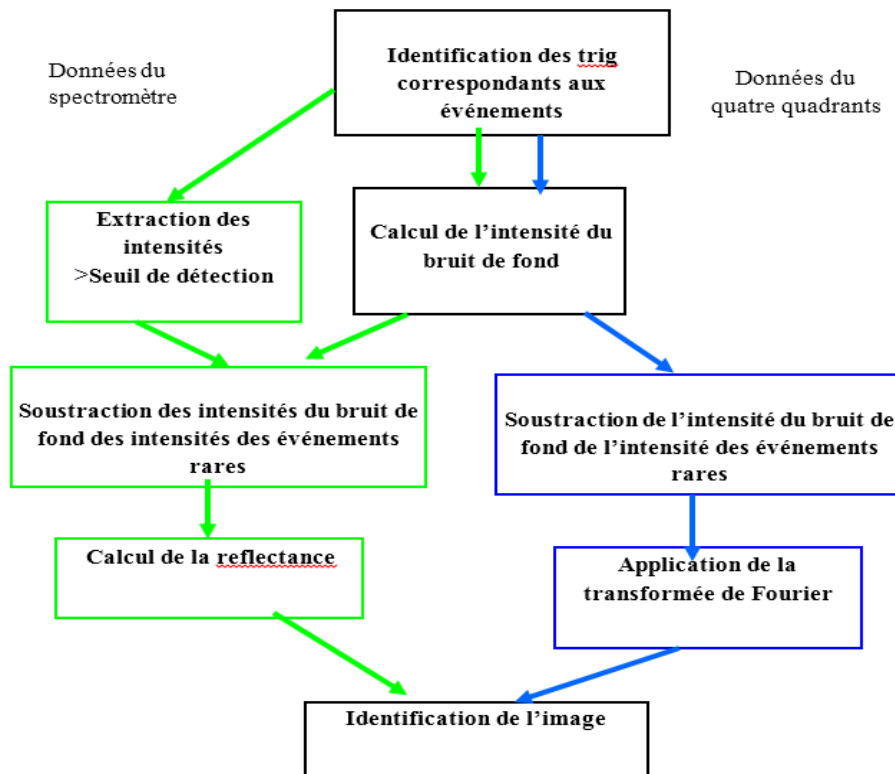


Figure 2 : Algorithme d'analyse des données

### 3. Résultats et discussion

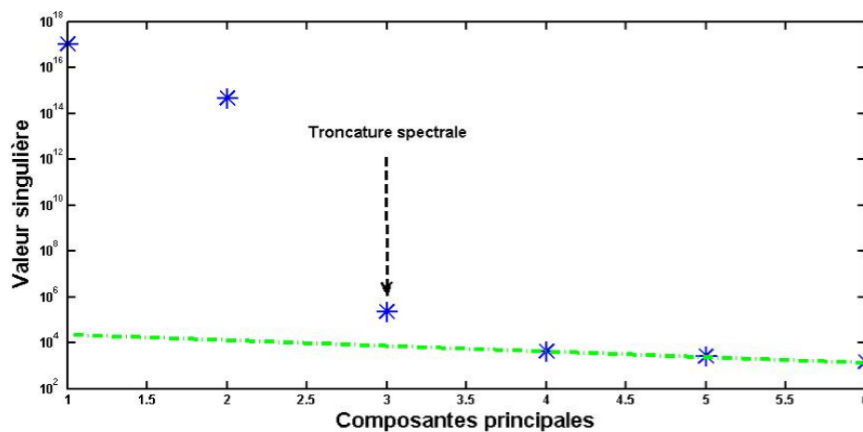


Figure 3 : Décomposition en valeur singulière de 6 spectres de réflectance

La décomposition en valeur singulière montre que seules les trois premières composantes spectrales sont significatives. Les composantes principales se situant sur la ligne verte sont dues aux bruits [8]. Les particules de poussières atmosphériques qui diffusent la lumière dans la zone d'intérêt sont la cause de ces bruits. Car les bruits de fond ont été soustraits lors du calcul de la réflectance. La classification hiérarchique (Figure 4) permet de regrouper les différents insectes en classes. Selon les travaux de [8] le nombre de classes peut être identique, voir supérieur au nombre de composantes principales significatives.

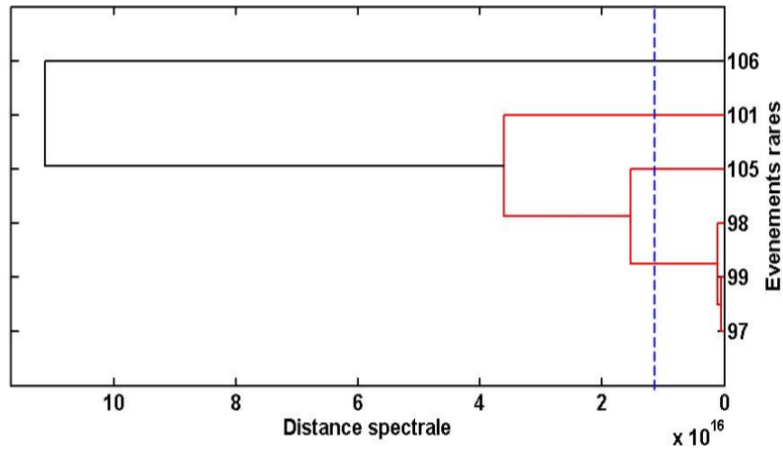


Figure 4 : Classification hiérarchique des insectes

Pour une meilleure appréciation du nombre de classes, une matrice de corrélation (Figure 5) a été établie.

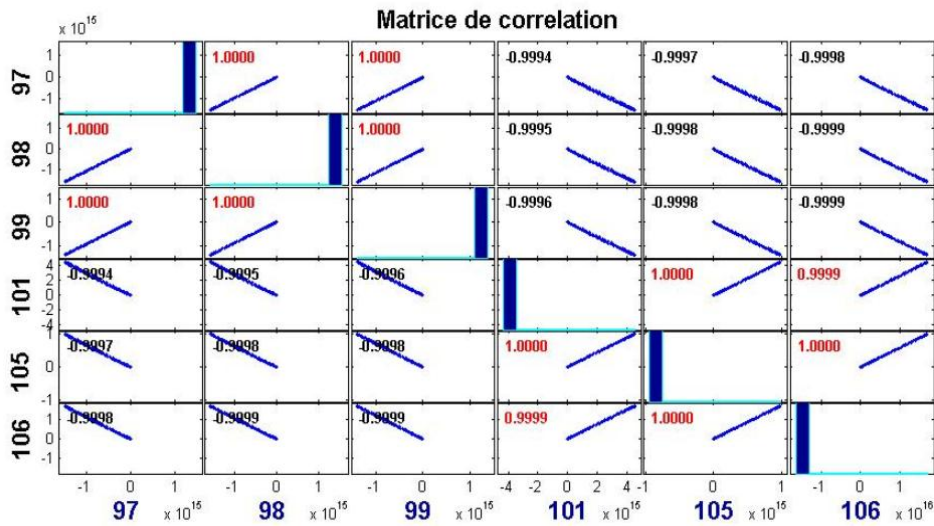


Figure 5 : Matrice de corrélation entre les différentes signatures spectrales des insectes. Les éléments de la diagonale principale représentent l'histogramme des intensités de réflectance

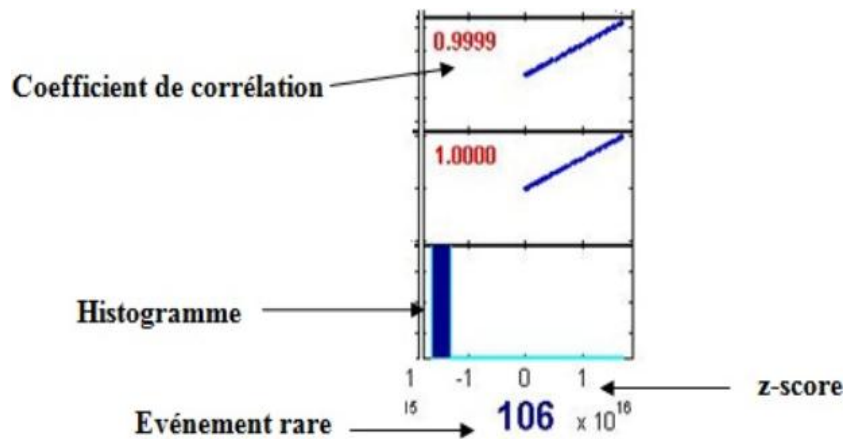
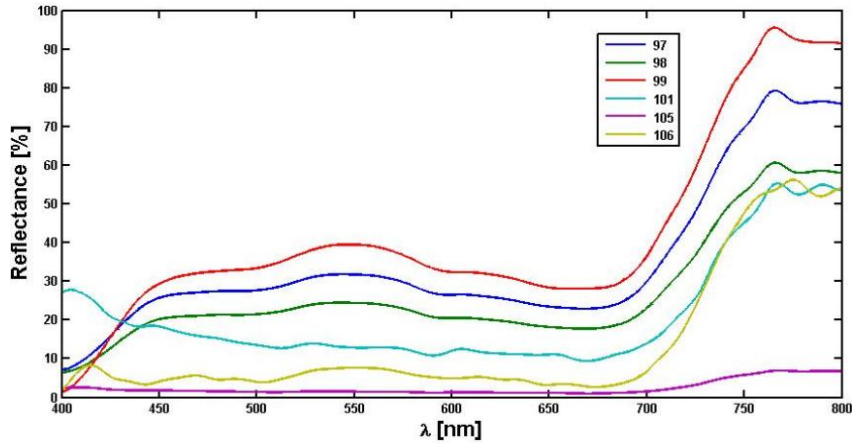


Figure 6 : Éléments caractéristiques de la matrice de corrélation

Les coefficients de corrélations en rouge montrent qu'il y'a une corrélation entre chaque spectre de réflectance. Les événements 97, 98, 99 sont des insectes ayant une même mélanine et par conséquent constituent une classe. Les événements 101, 105, 106 semblent appartenir à une même classe. Les z-scores étant négatifs, cela signifie que les grandeurs mesurées s'écartent des valeurs cibles et par conséquent ces insectes ne peuvent appartenir à une même classe [9] (*Figure 4*). La réflectance de ces insectes est représentée sur la *Figure 7*.

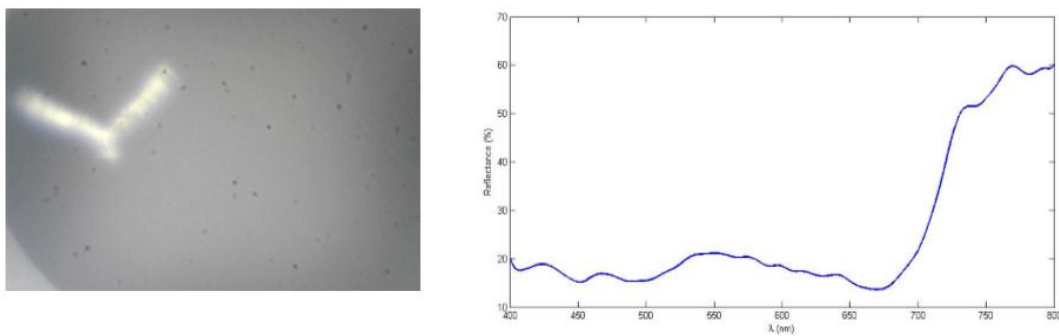


**Figure 7 : Réflectance d'insectes**



*a) Événements 97, 98, 98      b) Événement 105      c) Événement 106*

**Figure 8 : Détection spatiale des événements. L'événement 101 n'a pu être associé à aucune image**



**Figure 9 : a) Détection spatiale de l'évènement ; b) Spectre de l'évènement 1**

Le spectre de réflectance présente une forte réflectance entre 750 nm et 800 nm. Cela pourrait être un élément caractéristique du genre de cet oiseau. Les points d'absorptions observés entre 600 nm et 700 nm sont dus à la mélanine. Les points d'absorption de la mélanine étant différents révéleraient une nuance de couleur du pelage de l'oiseau.

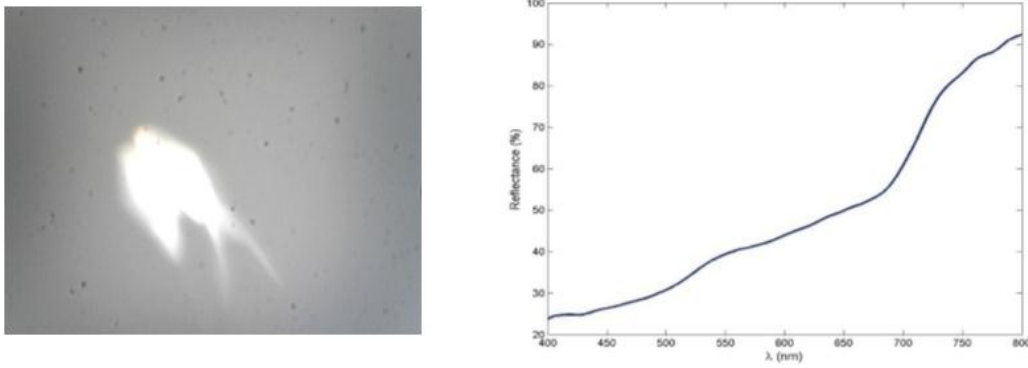


Figure 10 : Spectre de réflectance d'une hirondelle passée dans la zone d'intérêt

Des mesures de différenciations ont été effectuées sur des *zonocerus variegatus* mâle et femelle capturés et relâchés dans la zone d'intérêt. Le sexe des *zonocerus variegatus* a été au préalable identifié grâce aux informations fournies par les entomologistes. Nous obtenons les signatures spectrales ci-dessous (Figure 11, Figure 12):

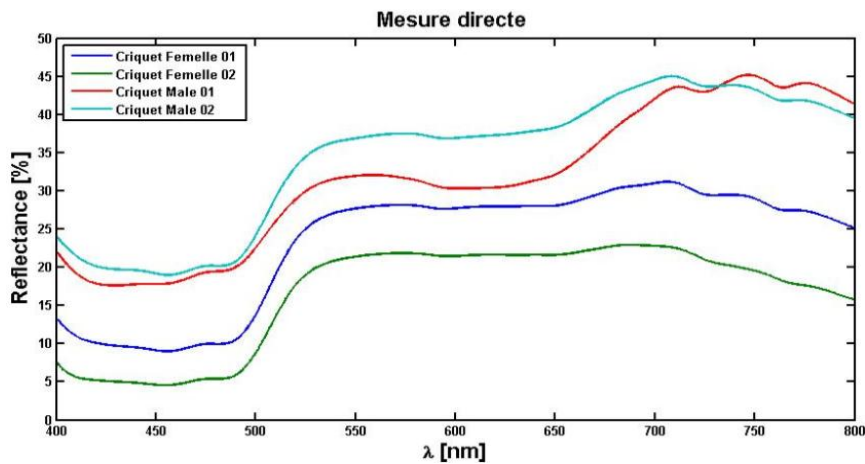


Figure 11 : Réflectance de *zonocerus variegatus* mâle et femelle par spectroscopie directe. Ces spectres ont été mesurés au laboratoire en utilisant une fibre optique et un spectromètre. Ces insectes sont fixés sur une planche. La fibre optique, connectée à l'ordinateur, est rapprochée de l'insecte pour acquérir son spectre

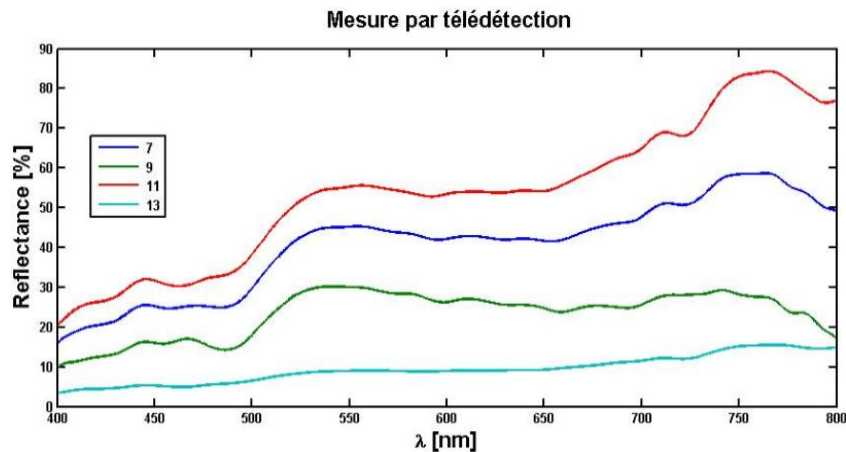
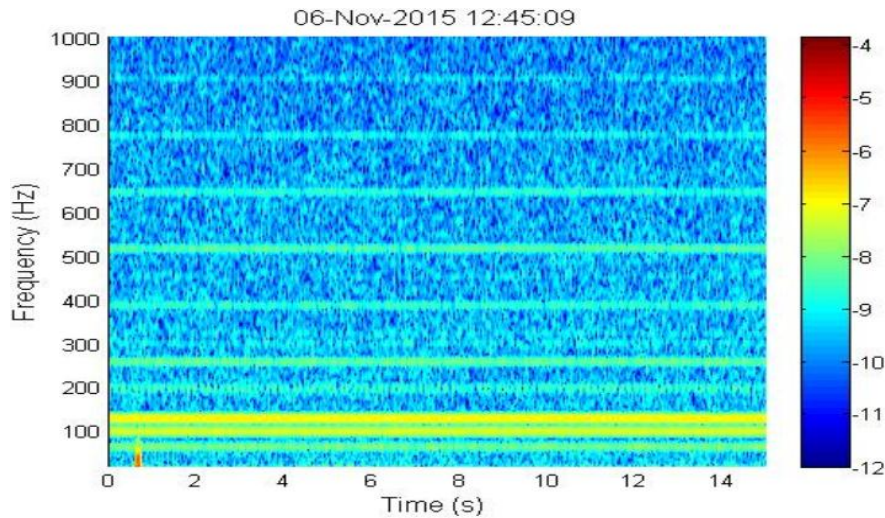


Figure 12 : Mesure par spectroscopie par télédétection

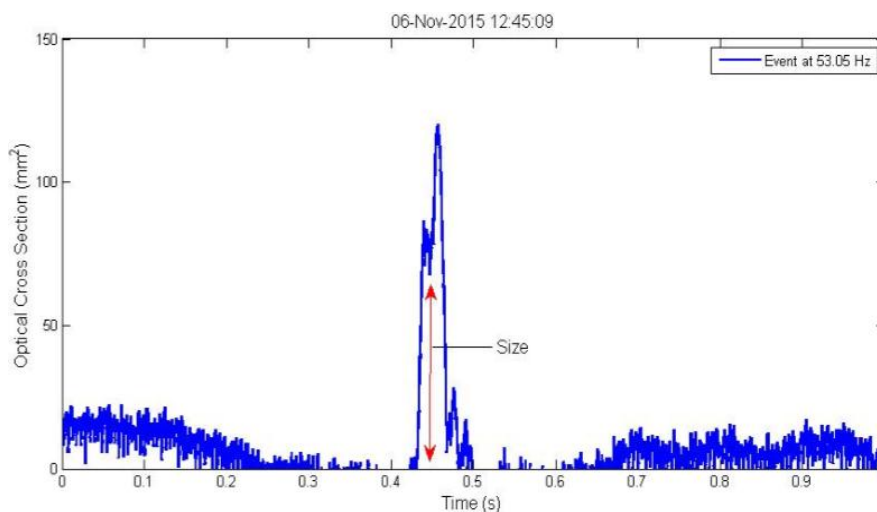


Nous observons une similarité entre les mesures par télédétection et les mesures par spectroscopie directe. Le spectre 13 est un spectre d'un autre insecte passé dans la zone d'intérêt.



**Figure 13 :** Fréquence de vibration des ailes de *tettigonia viridissima*

La fréquence de vibration des ailes du *tettigonia viridissima* est environ 53.04 Hz



**Figure 14 :** Section efficace du *tettigonia viridissima*. La section est environ 69.41 mm<sup>2</sup>

#### 4. Conclusion et perspectives

Le dispositif expérimental que nous avons proposé ainsi que la stratégie d'analyse des données a permis de caractériser des insectes volants par leurs signatures spectrales, par les fréquences de vibration de leurs ailes ainsi que par leur image. Le fort taux de réflectance (> 50 %) observé montre que ces espèces réfléchissent parfaitement les rayons du soleil. Il conviendrait d'exploiter cette technique pour identifier les insectes nuisibles aux cultures vivrières en vue d'une lutte ciblée. Pour les études futures, un filtre sera intégré à la caméra pour améliorer le contraste de l'image.

### **Remerciements**

*Nous voulons remercier l'Université d'Uppsala en Suède pour avoir financé ce travail au travers de son service de coopération internationale (International Science Program, Uppsala University), ainsi que nos partenaires de l'Université de Lund (Suède) qui nous ont aidés à monter le dispositif expérimental.*

### **Références**

- [1] - E. C. OERKE, H. W. DEHNE, F. SCHÖNBECK, A. WEBER, Crop production and crop protection. Elsevier science, Amsterdam, (1994).
- [2] - T. ALAUX, J. M. VASSAL, M. VAISSAYRE, Suivi de la sensibilité aux pyréthrinoides chez *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera : Noctuidae) en Côte d'Ivoire. J. Afr. Zool, 111 (1) (1997) 63 - 69 p.
- [3] - [http : //observatoire-agricole-biodiversite.fr/sites/oab.mnhn.fr/files/upload/attached/document\\_de\\_synthese\\_indicateurs\\_de\\_biodiversite\\_en\\_milieu\\_agricole.pdf](http://observatoire-agricole-biodiversite.fr/sites/oab.mnhn.fr/files/upload/attached/document_de_synthese_indicateurs_de_biodiversite_en_milieu_agricole.pdf)
- [4] - V. A. DRAKE, D. R. REYNOLDS, Radar entomology : Observing Insect Flight and Migration. Ed. C.A.B International, (2012).
- [5] - M. BRYDEGAARD, Z. GUAN, M. WELLENREUTHER et S. SVANBERG, Insect monitoring with fluorescence lidar techniques : feasibility study, (2009).
- [6] - Z. GUAN, M. BRYDEGAARD, P. LUNDIN, M. WELLENREUTHER, A. RUNEMARK, E. I. SVENSSON et S. SVANBERG, Insect monitoring with fluorescence lidar techniques : field experiments, (2010).
- [7] - L. MEI, Z. G. GUAN, H. J. ZHOU, J. LY, Z. R. ZHU, J. A. CHENG, F. J. CHEN, C. LÖFSTEDT, S. SVANBERG, G. SOMESFALEAN, Agricultural pest monitoring using fluorescence lidartechniques : feasibility study, (2011).
- [8] - A. RUNEMARK, M. WELLENREUTHER, H. HIRAN, E. JAYAWEERA, S. SVANBERG and M. BRYDEGAARD, Rare Event in Remote Dark-Field Spectroscopy : An Ecological Case Study of Insects, (2012).
- [9] - Z. ALBE, T. S. HASSANI, D. KASSELER, A. DEOM, Fiche technique : 24. Paramètres statistiques utilisés dans les rapports de CQE, (2009).

# Entomological Scheimpflug lidar for estimating unique insect classes *in-situ* field test from Ivory Coast

BENOIT K. KOUAKOU,<sup>1,\*</sup>  SAMUEL JANSSON,<sup>2,3</sup> MIKKEL BRYDEGAARD,<sup>2,3</sup> AND JEREMIE T. ZOUEU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Instrumentation, Image et Spectroscopie (UMRI-78), Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, BP1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>Lund Laser Center, Department of Physics, Lund University, Sölvegatan 14, Lund, Sweden

<sup>3</sup>Center for Animal Movement Research, Department of Biology, Lund University, Sölvegatan 35, Lund, Sweden

\*[benoitkouakou@gmail.com](mailto:benoitkouakou@gmail.com)

**Abstract:** Acquisition of entomological data with high-frequency lidar is an emerging research field in rapid development. The technique offers very high numbers of observations per time unit, suitable for statistical models. In this work, we use a near-infrared Scheimpflug lidar with a sampling frequency of 3.5 kHz to assess the activity of free flying organisms. *In-situ* measurements were done during the rainy season in Ivory Coast, and hierarchical cluster analysis was used to quantify the amount of unique modulation signatures. Here we propose a method to estimate the number of observed species within a certain air volume for a given time span. This paves the way for rapid *in-situ* biodiversity assessment in accordance with recent priorities for protection of pollinator diversity during global changes.

© 2020 Optical Society of America under the terms of the [OSA Open Access Publishing Agreement](#)

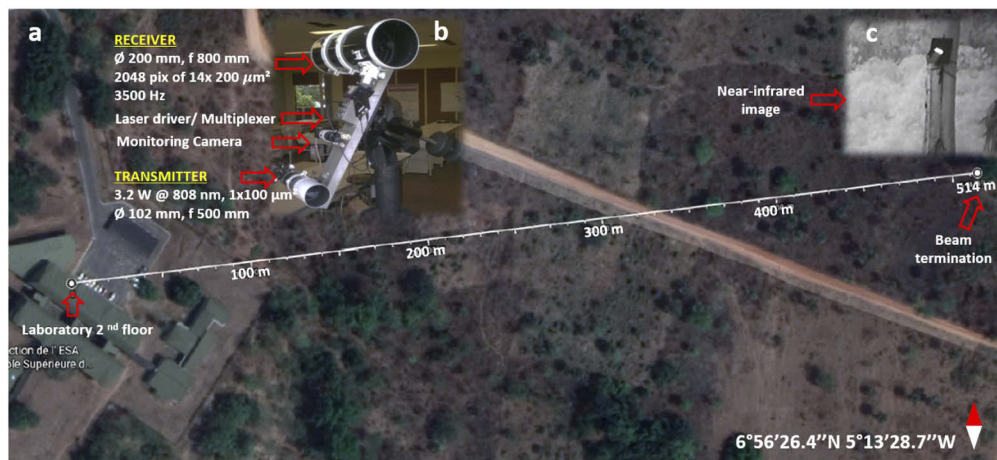
## 1. Introduction

Apart from daily and seasonal dynamics, weather and climate phenomena are known to influence insect populations, behavior and activity [1,2]. As a result of these dynamics, it is challenging to obtain a representative inventory of the insect population [3]. Moreover, inaccurate abundance estimates cause an excessive use of pesticides which is harmful to the ecosystems. Insecticides and in particular neonicotinoid-based pesticides have been shown [4–6] to reduce biodiversity of natural pollinators with implications for the pollination of a long list of crops. Insecticides could also affect other beneficial insects and biomarkers of climate change [7,8]. For minimal and strategic use of pesticides in agricultural plantations, and for the purpose of estimating the impact of pesticides and climate change on the insect biodiversity, it is important to develop instrumentation and statistical methods to provide rapid assessment of insect diversity *in-situ*. One of the major challenges is to assess and control insect activity and population dynamics in agricultural plantations. Current entomological trapping methods to acquire insect samples are time-consuming [9]. To overcome this shortcoming, different technologies have been developed for insect monitoring, such as entomological radar [10] and lidar [11,12]. Low-cost instrumentation based on passive remote sensing spectroscopy have also been developed [13–15]. Recently, the Scheimpflug lidar technique [16] was developed to investigate aerofauna. In this work, we used a Scheimpflug lidar system with multivariate analysis methods to classify insects by their wing-beat modulation and evaluate their numbers.

## 2. Material and methods

### 2.1. Site, instrumentation and data acquisition

We used an entomological Scheimpflug lidar of similar configuration as in previous reports [17–20]. The instrument used in this study was placed in the laboratory, second floor at  $6^{\circ}56'26.4''\text{N } 5^{\circ}13'28.7''\text{W}$ , see Fig. 1. A refractive telescope ( $f = 500\text{ mm}$ ,  $\phi 102\text{ mm}$ ) was used to expand the light transmitted by a  $3.2\text{ W}$  multimode laser diode with a center wavelength of  $808\text{ nm}$ . The beam was transmitted across the landscape and terminated on a board covered with black neoprene foam ( $1.8\%$  diffuse reflectance at  $808\text{ nm}$ ). At the termination, the laser spot was  $20\text{ cm}$  wide and  $1\text{ cm}$  high. The board was fixed at a height of  $6\text{ m}$  to a tree located  $514\text{ m}$  from the lidar system ( $6^{\circ}53'30.1''\text{N } 5^{\circ}13'13.4''\text{W}$ ). Backscattered light was collected with a Newtonian telescope ( $f = 800\text{ mm}$ ,  $\phi 200\text{ mm}$ ) and focused onto a CMOS line sensor with  $2048$  pixels ( $14 \times 200\ \mu\text{m}^2$  pixel size) and a 16-bit dynamic span. An RG780 absorption filter and a  $3\text{ nm}$  FWHM band pass filter centered at  $808\text{ nm}$  was used to suppress background light. The receiving and expanding telescopes were mounted with a separation distance of  $814\text{ mm}$  on a baseline attached to a tripod. The CMOS sensor was tilted at an angle of  $45^{\circ}$  relative to the optical axis of the receiver telescope. The laser diode and the CMOS sensor were connected to a combined time multiplexer and laser driver. This module allowed the laser to be transmitted either in modulated mode or in continuous mode. In modulated mode, a strobe signal was sent from the detector to a multiplexer which alternately switched the laser on and off for odd and even sensor line exposures. The sensor line rate was  $3.5\text{ kHz}$ , implying that the background signal and the backscattered signal were sampled at  $1.75\text{ kHz}$  each, enabling online background subtraction. The laser beam and the linear camera were aligned on the black neoprene sheet. The use of the black termination prevented detector saturation and minimized stray light from interfering with the monitored air transect. The acquired data was stored in files spanning  $10$  seconds, each containing  $35000$  lines exposures.



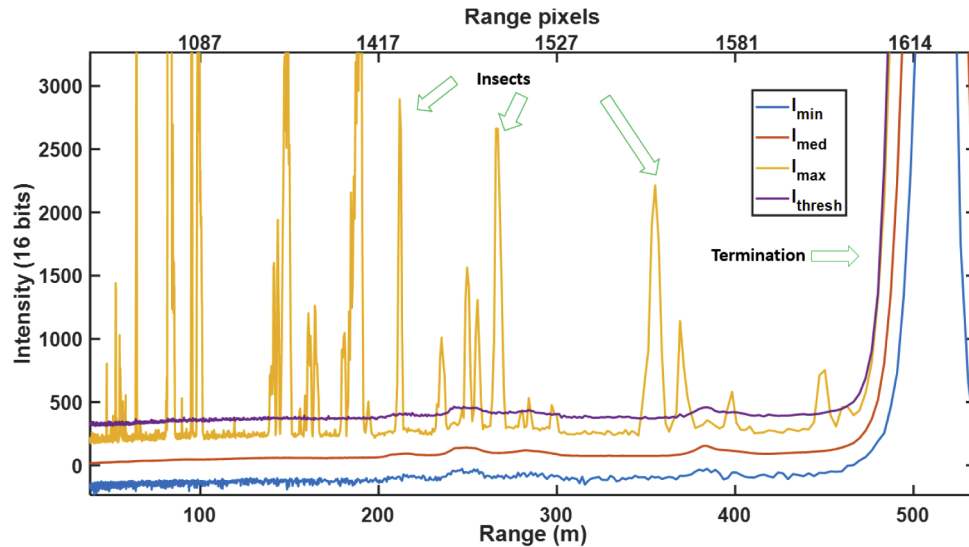
**Fig. 1.** (a) Aerial photograph of the measurement location. Light is transmitted from the lidar on second floor of a building,  $6\text{ m}$  above ground, and terminated in a neoprene target mounted in a tree  $514\text{ m}$  from the lidar system. (b) Photograph of the Scheimpflug lidar and its components. The line sensor in the Newtonian receiver is tilted  $45^{\circ}$  off the optical axis to fulfill the Scheimpflug criterion and achieve infinite focal depth. (c) Near infrared photograph through the monitor telescope. The termination- and atmospheric trace of the invisible beam is displayed. The vegetation background is bright in the near infrared wavelength regime.

## 2.2. Event extraction and calibration

An algorithm was used to extract insect signals from the raw data files [21]. In the first step, the background signal,  $I_{off}(r, t)$ , was identified through linear interpolation of the time slots when the laser was turned off.  $I_{off}(r, t)$  was subtracted from the backscattered signal  $I_{on}(r, t)$ , yielding a 2D time-range intensity map,  $I(r, t)$ . The lidar sensitivity varies with range, and therefore a range-dependent intensity threshold for finding signals corresponding to insect observations was set according to Eq. (1). The threshold was based on the static median signal from the air,  $I_{median}(r)$ , and the interquartile range,  $I_{IQR}(r)$ , of the signal in each range pixel in a data file. The IQR has units of intensity counts and reflects the symmetric Gaussian read-out noise amplitude ( $3.5 \text{ IQR} = 1 \text{ noise amplitude}$ ). In this study, we chose to consider observations deviating from static signal by at least a factor of  $Trsh = 5 \text{ IQRs}$ , alternatively a minimum 1.43 signal-to-noise ratio (SNR).

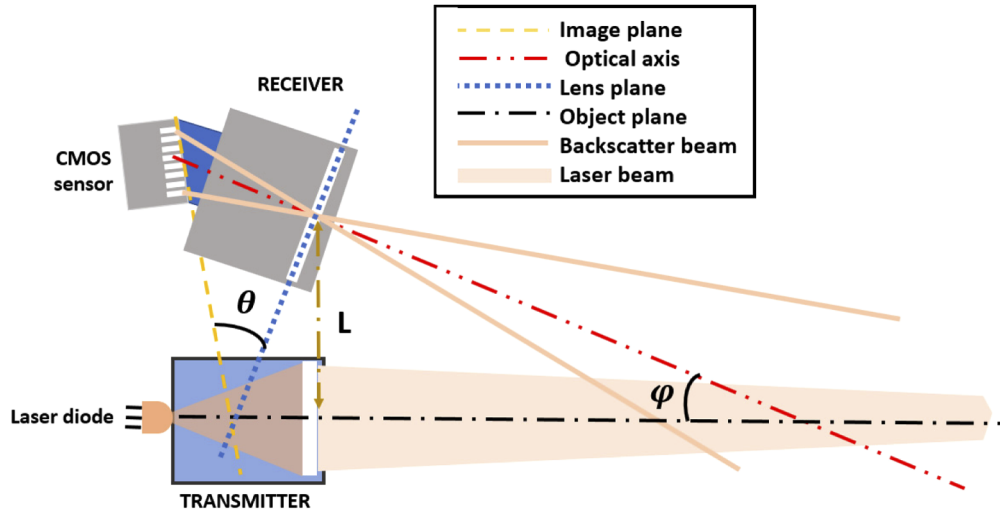
$$I_{threshold}(r) = I_{median}(r) + Trsh * I_{IQR}(r) \quad (1)$$

Intensities exceeding the threshold were extracted and further evaluated as insect observations (Fig. 2). The distance or range to an insect,  $r$ , was obtained by Eq. (2), derived from the geometrical design of the instrument and the constraints of the Scheimpflug condition and the Hinge rule [17]. The Scheimpflug lidar principle is illustrated in Fig. 3.



**Fig. 2.** Statistical representation of a ten second data file. For every range pixel the temporal minimum, median, maximum and resulting detection threshold is shown. The median value is insensitive to short and high-intensity occurrences such as insects flying through the beam, and represents the reflectance of the air between the lidar system and the termination. The signal spikes exceeding the threshold are interpreted as insects flying through the beam, and further evaluated.

The known distance and reflectance of the black termination was used to calibrate the backscatter optical cross section of insects (Fig. 4),  $\sigma_{insect}$ , according to Eq. (3). For more information, see [22]. A total of 11965 insect observations were found in the raw data and parameterized.



**Fig. 3.** Illustration of the Scheimpflug principle. Despite the large aperture, a sharply focused image along the entire laser beam can be obtained when the lens plane is tilted and intersects with the object plane and the image plane of the sensor. The sensor is tilted with an angle  $\theta=45^\circ$  relative to the lens plane. The separation distance between transmitter and receiver is  $L = 814$  mm and the swing angle of the lens is  $\varphi \approx 1^\circ$ .

$$r_J = \frac{L[P_J(\sin \theta - \cos \theta * \tan \varphi) + f]}{P_J(\cos \theta + \sin \theta * \tan \varphi)} \quad (2)$$

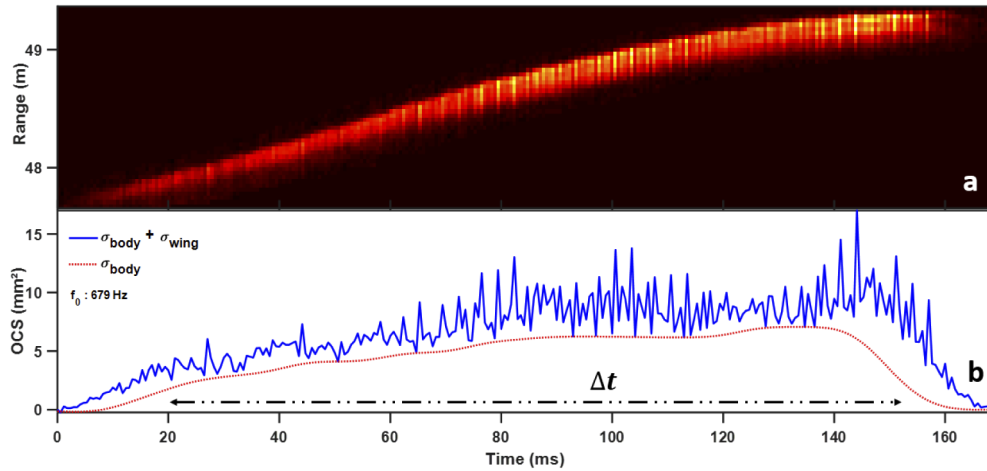
$P_J$	Pixel position from the optical axis on the sensor plane (m)
$J$	Pixel index (#)
$f$	Receiver focal length (m)
$L$	Separation distance between the receiver and the transmitter (m)
$\theta$	Sensor tilt angle ( $^\circ$ )
$\varphi$	Swing angle ( $^\circ$ )

$$\sigma_{insect} = \frac{\sigma_{term} r_{insect}^2 (I_{insect} - I_{static})}{r_{term}^2 I_{static}} \quad (3)$$

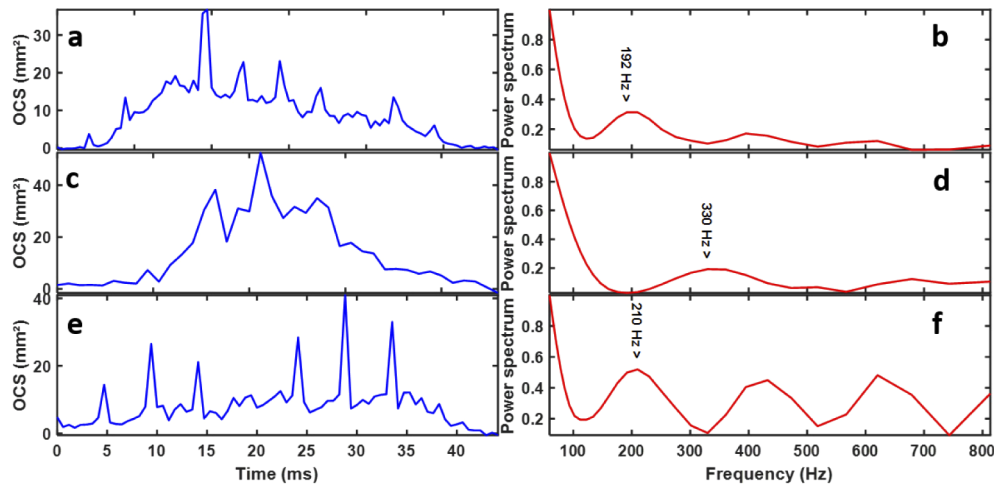
$\sigma_{term}$	Known optical cross section of the black neoprene termination target ( $mm^2$ )
$I_{insect}$	Insect signal (16 bit)
$I_{static}$	Static signal from homogeneous atmosphere (16 bit)
$r_{insect}$	Detection distance of the observed insect (m)
$r_{term}$	Termination distance of the beam (m)

### 2.3. Modulation spectra, unsupervised clustering and classification processing

The transit time,  $\Delta t$ , i.e. the amount of time each observed insect remained in the probe volume, was obtained. A threshold was set to include observations with 23 ms transit times or longer. This corresponded to signals with at least 40 times samples and included 80% of the observations. A frequency vector with 40 bins was defined, evenly spaced between the lowest observable frequency during a 23 ms transit (43 Hz) and the highest observable frequency defined by the Nyquist frequency (875 Hz). The modulation power in these frequency bins was calculated and auto-normalized for all observations using Welch's method [23,24], see selected examples in Fig. 5.



**Fig. 4.** (a) Time-range map of a presumed male Anopheline mosquito observed moving through the lidar transect after sunset. (b) Optical Cross Section (OCS) time series of the observed insect, obtained by integrating the intensities in (a). The oscillatory component arises from light reflected in the insect wings, and the non-oscillatory contribution comes from the body. The transit time,  $\Delta t$ , corresponds to the time the insect spent in the laser beam. This particular insect flapped its wings with a wing-beat frequency  $f_0 = 679$  Hz.

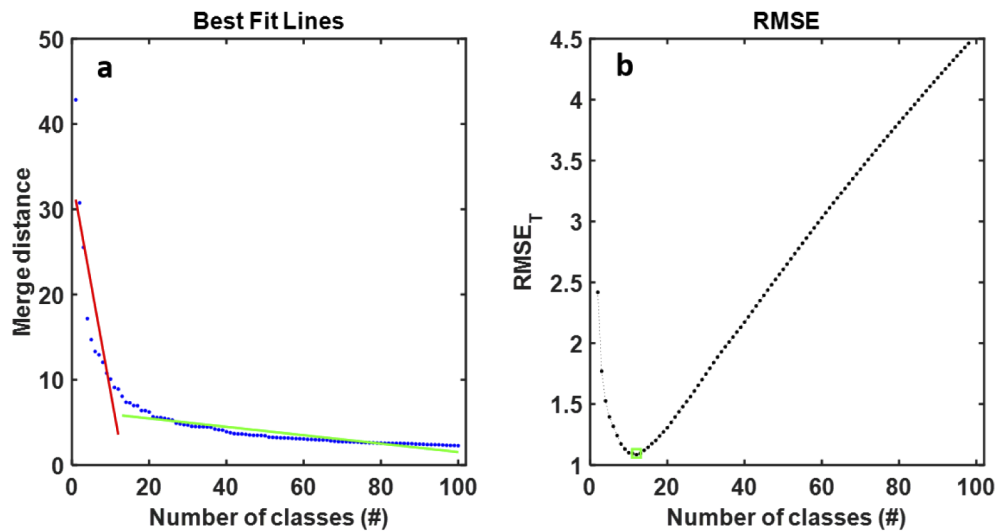


**Fig. 5.** Optical cross sections and modulation power of free flying insects. (ace) Examples of time series obtained from insects flying through the laser beam. Peaks correspond to specular reflexes in the insect wing membranes and appear periodically due to the insects flapping their wings. (bde) Power spectra of the time series in ace, with the modulation power calculated at 40 frequencies bins. Insects species were sorted according to the similarity of the modulation spectra using hierarchical clustering. To classify the 11965 observations, the Euclidean distance between combinations of observations in the 40-dimensional parameter space of auto-normalized and logarithmized modulation power was calculated.

An important step in cluster analysis is evaluating the appropriate number of clusters. Many decision criteria have been devised based on knowledge of the data structure and partitioning [25–28]. In the present study, the number of clusters was evaluated using an efficient knee point detection method [29], called the L-method. The L-method was applied to the Euclidean merging distances,  $y$ , between the pairs of the most distinct auto-normalized and logarithmized modulation power spectra in the clusters (Fig. 6). Each point was presumed to be a possible knee. A pair of linear fits,  $\hat{y}$ , to the left and right of each possible knee point was created (Fig. 6(a)). The root-mean-square error to the left and right of each knee point,  $rmse_L$  and  $rmse_R$ , were calculated according to equation Eq. (4). The linear pair that minimized the total root-mean-square error,  $RMSE_T$ , (Eq. (5)) was selected [30,31], corresponding to the appropriate number of clusters ( $\alpha$ ). The maximum number of clusters ( $\beta$ ) was set to 100.

$$rmse = \left( \frac{\sum_1^C (y - \hat{y})^2}{C} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$RMSE_T = \frac{\alpha - 1}{\beta - 1} rmse_L + \frac{\beta - \alpha}{\beta - 1} rmse_R \quad (5)$$

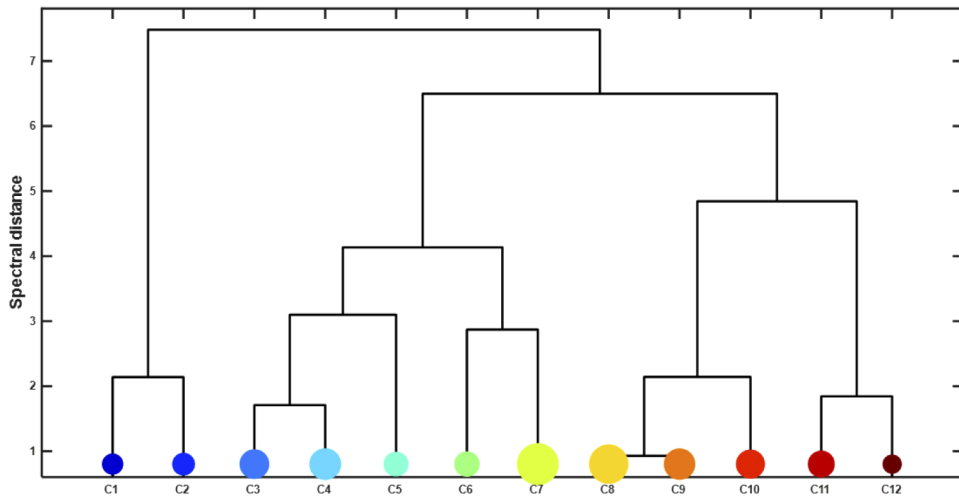


**Fig. 6.** (a) Merge distance as a function of number of clusters. This graph shows a decision boundary of the number of appropriate clusters. The maximum number of clusters was arbitrarily set to 100. (b) The best number of clusters is given by the minimum value of the total  $RMSE_T$ . In this study the number of appropriate clusters was 12.

After selecting the number of clusters, the calculated power spectra of all observed insects were sorted into 12 groups based on similarity of their modulation spectra using hierarchical clustering. The 12 groups are displayed in Fig. 7.

Figure 8 displays the 12 centroid spectra of the dendrogram branches presented in Fig. 7. Centroids of the power spectra and insect size distributions were obtained for each cluster, and the wing beat frequency (WBF) of each centroid is also indicated when applicable. The WBF is not clearly discernable in clusters C7-C12. These clusters may correspond to larger organisms with WBFs below the lowest observable frequency (43 Hz), which is limited by insect transit times. The apparent uneven spacing between tones in C3 and C5 are due to frequency folding in the Nyquist frequency (875 Hz). This is a sampling artifact which would not appear if the

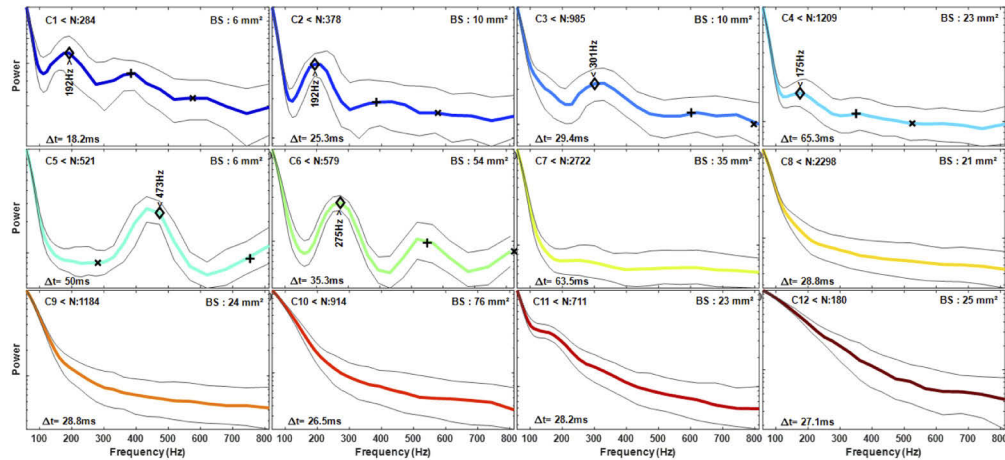




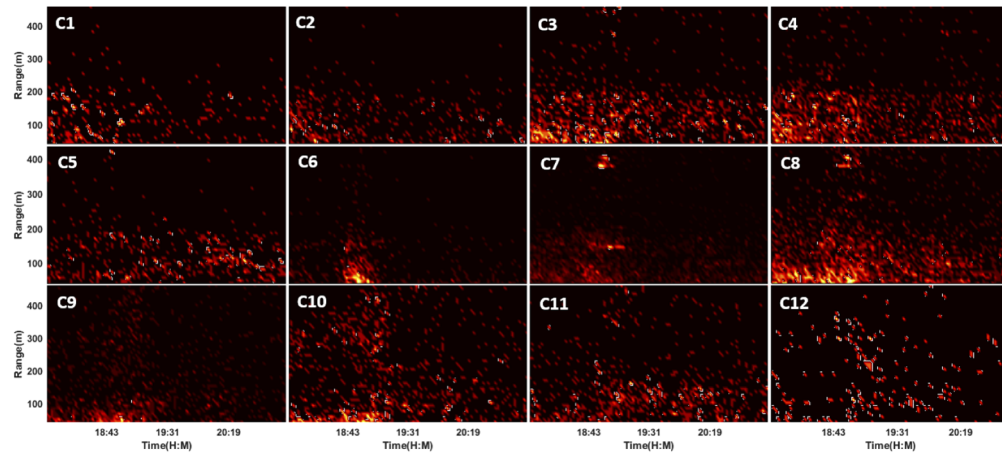
**Fig. 7.** Dendrogram of the 12 clusters, showing the resemblance between them. For example, clusters C8 and C9 are most similar because the height of the link that joins them is the smallest. The size of the colored circles reflects the number of observations assigned to each cluster.

sample rate was higher. Folded tones can be superimposed on top of lower tones, or in some cases appear in the reverse order.

The activity level in time and space of all clusters is shown in Fig. 9. Though most clusters exhibit peak activity in relation to sunset (~18:50 local time), distinct patterns can be observed for several clusters.



**Fig. 8.** Centroid spectra of the 12 clusters. The average body cross section of the clustered insects is indicated by *BS* in all subfigures. *N* denotes the number of observed insects in each cluster. Diamonds indicate the fundamental tones in each centroid power spectrum. This can give clues on the insect species identity. For example, in cluster C3 and C5, the fundamental tones are respectively 330 Hz and 433 Hz, and are presumably female mosquitoes. The second harmonics are indicated by the plus sign and the third harmonics by crosses. The gray lines indicate the within-group interquartile range.



**Fig. 9.** 2D time-range histograms of insect cluster activity during the evening. The time scale is the same for the subfigures associated to each cluster. Sunset activity of insects is seen along the probe volume of the beam.

### 3. Conclusion

We have demonstrated a method of unsupervised classification of insect lidar targets *in-situ*. During a limited time interval, we were able to evaluate the number of unique modulation signatures in the data set. We used the L-method, or knee test, to estimate the appropriate number of insect classes. Although simplistic, the knee-test is a relatively well-known method, and we consider this an important first step towards developing an *in-situ* method for insect diversity assessment. For the testing time of 3 hours we counted 11965 insects in a probe volume of approximately  $2 \text{ m}^3$ . The L-method knee test estimated 12 unique modulation signatures. We expect the actual number of insect species present in the probe volume to be much higher than 12, which could be evaluated with traps or truck-mounted sweep-net drives in future studies. Other information criteria than the L-method may yield a different number of clusters. However, we do expect such numbers to reflect the diversity of insect species. This test demonstrates the possibility to assess the number of unique insect species *in-situ*, and therefore paves the way for a rapid objective metric of biodiversity without the biases and demanding assessment by a broad range of insect traps. The properties of the insect clusters, such as the optical cross section and wing-beat frequency with associated overtone spectra provide clues on the species identity of the counted groups. Topographic preferences in detection distance and time preferences of different clusters may provide enough information for qualified species estimation based on known behavior and information on prevalent species in the area. Information on timing and location of insects may also be used improve strategic pest management and thus contribute to pollinator survival.

### Funding

Uppsala Universitet; Vetenskapsrådet.

### Acknowledgments

The authors would like to thank Elin Malmqvist and Alexandra Andersson from Lund University for technical assistance in Yamoussoukro, Ivory Coast. We also extend our thanks all the members of the laboratory in Ivory Coast for their assistance.

## Disclosures

The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. J. A. Patz, T. K. Graczyk, N. Geller, and A. Y. Vittor, "Effects of environmental change on emerging parasitic diseases," *Int. J. Parasitol.* **30**(12-13), 1395–1405 (2000).
2. J. A. Patz, P. Daszak, G. M. Tabor, A. A. Aguirre, M. Pearl, J. Epstein, N. D. Wolfe, A. M. Kilpatrick, J. Foutopoulos, D. Molyneux, D. J. Bradley, F. P. Amerasinghe, R. W. Ashford, D. Barthelemy, R. Bos, D. J. Bradley, A. Buck, C. Butler, E. S. Chivian, K. B. Chua, G. Clark, R. Colwell, U. E. Confalonieri, C. Corvalan, A. A. Cunningham, J. Dein, A. P. Dobson, J. G. Else, J. Epstein, H. Field, P. Furu, C. Gascon, D. Graham, A. Haines, A. D. Hyatt, A. Jamaluddin, E. F. Kleinau, F. Koontz, H. S. Koren, S. LeBlancq, S. Lele, S. Lindsay, N. Maynard, R. G. McLean, T. McMichael, D. Molyneux, S. S. Morse, D. E. Norris, R. S. Ostfeld, M. C. Pearl, D. Pimentel, L. Rakototiana, O. Randriamanajara, J. Riach, J. P. Rosenthal, E. Salazar-Sanchez, E. Silbergeld, M. Thomson, A. Y. Vittor, L. Yameogo, and V. Zakarov, "Unhealthy landscapes: Policy recommendations on land use change and infectious disease emergence," *Environ. Health Perspect.* **112**(10), 1092–1098 (2004).
3. F. Velay, J. P. Baudoin, and G. Mergeai, "Caractérisation du savoir paysan sur les insectes nuisibles du pois d'Angole (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) dans le Nord de l'Ouganda," *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **5**(2), 105–114 (2001).
4. N. Forfert, A. Troxler, G. Retschnig, L. Gauthier, L. Straub, R. F. A. Moritz, P. Neumann, and G. R. Williams, "Neonicotinoid pesticides can reduce honeybee colony genetic diversity," *PLoS One* (2017).
5. D. Gibbons, C. Morrissey, and P. Mineau, "A review of the direct and indirect effects of neonicotinoids and fipronil on vertebrate wildlife," *Environ. Sci. Pollut. Res.* **22**(1), 103–118 (2015).
6. G. R. Williams, A. Troxler, G. Retschnig, K. Roth, O. Yañez, D. Shutler, P. Neumann, and L. Gauthier, "Neonicotinoid pesticides severely affect honey bee queens," *Sci. Rep.* **5**(1), 14621 (2015).
7. M. Campero, F. Ollevier, and R. Stoks, "Ecological relevance and sensitivity depending on the exposure time for two biomarkers," *Environ. Toxicol.* **22**(6), 572–581 (2007).
8. R. Hickling, D. B. Roy, J. K. Hill, and C. D. Thomas, "A northward shift of range margins in British Odonata," *Global Change Biol.* **11**(3), 502–506 (2005).
9. J. B. Silver, *Mosquito Ecology-Field Sampling Methods* 3rd Edition (2008).
10. V. A. Drake and D. R. Reynolds, *Radar Entomology: Observing Insect Flight and Migration* (2012).
11. M. Brydegaard, Z. Guan, M. Wellenreuther, and S. Svanberg, "Insect monitoring with fluorescence lidar techniques: Feasibility study," *Appl. Opt.* **48**(30), 5668–5677 (2009).
12. Z. Guan, M. Brydegaard, P. Lundin, M. Wellenreuther, A. Runemark, E. I. Svensson, and S. Svanberg, "Insect monitoring with fluorescence lidar techniques: Field experiments," *Appl. Opt.* **49**(27), 5133–5142 (2010).
13. A. Runemark, M. Wellenreuther, H. H. E. Jayaweera, S. Svanberg, and M. Brydegaard, "Rare events in remote dark-field spectroscopy: An ecological case study of insects," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **18**(5), 1573–1582 (2012).
14. S. Jansson and M. Brydegaard, "Passive kHz lidar for the quantification of insect activity and dispersal," *Anim. Biotelemetry* **6**(1), 6 (2018).
15. M. Brydegaard, A. Merdasa, A. Gebru, H. Jayaweera, and S. Svanberg, "Realistic Instrumentation Platform for Active and Passive Optical Remote Sensing," *Appl. Spectrosc.* **70**(2), 372–385 (2016).
16. M. Brydegaard and S. Svanberg, "Photonic Monitoring of Atmospheric and Aquatic Fauna," *Laser Photonics Rev.* **12**(12), 1800135 (2018).
17. L. Mei and M. Brydegaard, "Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system," *Opt. Express* **23**(24), A1613–A1628 (2015).
18. E. Malmqvist, S. Jansson, S. Zhu, W. Li, K. Svanberg, S. Svanberg, J. Rydell, Z. Song, J. Bood, M. Brydegaard, and S. Åkesson, "The bat–bird–bug battle: Daily flight activity of insects and their predators over a rice field revealed by high-resolution scheimpflug lidar," *R. Soc. Open Sci.* **5**(4), 172303 (2018).
19. M. Brydegaard, A. Gebru, and S. Svanberg, "Super resolution laser radar with blinking atmospheric particles — application to interacting flying insects," *Prog. Electromagn. Res.* **147**, 141–151 (2014).
20. M. Brydegaard, E. Malmqvist, S. Jansson, G. Zhao, J. Larsson, and S. Török, "The Scheimpflug lidar method," *Proc. SPIE* **10406**, 104060I (2017).
21. E. Malmqvist, S. Jansson, S. Torok, and M. Brydegaard, "Effective parameterization of laser radar observations of atmospheric fauna," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **22**(3), 327–334 (2016).
22. M. Brydegaard and C. R. Lazzari, "Towards quantitative optical cross sections in entomological laser radar - Potential of temporal and spherical parameterizations for identifying atmospheric fauna," *PLoS One* **10**(8), e0135231 (2015).
23. G. W. Milligan and M. C. Cooper, "An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set," *Psychometrika* **50**(2), 159–179 (1985).
24. M. Brydegaard, S. Jansson, E. Malmqvist, Y. P. Mlacha, A. Gebru, F. Okumu, G. F. Killeen, and C. Kirkeby, "Lidar reveals activity anomaly of malaria vectors during pan-African eclipse," *Sci. Adv.* **6**(20), eaay5487 (2020).
25. O. Arbelaitz, I. Gurrutxaga, J. Muguerza, J. M. Pérez, and I. Perona, "An extensive comparative study of cluster validity indices," *Pattern Recognit.* **46**(1), 243–256 (2013).

26. S. Jansson, *Entomological Lidar Target Characterization and Field Applications* (Doctoral dissertation, Lund University, 2020).
27. D. L. Davies and D. W. Bouldin, "A Cluster Separation Measure," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **PAMI-1**(2), 224–227 (1979).
28. R. Tibshirani, G. Walther, and T. Hastie, "Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic," *J. R. Stat. Soc. Ser. B Stat. Methodol.* **63**(2), 411–423 (2001).
29. S. Salvador and P. Chan, "Learning states and rules for detecting anomalies in time series," *Appl. Intell.* **23**(3), 241–255 (2005).
30. A. Zagouras, R. H. Inman, and C. F. M. Coimbra, "On the determination of coherent solar microclimates for utility planning and operations," *Sol. Energy* **102**, 173–188 (2014).
31. A. Zagouras, A. Kazantzidis, E. Nikitidou, and A. A. Argiriou, "Determination of measuring sites for solar irradiance, based on cluster analysis of satellite-derived cloud estimations," *Sol. Energy* **97**, 1–11 (2013).

# Lidar profiling biological targets: - detection limits and dynamic range

M. Brydegaard, B. Kouakou, S. Jansson, J. Rydell, J. Zoueu

## Abstract:

Here we present recent advances and applications of profiling biological targets with Scheimpflug lidar. In particular we demonstrate applications for profiling the aerofauna and classifying various groups of species. Based on lidar data over the Ivorian countryside we investigate range dependent detection limits by comparing data with distinct sample rates and pulse energies.

**Published in:** [2020 International Conference Laser Optics \(ICLO\)](#)

**Date of Conference:** 2-6 Nov. 2020

**Date Added to IEEE *Xplore*:** 15 December 2020

**DOI:** [10.1109/ICLO48556.2020.9285848](#)

**Publisher:** IEEE

**Conference Location:** Saint Petersburg, Russia

---

# Entomological remote dark field signal extraction by maximum noise fraction and unsupervised clustering for species identification

Benoit Kouassi Kouakou<sup>\*†</sup>, Eliane Koko Nadine Assoi<sup>†</sup>, Adolphe Yatana Gbogbo<sup>†</sup> and Jeremie Zoueu<sup>†</sup>

Laboratoire d'Instrumentation, Image et Spectroscopie; Institut National Polytechnique Houphouët Boigny, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

**Keywords:** Remote sensing; spectroscopy; blind source separation; unsupervised clustering; insects

---

## 1. Summary

Characterization of flying insects *in-situ* measurement using remote sensing spectroscopy is an emerging research field. Also, most analysis techniques in remote sensing spectroscopy are based on the use of an intensity threshold which introduces indeterminacies in the number of detected specimens. In this manuscript, we investigated the possibility of analyzing passive remote sensing spectroscopy measurement data using the maximum noise fraction method. The results obtained show that this analysis technique can help to overcome the measurement of background noise in spectroscopic measurements.

## 2. Introduction

Remote sensing spectroscopy is an indirect measurement technique used to characterize aerial fauna and atmospheric particles. This measurement technique is done through instrument generally composed by reflector to collect backscattered light by object of interest, refractor to extend incident beam and sensors to measure backscattered light [1]. Several remote sensing spectroscopy instruments are been developed in recent decades to measure the spectral footprint [2,3], wing beat frequency [4], optical cross section of flies species [5,6]. These instruments are calibrated sometimes to measure fly direction [4] and detection range of insects [7,8]. These measurement instrument do not capture simultaneously image and identification parameters of the specimens studied, namely spectral footprint, wing beat frequency and optical cross section. Also, backscatter intensities due to insects are extracted using intensity threshold which sometimes omits intensities backscattered by small specimens [2]. Intensity threshold derived in conjunction of median intensities, the interquartile range of intensities and the choice of an arbitrary constant related to the signal to noise ratio of each data file has been proposed [9]. The arbitrary choice of this constant is subjective and leads to loss of information. Blind source separation methods seem to be an attractive alternative [10–12]. These information extraction techniques have been widely used in biomedical engineering, speech recognition systems and telecommunications. An extension of this technique has been proposed by some authors under the name of maximum noise fraction (MNF) [13]. In order to overcome the shortcomings of conventional indirect measurement systems, we are investigating a technique for simultaneous indirect measurement of the spectral footprint and image capture of flying specimens and analysis techniques based on the MNF for feature extraction. An unsupervised cluster analysis was done to identify insects' species.

## 3. Experimental set up and synchronous acquisition of footprint and image

The equipment is composed of two receivers a reflector (Skywatcher telescope ; D=200 mm ; F=1000 mm ; coated optic) and a refractor (Bresser Messier ; AR 90 Achromatic refractor telescope 90/900 f/10.0 ; coated optics) , mounted in parallel on an aluminum bar with a separation distance L (L=500 mm). The whole was fixed on an equatorial mount. The position of the counterweight is adjusted to determine the equilibrium position in the xy plane and in the yz plane. It is often necessary to moov on the position of the telescope to adjust the balance in the yz plane. The determination of the equilibrium point allows flexibility in the handling of the instrument. This also allows the instrument to remain fixed at low atmospheric pressures, which minimizes the margins of error in measurements.

Before any measurement, the telescope and the telescope are aligned on the black box located 1 meter above the ground, about 60 m from the experimental device (Fig. 1). This alignment phase consists of first, using an eyepiece, then a CCD camera connected to the

---

\*Author for correspondence (benoitkouakou@gmail.com).

†Present address: Laboratoire d'Instrumentation Image et Spectroscopie, Institut National Polytechnique Houphouët Boigny, BP 1093, Yamoussoukro Côte d'Ivoire

computer to observe the orifice of the black box. The alignment phase of the telescope and the telescope allows the spectral and spatial information of the flying specimen to be acquired synchronously. Once the alignment phase is complete, the CCD camera is connected to the telescope then to the computer to record the image and the spectrometer on the telescope then to the computer to record the spectral imprint of the insect which is introduced into the volume defined by the intersection of the solid angle of the refractor and the reflector. The spectrometer and the camera are controlled by a computer program that we have developed using MATLAB for automated acquisition. The reference measurements are carried out by free-falling white Lambertian spheres in the focal plane of the black box. The release time is noted for future identification of the reference data stored on the computer. The integration time of the spectrometer has been set at 20 ms and the number of samples acquired is 1000.

## 4. Method for extracting and determining the spectral footprint

Raw data,  $I_{raw,t}$ , recorded is a 16 bits files, containing 3648 pixels x 1000 samples. Backscattered intensities due to dark box reflection and electronic noise intensities generated by electronic chain of spectrometer are add up to different measurements at each instant. These intensities represent the static intensities,  $I_{static,t}$ . Interquartile range intensity is insensitive to intensity flows backscattered by insects, atmospheric particles, plant leaves, aerosols and other undesirable factors such as smoke entering probe volume. This intensity has been calculated and represent  $I_{static,t}$ . Then,  $I_{raw,t}$  was centered around  $I_{static,t}$  to get the intensity  $I_t$ . Then, derived intensity  $I_t$  is supposed to contain backscattered intensity by an insect  $I_{insect,t}$  and intensities backscattered in the volume probed by unknown objects considered as noise,  $I_{noisy,t}$ , at time  $t$ .  $I_{insect,t}$  and  $I_{noisy,t}$  are assumed to be independent and orthogonal and with zero means. We can write:

$$I_t = I_{insect,t} + I_{noisy,t} \quad (1)$$

The covariance of  $I_t$ ,  $I_t^T I_t$ , is express as a function of the covariance of  $I_{insect,t}$  and the covariance of  $I_{noisy,t}$  [14]:

$$I_t^T I_t = I_{insect,t}^T I_{insect,t} + I_{noisy,t}^T I_{noisy,t} \quad (2)$$

The principle of the maximum noise fraction consists in finding a basic vector,  $\phi$ , such that the maximum noise fraction,  $f_\phi$ , define by equation (3) is optimal [13].

$$f_\phi = \frac{\|I_{noisy,t}\phi\|}{\|I_t\phi\|} \quad (3)$$

To determine the value of  $\phi$  which makes optimal  $f_\phi$  it is necessary to set to zero the derivative of  $f_\phi$  with respect to  $\phi$ . The calculus lead to equation (4). This equation is the generalized eigenvalues problem.

$$I_{noisy,t}^T I_{noisy,t} \phi = f_\phi I_t^T I_t \phi \quad (4)$$

The solution of this equation to generalized eigenvalues leads to obtaining the values of the linear transformation matrix,  $B$ . This matrix separates and orders the non-correlated spectra by decreasing values of the maximum noise fraction,  $f_\phi$ . The equation of this linear transformation links the uncorrelated spectral intensity,  $Y_t$ , with measured backscattered intensity,  $I_t$ :

$$Y_t = B^T I_t \quad (5)$$

Knowledge of background noise,  $I_{noisy,t}$ , in this methodology is required to derive  $B$ . Several existing techniques allow to estimate  $I_{noisy,t}$ . The method of differentiating neighboring pixels is generally used in image processing.  $I_{noisy,t}$  was evaluated, by determining the difference of the intensities of the neighboring samples.

$$I_{noisy,t} = I_t - I_{t+1} \quad (6)$$

## 5. Identification of insects by their spectral footprints and their associated images by unsupervised classification

After extracting the spectra of interest, the spectral footprint,  $R_{insect}$ , characteristic of each species of specimen, was calculated based on the spectrum of the specimen,  $I_{insect}$ , and the spectrum of the Lambertian sphere,  $I_{ref}$ , according equation (7). In this equation, the subtraction of the intensity of the background noise does not appear, because the background noise was dissociated from the spectrum of interest during the extraction of the spectrum of interest (Fig. 1). The spectral fingerprints determined were normalized and then grouped together. The Euclidean distance was then calculated. The decision criterion which allowed the determination of the number of classes (clusters) is a method based on the elbow detection called L-method [15–17]. The L-method consists of dividing the data relating to the associated distances into two batches and finding the best linear fit of the two batches (Fig. 2a) which minimizes the total mean square error,  $RMSE_T$ , (Fig. 2b) calculate according to the mean square error of the adjustment of each of the lots on the left (Fig. 2a, red curve),  $rmse_L$ , and right (Fig. 2a, green curve),  $rmse_R$ , the number of clusters,  $a$ , the maximum number of clusters,  $b$ , according equation (8). After determining the number of classes, the calculated Euclidean distances are used to construct the different classes according to their similarity. Figure Fig. 4 shows the central spectra of the 14 classes of insects identified and Fig. 5 shows the image associated with the central spectrum of each of the classes. The determination of the corresponding image was carried out manually using the time of detection of the insect by the measurement system.

$$R_{insect} = \frac{I_{insect}}{I_{ref}} \quad (7)$$

$$RMSE_T = \frac{a-1}{b-1} rmse_L + \frac{b-a}{b-1} rmse_R \quad (8)$$

## 6. Conclusion

We have implemented a device for synchronous acquisition of the image and the spectral imprint of flying specimens by passive remote sensing. We used the maximum noise fraction method to extract the spectra backscattered by the flying specimens in a set of 1000 samples containing the background noises. An unsupervised classification was used over a short measurement period to group the insect species detected by our system and thus identify each class of insect by an acquired image. As the camera used was not fast, we obtained saturated images. The simultaneous acquisition of the image and the spectral imprint being a major stake, this study can be deepened by using a fast camera.

**Acknowledgments**

The authors acknowledge Mikkel Brydegaard and Samuel Jansson for their technical support.

**Funding Statement**

General financial support from Swedish International Development Cooperation Agency (SIDA) through International Science Program (ISP), Uppsala University as well as the Third World Academy of Sciences (TWAS).

**Data Accessibility**

This article has no additional data.

**Competing Interests**

We have no competing interests.

**References**

- |     |  |
|-----|--|
| 1.  | Brydegaard M, Merdasa A, Gebru A, Jayaweera H, Svanberg S. 2016 Realistic Instrumentation Platform for Active and Passive Optical Remote Sensing. <i>Appl. Spectrosc.</i> (doi:10.1177/0003702815620564)   |
| 2.  | Runemark A, Wellenreuther M, Jayaweera HHE, Svanberg S, Brydegaard M. 2012 Rare events in remote dark-field spectroscopy: An ecological case study of insects. <i>IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.</i> (doi:10.1109/JSTQE.2012.2184528)   |
| 3.  | Brydegaard M, Jansson S. 2019 Advances in entomological laser radar. <i>J. Eng.</i> (doi:10.1049/joe.2019.0598)  |
| 4.  | Gebru A, Rohwer E, Neethling P, Brydegaard M. 2014 Investigation of atmospheric insect wing-beat frequencies and iridescence features using a multi-spectral kHz remote detection system. In <i>Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XI</i> , (doi:10.1117/12.2060827) |
| 5.  | Brydegaard M, Lazzari CR. 2015 Towards quantitative optical cross sections in entomological laser radar - Potential of temporal and spherical parameterizations for identifying atmospheric fauna. <i>PLoS One</i> (doi:10.1371/journal.pone.0135231)  |
| 6.  | Kirkeby C, Wellenreuther M, Brydegaard M. 2016 Observations of movement dynamics of flying insects using high resolution lidar. <i>Sci. Rep.</i> (doi:10.1038/srep29083)   |
| 7.  | Mei L, Brydegaard M. 2015 Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system. <i>Opt. Express</i> (doi:10.1364/oe.23.0a1613)  |
| 8.  | Jansson S, Brydegaard M. 2018 Passive kHz lidar for the quantification of insect activity and dispersal. <i>Anim. Biotelemetry</i> (doi:10.1186/s40317-018-0151-5)   |
| 9.  | Malmqvist E, Jansson S, Torok S, Brydegaard M. 2016 Effective parameterization of laser radar observations of atmospheric fauna. <i>IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.</i> (doi:10.1109/JSTQE.2015.2506616)   |
| 10. | Parra L, Sajda P. 2004 Blind source separation via generalized eigenvalue decomposition. In <i>Journal of Machine Learning Research</i> , (doi:10.1162/jmlr.2003.4.7-8.1261)   |
| 11. | Pham DT, Cardoso JF. 2001 Blind separation of instantaneous mixtures of nonstationary sources. <i>IEEE Trans. Signal Process.</i> (doi:10.1109/78.942614)  |
| 12. | Jutten C, Herault J. 1991 Blind separation of sources, part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture. <i>Signal Processing</i> (doi:10.1016/0165-1684(91)90079-X)   |
| 13. | Hundley DR, Kirby MJ, Anderle M. 2002 Blind source separation using the maximum signal fraction approach. <i>Signal Processing</i> (doi:10.1016/s0165-1684(02)00342-0)   |
| 14. | Sun L, Rieger J, Hinrichs H. 2009 Maximum noise fraction (MNF) transformation to remove ballistocardiographic artifacts in EEG signals recorded during fMRI scanning. <i>Neuroimage</i> (doi:10.1016/j.neuroimage.2009.01.059)   |
| 15. | Zagouras A, Inman RH, Coimbra CFM. 2014 On the determination of coherent solar microclimates for utility planning and operations. <i>Sol. Energy</i> (doi:10.1016/j.solener.2014.01.021)   |
| 16. | Zagouras A, Kazantzidis A, Nikitidou E, Argiriou AA. 2013 Determination of measuring sites for solar irradiance, based on cluster analysis of satellite-derived cloud estimations. <i>Sol. Energy</i> (doi:10.1016/j.solener.2013.08.005)  |
| 17. | Kouakou BK, Jansson S, Brydegaard M, Zoueu JT. 2020 Entomological Scheimpflug lidar for estimating unique insect classes in-situ field test from Ivory Coast. <i>OSA Contin.</i> (doi:10.1364/osac.387727)   |



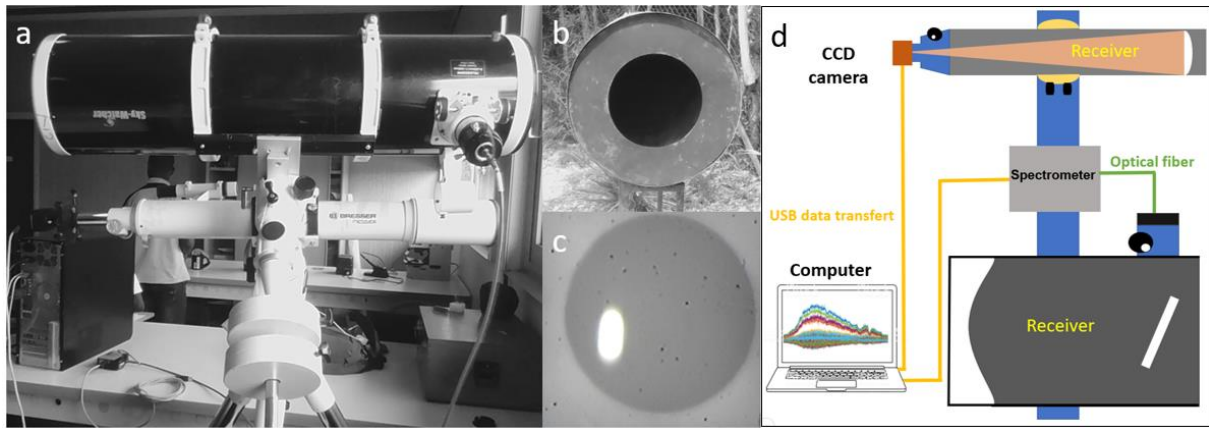


Figure 1: Panoramic view of the setup. (a) Passive remote sensing equipment consisting with two receivers, a reflector to measure the spectral footprint and the reflector for imaging. (b) Dark box to reduce the background backscatter and avoid saturation of spectrometer. (c) Image of a Lambertian sphere falling in front of the dark box to measure the reference intensity. (d) A schematic diagram of the setup.

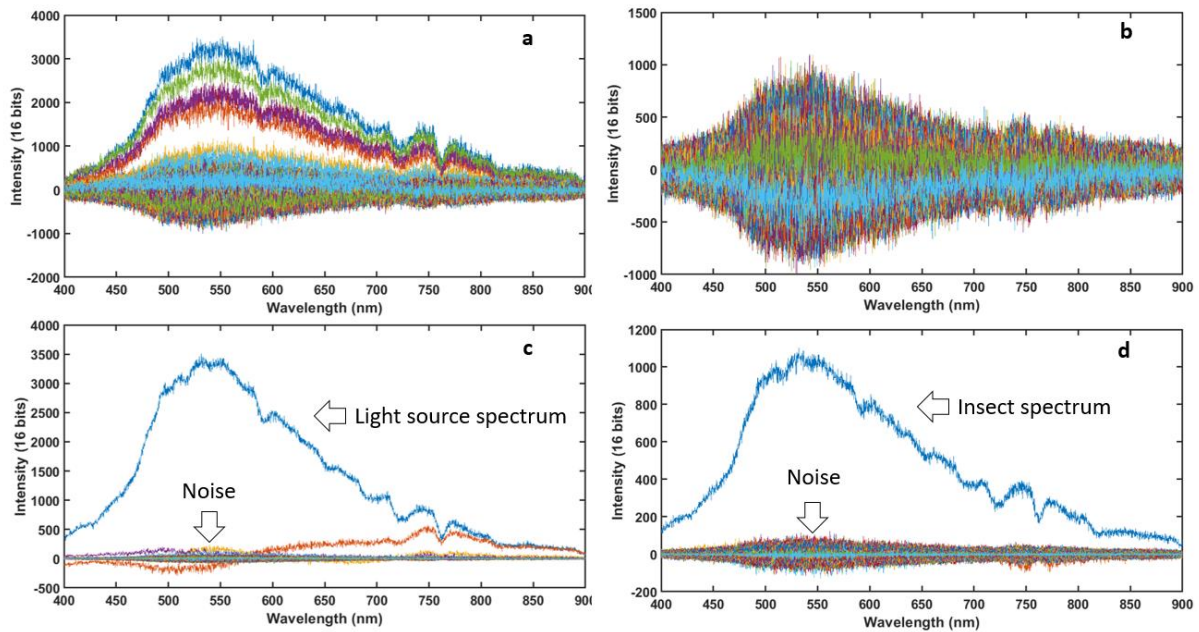


Figure 2: Examples of spectra of two events (a,b) Raw data centered around static intensity. (a) corresponds to reference spectra and (b) insect spectrum passing in the probe volume. (c,d) Spectra obtained after application of the maximum noise fraction method. The spectra were ordered according to the decreasing signal to noise ratio (SNR). The spectrum of interest is the high intensity spectrum (blue curves). In (c), highest intensity spectrum is sun spectrum which is used has illumination light; in (d), highest intensity spectrum is the spectrum of an insect detected by the acquisition system. Lower intensity spectra are considered to be background noise.

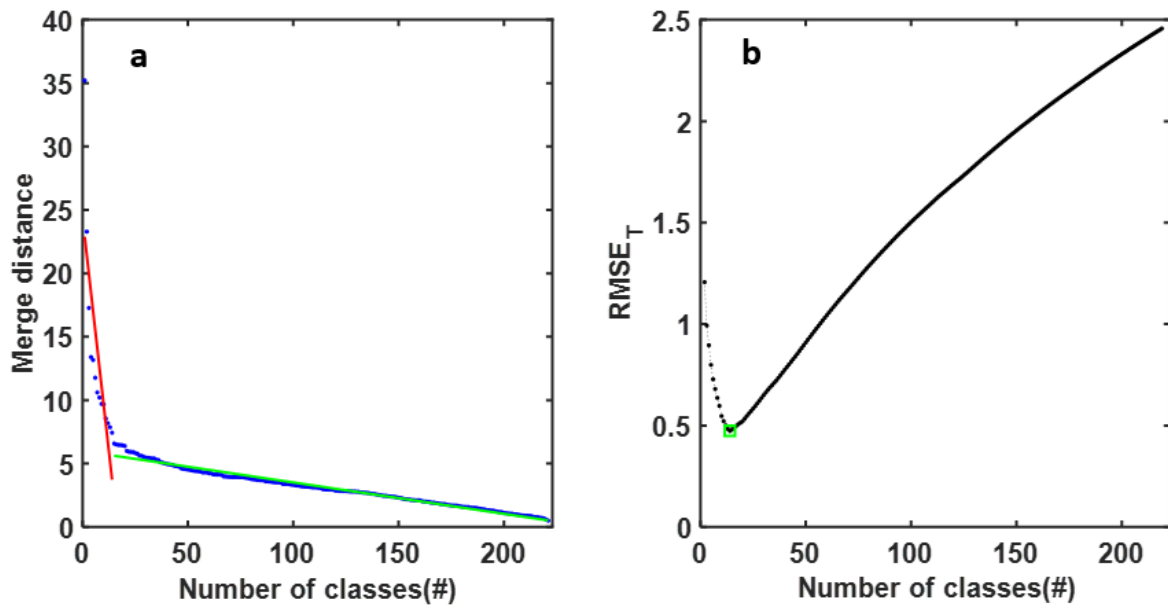


Figure 3: (a) Associated Euclidean distance vs number of classes. The intersection of the regression line in red and the regression line in green determines the decision boundary for the number of classes. (b) the minimum value of the total mean square error of regression of the lines in red and in green gives the value of the class number. The number of classes in this study was estimated at 14.

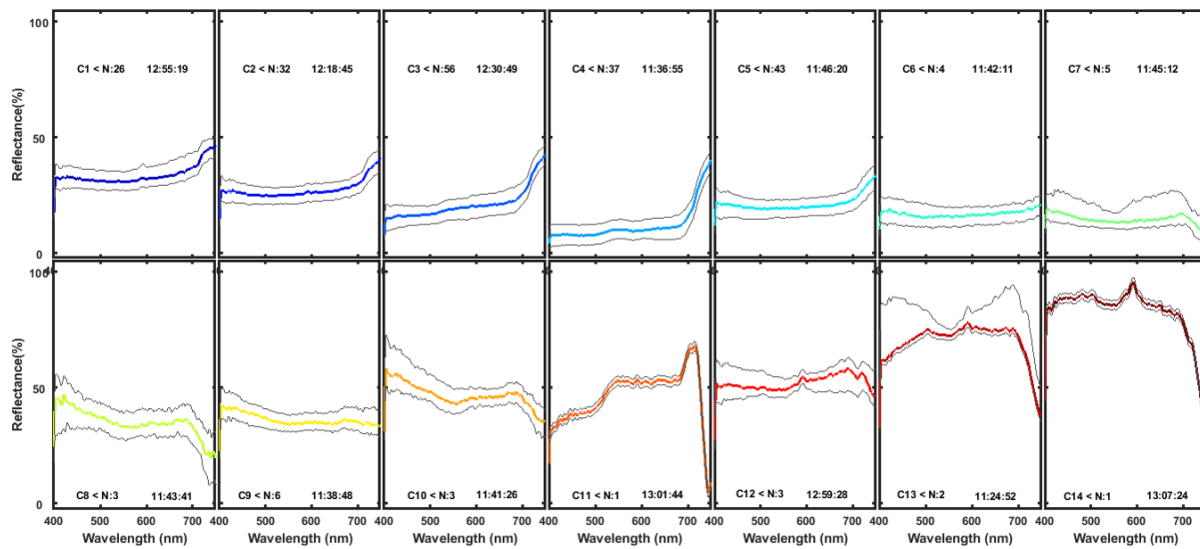


Figure 4: Central spectral fingerprints of the 14 species of flying specimens detected by the measurement system. In each sub-figure, the class of each species of flying specimens is indicated by C1, C2,..., The number of flying specimens in each class is indicated by N. On the far right at the top of the top sub-figures the time at which the flying specimen was detected is indicated and in the lower figures this time is written at the bottom right. The shaded curves indicate the interquartile range within a group.

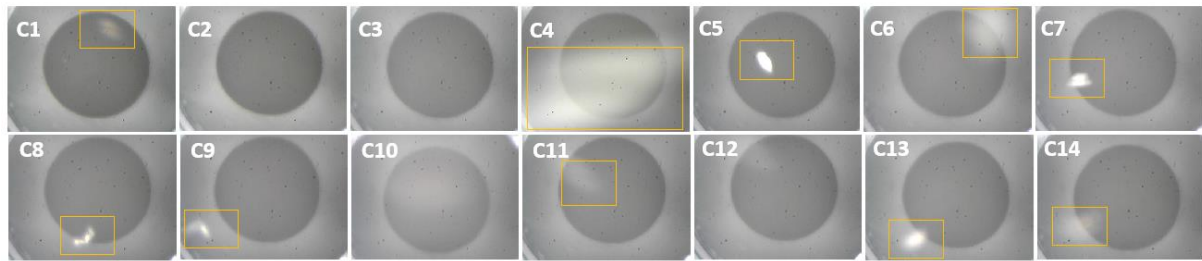


Figure 5: Raw images of flying specimens associated with different central spectral imprints. The captured specimens are identified on each sub-figure by a rectangle in orange. The images are saturated and do not identify the species detected. Certain fast flapping specimens have passed without being detected by the camera, for example in C2, C3, C10, etc. Others have passed far from the object focal plane. The image obtained in this case is blurred. This is the case of the images in C4, C6, C14, ..



## High Dynamic Range in Entomological Scheimpflug Lidars

Journal:	<i>Journal of Selected Topics in Quantum Electronics</i>
Manuscript ID	JSTQE-CON-BP2021-08733-2020
Manuscript Type:	Contributed
Date Submitted by the Author:	03-Oct-2020
Complete List of Authors:	Brydegaard, Mikkel; Lund University, Department of Physics; Norsk Elektro Optikk AS, Hyspex; Lund University, Department of Biology; FaunaPhotonics Kouakou, Benoit; Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Instrumentation, Imaging and Spectroscopy Laboratory Jansson, Samuel; Lund University, Department of Physics; Lund University, Department of Biology Rydell, Jens; Lund University, Department of Biology Zoueu, Jeremie; Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Instrumentation, Imaging and Spectroscopy Laboratory
Keyword:	Laser radar, Remote sensing, Biology, Laser measurement applications, Infrared measurements, Tropical regions

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) <

1

# High Dynamic Range in Entomological Scheimpflug Lidars

Mikkel Brydegaard<sup>1,2,3,4</sup>, Benoit Kouakou<sup>4</sup>, Samuel Jansson<sup>1,2</sup>, Jens Rydell<sup>2</sup>, Jeremie Zoueu<sup>4</sup>

**Abstract—** Minimizing insecticide use, preventing of vector diseases and facilitating biodiversity assessments are suitable applications of recent advances in photonic insect surveillance and entomological lidar. The tools also comprise a new window into fundamental aspect of the fascinating life and ecology of insects and their predators *in situ*. Compared to conventional insect assessment by sweep nets and specialized traps of numerous designs, entomological lidar provides much larger counts and statistics allowing for analysis of minute details in time and space. Although the lidar penetration into the phylogenetic tree cannot be compared to microscopic and genetic analysis of trap catches, the classification can in principle be instantaneous and lidar can provide a representative picture of flight activity across all species. At the same time, it is evident that lidars are subject to finite detection range given by the instrument noise and saturation levels, and therefore, intervals of the biomass spectra are sectioned at different ranges. The Scheimpflug lidar allows an interesting trade-off between fast sample rate and low pulse energy for retrieving wing beat harmonics and slow sample rates with high pulse energy for detecting small species far away. In this paper, we revise calibration, sizing and associated deficiencies, and report count rates to  $10^4$  insects/minute up to 2 km range. We investigate if and how high dynamic range can be exploited in entomological lidar and also how fast and slow sample rates could complement each other and capture a wider span of the biomass spectrum.

**Index Terms—** Aerofauna, Biophotonics, Ecology, Entomology, Environmental Monitoring, Laser Radar, Lidar, Remote Sensing.

## I. BACKGROUND AND MOTIVATION

THE changing climate and the ongoing anthropogenic conversion of our landscape<sup>1</sup> leads to extinction of pollinating insects as well as invasion of new territories by pests and disease vectors. Pesticide overuse and light pollution<sup>2</sup> pushes beneficiary insects and insectivores back towards the few remaining nature reserves, particularly in the tropics<sup>3</sup>. A rapidly changing world requires swift measures for conservation ecology which in term set demands for rapid diagnostics tools *in situ*. However, when it comes to entomological surveys we find ourselves blinded from the grand overview; what species to catch? Which traps to use? How many? Where to position traps in the landscape and when to empty and with what frequency? The following, analysis of traps catches will take month of work by dedicated experts, even in a limited study.

This calls for engineering solutions and, hence, insect

surveillance was pursued from the 1970<sup>th</sup> by radar<sup>4,5</sup>. Important insights in insect migration insects have been revealed<sup>6</sup> as well as clues to target identity<sup>7</sup>. However, ground-clutter constrains the applicability of radar near the ground.

Distributed sensors, or E-traps, have been proposed<sup>8-11</sup> including commercial initiatives<sup>12,13</sup>. Much of the discussion regarding positioning of the trap, the lure and species biasing is however well known from the use of conventional traps.

Entomological laser radar<sup>14</sup>, hereafter called lidar, emerged 15 years ago<sup>15,16</sup>. In particular, the Scheimpflug lidar concept<sup>17-19</sup> greatly increased the efficiency of counting insects *in situ*<sup>20-22</sup>. Implementation of multiple wavelength<sup>23</sup>- or polarization<sup>24</sup>-bands makes it possible to interact with molecules and microstructure in distant insects and improve target classification<sup>25-27</sup>. Lidar also allow to study species over a large size span from midges to vertebrate insectivores<sup>20,28,29</sup>.

The optical power of presented E-traps and entomological lidars does not differ noticeably, but the great advantage of lidars is that the laser light is recycled meter after meter, thus a relatively large probe volume can be trans-illuminated by a sufficient intensity. Consequently, lidars yield insect counts several orders of magnitudes higher than E-traps. Whereas radar echoes decrease by  $r^4$ , since both the beam and the backscatter diverge, lidar signals are generally thought to decrease by  $r^2$  since only the backscatter diverges. This is, however, not necessarily true for flat and specular targets<sup>30,31</sup>. This also include insect wings<sup>32</sup> and some effects of this will be presented in this report.

In principle, lidars can be used vertically<sup>29</sup> or swept to produce radial 2D scans<sup>33-35</sup> or spherical 3D scans<sup>36</sup>. In practice, there are few report attempting to quantitatively evaluate and interpret range profiles of insects<sup>35,37</sup>. A major challenge is the necessity of accurate knowledge of the beam shape at all distances and the handling of range dependent detection limits. The latter implies that specific sections of the aerofauna biomass spectrum is captured at different ranges.

In this paper we will first revise entomological lidar calibration. We will then comparatively investigate the detection limits for insect sizing and ranging for long and short exposures with high- respectively low- pulse energies. Interesting ecological aspects of how aerofauna activity changes during the course of the day in relation to vegetation and light pollution is also presented.

Submitted 1<sup>st</sup> October 2020. This work was supported by the Royal Physiographic Society in Lund, the Crafoord Foundation, the African Spectral Imaging Network by International Science Program in Uppsala, the Félix Houphouët-Boigny Institute, the Swedish Research Council, the European Research Council through the ERC starting grant *BugFlash*.

M. Brydegaard ([mikkel.brydegaard@fysik.lth.se](mailto:mikkel.brydegaard@fysik.lth.se)), S. Jansson ([Jansson.Samuel@gmail.com](mailto:Jansson.Samuel@gmail.com)) and J. Rydell ([jens.rydell@telia.com](mailto:jens.rydell@telia.com)) is with the

Lund University, Dept. Physics and Dept. Biology, Lund, Sweden. M. Brydegaard is also with Norsk Elektro Optikk, Oslo, Norway and co-founder of FaunaPhotonics, Denmark. B. Kouakou ([benoitkouakou@gmail.com](mailto:benoitkouakou@gmail.com)) and J.Zoueu ([jzoueu@yahoo.fr](mailto:jzoueu@yahoo.fr)) is at Félix Houphouët-Boigny Institute, at the Instrumentation, Imaging and Spectroscopy Laboratory, Yamoussoukro, Ivory Coast.

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) <

## II. TEST RANGE AND INSTRUMENTATION

### A. Test Range

The Ivorian Scheimpflug lidar<sup>38</sup> is positioned on second floor in the Instrumentation, Imaging and Spectroscopy laboratory, at Félix Houphouët-Boigny Institute, Yamoussoukro, Ivory Coast. It overlooks the Ivorian bush with agricultural patches with cassava and banana. Ground features also include mango trees, palms and termite mounds. At the campus, abandoned houses and a partly collapsed basement provide shelter for horseshoe bats and swallows. We report evening data from the late hot and dry season with stable and reproducible weather. The transect starts at 6°56'26.4''N 5°13'28.7'' W and closely passes under the canopy of a huge silk-cotton *Ceiba* tree at 6°53'30.1''N 5°13'13.4''W located 516 m away heading 84°. A black neoprene calibration target is mounted on the trunk of the tree. The beam is horizontal and fluctuating between 6 m and 14 m over ground in the reported transect.

### B. Scheimpflug Lidar

The instrument used is an entomological Scheimpflug lidar. The design resemble similar systems elsewhere<sup>17,19,21,22,24,37,39-42</sup>. Such systems comprise a baseline mounted on a motorized tripod, with a transmitter in one end and a receiver in the other. The specifications are given in Table 1. The lidar data is acquired by a USB2 camera (Glaz LineScan1, Synertronic Design, South Africa) with a linear CMOS sensor (S11639-01, Hamamatsu, Japan). The device is controlled by custom made

interface provided by the producer. In this study, the sensor and lidar was operated at two distinct sampling rates of 300 Hz and 3000 Hz in two consecutive evenings. The sampling frequency and strobe signal in turn control the laser diode modulation, and respective laser energy per exposure is estimated to 2804  $\mu\text{J}$  and 225  $\mu\text{J}$ .

## III. DATA AND CALIBRATION

In this section we revise the data format and calibration procedures, including various refinement compared to our earlier reports<sup>20,39,40</sup>.

### A. Data format

Raw data is saved in files spanning 10 s each. These include 16 Bit light intensity measurements,  $I_{(r,t)}$ , in 2048 pixel and either 3000 or 30000 exposures for 300 Hz and 3000 Hz sample rate respectively. The odd exposures,  $I_{odd}$ , include laser light,  $I_{bright(r)}$ , background light,  $I_{bgr(r)}$ , and dark current,  $I_{dark(r)}$ . The even exposures,  $I_{even}$ , include background light and dark current. Note that the dark current is denoted with range (pixel) dependency, this is because of structured dark current on CMOS and potential temperature gradients on the sensor.

We collected data during 4½ hours around sunset, acquired two consecutive days with fast and slow sample rates. In Fig.1, an overview of the dataset is presented. In these color-coded range-time maps, the minimum-, median- and maximum-intensity value of each file is displayed in each column.

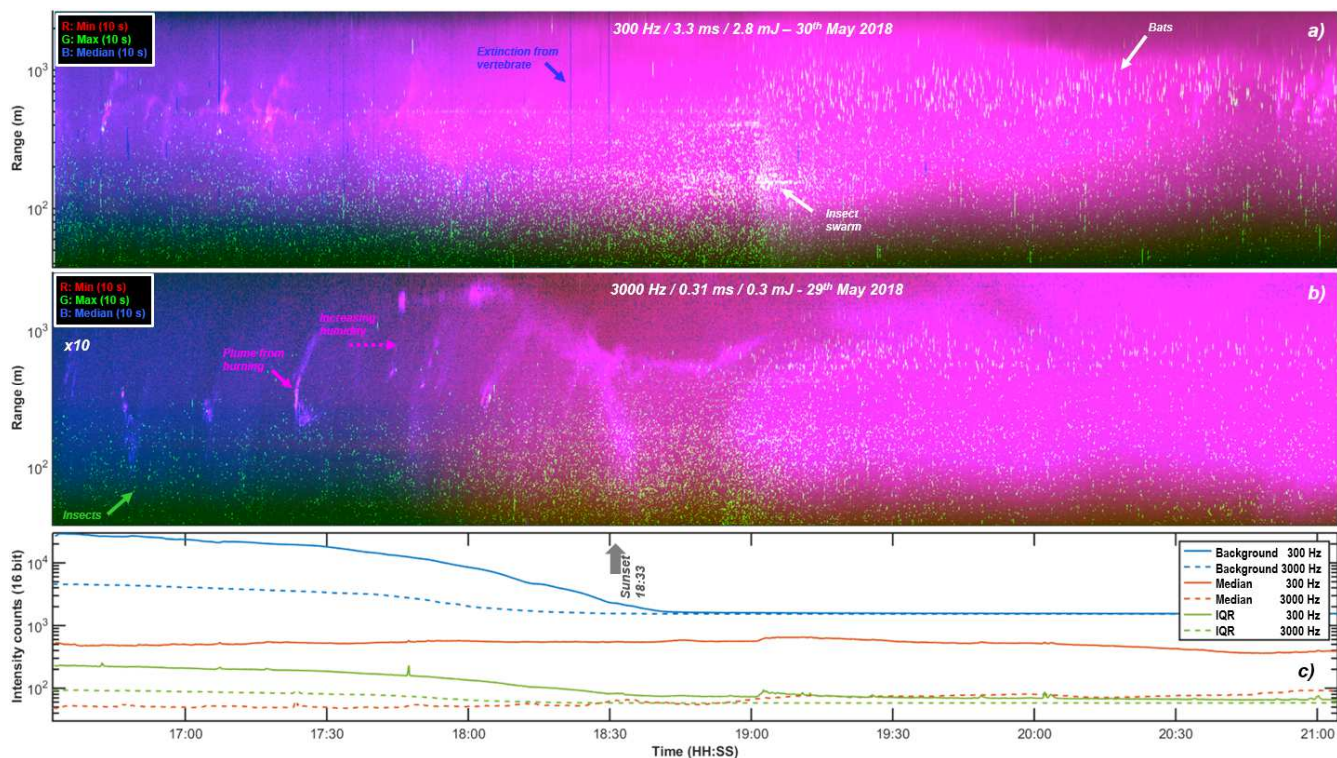


Fig.1 Time-range overview maps of the two successive evenings reported. The maps are color-coded such that each column represent the temporal minimum-, median- and maximum- value for each pixel in each 10 s data file. Note that the range scale is logarithmic. During the evening the humidity and atmospheric scatter coefficient increases, this increases the static atmospheric echo reflected minimum and median by purple color. Occasional plumes also affect the static air echo. Insects causes narrow spikes to the maximum signal and are seen as blue dots. Large vertebrates can efficiently extinguish the entire beam hereafter atmospheric echo diminish, this is seen as blue lines in 1a. The brightness in 1b have been increased tenfold to compensate for the shorter exposure. The lower pane 1c, display how the average properties of background sunlight (dark exposures), air signal (median) and noise (inter quartile range, IQR) changes throughout the evenings.

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) < 3

### B. Range Calibration and Resolution

Range calibrations are discussed in previous work<sup>39,40,43,44</sup>. We calibrated the range,  $r$ , by the geometry of our lidar instrument and GPS coordinates of the lidar and a calibration target at 516 m distance. Due to the triangulating nature of Scheimpflug lidar, range resolution is thought to deteriorate tangentially or approximately with  $r^2$ . However, the resolution also depends on the beam width<sup>44</sup>, and by strategically choosing the beam expander size<sup>19</sup> it is possible to compensate this deterioration by a converging beam and attain a linearly deteriorating range uncertainty typically in the order of 3%. Whereas ranges between lidar and calibration target is fairly accurate, it can be expected that small inaccuracies can cause ranging error to drift when extrapolating at further ranges that the calibration target. See further discussion<sup>45</sup>.

### C. Instrument Function and Atmospheric Return

Just as other instruments, such as spectrometers, have a response function for, e.g., different wavelengths, lidars have a range dependent sensitivity, referred to as the *lidar form factor*. This function is distinct for the distributed atmospheric propagation media and also for diffuse- and specular- hard targets. Because the depth of each successive probe volume of Scheimpflug lidars increases by  $r^2$ , then the back scatter increases accordingly. This implies that the atmospheric return in Scheimpflug lidars are not subject to  $r^2$  attenuation, as known from *Time-of-Flight* lidars. The lidar formfactor is therefore equivalent to the fraction of laser light transilluminating each pixel footprint in the atmosphere. Due to beam expansion, the beam is typically wider the *Field-of-View* at close distance. This is known as the region of incomplete overlap. The overlap function of Scheimpflug lidars can be expressed as:

$$G_{overlap(r)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{r_0}{r}\right)^\gamma} \quad (Eq.1)$$

This logistic function on logarithmic base resembles previous analytical overlap functions<sup>46</sup>. The  $r_0$  denotes range of half overlap and  $\gamma$  is a steepness factor. For our setup we found  $r_0 = 79$  m, and  $\gamma = 1.8$ . Previous work<sup>19</sup> gives a longer indication of complete overlap than  $2r_0$ . We note that it is comparable but the previous estimate is based on geometrical optics and gives a longer and more restrictive value.

Scheimpflug lidars, commonly employ synchronized *lock-in* detection for background rejection<sup>18,42,47</sup>. This implies that the laser is switched *on-* and *off* between even and odd exposures, and that the difference constitutes the lidar signals. As in ordinary lock-in detection, there can be a phase delay,  $\varphi$ , between the sampling (line array exposures) and the carrier wave after the round trip. Thus,  $\varphi$  is range dependent and with high sample rate the signal and dark timeslot will eventually swap for the distant pixels. This phenomena can be expressed and corrected for by a rotational matrix operation;

$$\begin{bmatrix} I_{bright(r)} \\ I_{bgr(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos & \sin \\ -\sin & \cos \end{bmatrix}^{\varphi(r)} \begin{bmatrix} I_{odd(r)} - I_{dark(r)} \\ I_{even(r)} - I_{dark(r)} \end{bmatrix} \quad (Eq.2)$$

$$\varphi(r) = \frac{\pi f_s r n_{air}}{c} + \varphi_{driver} \quad (Eq.3)$$

$$I_{sig(r,t)} = I_{bright(r,t)} - I_{bgr(r,t)} \quad (Eq.4)$$

Ideally there is no driver delays, but we detected  $\varphi_{driver} = 0.9^\circ$  @  $f_s = 300$  Hz and  $4.1^\circ$  @  $f_s = 3000$  Hz. This constitute a laser leak from odd to even exposures of 1.6% and 7% respectively. The reason is issues with laser diode fall-times and can be fixed by improving laser driver circuit, adjusting exposure times and read-out gap and by choosing the right polarity on the trigger flank. For now, this was corrected according to Eq.2 to Eq.4 and the specified  $\varphi_{driver}$ . Since the exposures and carrier wave are more squared than sinusoidal the range dependent time-of-flight loss can be expressed as a triangle wave:

$$G_{ToF(r,f_s)} = 1 - \frac{4f_s r n_{air}}{c}, \quad 2f_s r n_{air} < c \quad (Eq.5)$$

Our experiment employ a horizontal beam, and between occasional plumes from agricultural burnings, the signal is smooth in time and space, and the atmosphere can be assumed homogeneous. When this is the case, the expected lidar backscatter should attain the form:

$$G_{air(r,t)} = \mu_s(t) e^{-2\mu_s(t)r} \quad (Eq.6)$$

Since the 808 nm lidar band does not coincide with any absorption bands in the atmosphere, the attenuation coefficient entirely derives from scattering. Note that the scatter coefficient,  $\mu_s$ , varies with temperature and humidity, and thus commonly changes during the evenings, see Fig.1. At 808 nm, the minimal  $\mu_s$  value is  $0.0025 \text{ Km}^{-1}$  (molecular Rayleigh scattering), but typically the value varies between  $0.1 \text{ Km}^{-1}$  clear conditions to  $10 \text{ Km}^{-1}$  dense fog. The homogeneous air lidar signal can be found statistically by the time median<sup>37</sup> during clear conditions. When this is the case, it can be described accurately by the combined instrument function:

$$I_{air(r,t)} = S E_0 G_{air(r,t)} G_{ToF(r,f_s)} G_{overlap(r)} \quad (Eq.7)$$

Here,  $E_0$  is the laser energy during the exposure and  $S$  is the lidar sensitivity. This analytic function yielded an explanation grade of 99.98 % adjusted  $R^2$  when fitted to the median homogeneous air signal, see example in Fig.2. We encountered  $S \approx 5.2 \text{ kBits Km mJ}^{-1}$ . With our pulse energies,  $E_0$ , of  $2.8 \text{ mJ}$  @  $300 \text{ Hz}$  and  $0.3 \text{ mJ}$  @  $3000 \text{ Hz}$  and  $\mu_s \approx 0.1 \text{ Km}^{-1}$ , we acquired respectively  $I_{sig} \approx 1.1 \text{ kBit}$  and  $I_{sig} \approx 0.1 \text{ kBit}$ , at complete overlap, for comparison the single shot noise level (IQR) is around  $I_{noise} = 0.1 \text{ kBit}$ , see Fig.1c. The modelled signal,  $I_{sig}$ , is compared to data in Fig.2.

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) < 4

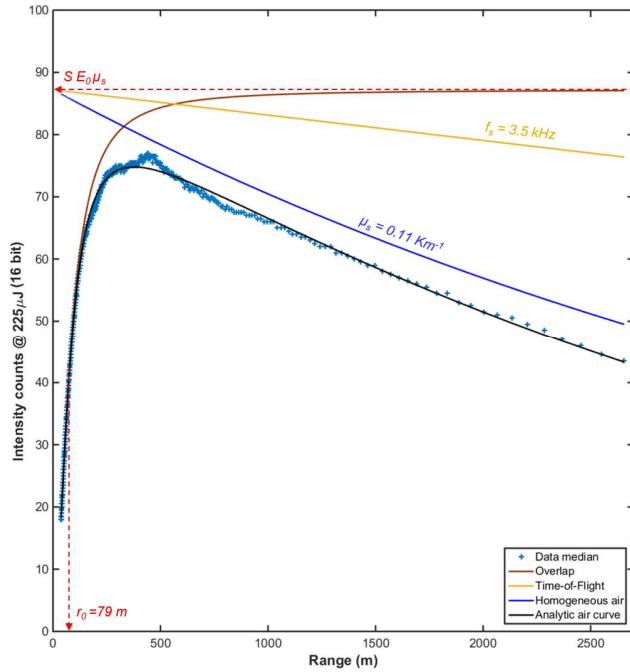


Fig.2 When the atmosphere is homogenous the retrieved air signal can be accurately ( $R^2: 99.98$ ) described by an overlap function, the time-of-flight desynchronization and the atmospheric scatter coefficient. This reduced lidar sensitivity to a single value,  $S$ , in units of Bits  $\text{Km}^{-1}$  to be compared to noise bits or across systems.

#### D. Calibration of Insect Cross Sections and Sizes

Inspired from Radar Cross Sections<sup>48</sup> (RCS), an optical cross section,  $\sigma$ , was introduced<sup>49</sup>. The backscattered cross section quantity is the product of the geometrical cross section from the projected aspect and the diffuse reflectance of a hard target,  $\sigma_{back\ scat.} = AR$ . Correspondingly the extinction cross section would be the product of area and opacity,  $\sigma_{ext.} = A(1-T) \approx A$  (ballistic light is either scattered or absorbed when transilluminating insects). In our setup  $\sigma_{ext.}$  can be seen for vertebrate (Fig.1a) but is generally below noise threshold for insects. The cross sections are wavelength dependent, in the near infrared in this study (700-1000 nm) mainly influenced by melanin absorption. In the short wave infrared (1000-1700 nm) it is primary affected by liquid water absorption. When resolved at kHz sampling, the cross sections depend on the phase in the wing beat cycle and can be decomposed into a body envelope and oscillatory part. When wing surface normal coincide with the beam, the spectral cross section can be explained by thin film interference across the spectrum<sup>32,50</sup>. For more details on lidar light interaction with insects see<sup>51</sup>.

While insect cross sections can be characterized fairly accurately in laboratory<sup>25,52,53</sup> they are challenging to estimate accurately remotely beyond the first digit. Such estimate relies on the assumption that a) the organism is much smaller than the beam, b) that it does not transit peripherally and c) that the beam is top hat rather than Gaussian, see discussion<sup>54</sup>. In practice assumption are partially valid.

At 808 nm the reflectance of most aerofauna is approximately 20% due to melanin<sup>55</sup>. On the other hand, specular conditions can yield scattering hundreds times relative to a Lambertian white target<sup>32</sup>.

Although optical cross section suffers from these deficiencies, it remains as a fairly intuitive measure and one of the few entities to compare between studies, species and instruments. In laboratory, cross sections can be calibrated by white Lambertian Teflon balls<sup>25,54</sup>. In lidar studies like this, the beam is inaccessible and we calibrate the value against a flat board at a known distance, coated black diffuse neoprene foam with a reflectance,  $R_{term.}$ , of 1.8% @ 808 nm.

$$\sigma_{term} = R_{term} A_{probe}(r_{term}) \quad (\text{Eq.8})$$

Here,  $A_{probe}$ , is the spatial overlapping area of the beam and field of view. We then use the analytical air signal in Eq.7 to extrapolate the lidar sensitivity to other ranges accordingly:

$$\sigma_{insect}(r,t) = \frac{\sigma_{term} I_{air}(r_{term}) r_{insect}^2 (I(r_{insect,t}) - I_{air}(r_{insect}))}{I_{air}(r_{insect}) r_{term}^2 (I_{term} - I_{air}(r_{term}))} \quad (\text{Eq.9})$$

The equation can be verified by replacing the sub index term "insect" with term "term.". The  $I_{air}$  term denotes the instrument range response and  $\sigma$  a known fix point. The  $r^2$  terms represent the assumption of diffuse Lambertian and omnidirectional scattering form insect and calibration target. We will later return to this discussion.

Apart from cross sections deduced from light intensities, we also successfully applied an additional size measure; apparent size,  $\delta_{insect}$ . The entity is deduced from opening angle in the beam and the pixel spread of the echoes according to;

$$p_{cent} = \frac{\sum_{mask} I_{insect}(p,t)^p}{\sum_{mask} I_{insect}(p,t)} \quad (\text{Eq.10})$$

$$\delta_{insect}(t) = \frac{r \cos \theta_{sens} \ell_{pix}}{F_{rec}} \sqrt{\frac{\sum_{mask} I_{insect}(p,t) (p - p_{cent.})^2}{\sum_{mask} I_{insect}(p,t)}}$$

Since insect envelopes varies from Gaussian- to top hat shapes and can include specular flashes, we choose to robustly reduce the time dependent size measures  $\sigma_{insect(t)}$  and  $\delta_{insect(t)}$ , by taking the temporal median for their duration of the observation. In addition, note that wingbeat are not resolved in the 300 Hz mode. Hereafter, each observation is represented by a single pair of size measures.

Note that apparent size is unaffected by melanin and specular flashes. From their units (see Table.1) we understand that  $\sigma \propto \delta^2$ . A crude of estimate of diffuse reflectance of the insects is therefore  $R_{insect} \approx \sigma \delta^{-2}$ . Although  $\sigma$  is a measure of area, we know that light interacts ballistically with the tissue in the abdomen of small insects such as mosquitoes<sup>53</sup>. This happens when the organism size is small in relation to the mean free path in the tissue<sup>1</sup>. This implies that the interaction path length of the backscattered light is longer and thus more depolarized than for the forward scattered light<sup>53</sup>. In this regime, light scatters from the tissue and eggs inside the insects and scattering scales with depth. In other words; for small insects, then the retrieved light,  $I_{insect}$ , originates from the volume and not the area, this would imply a  $\sigma \propto \delta^3$  relation.



&gt; REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) &lt;

5

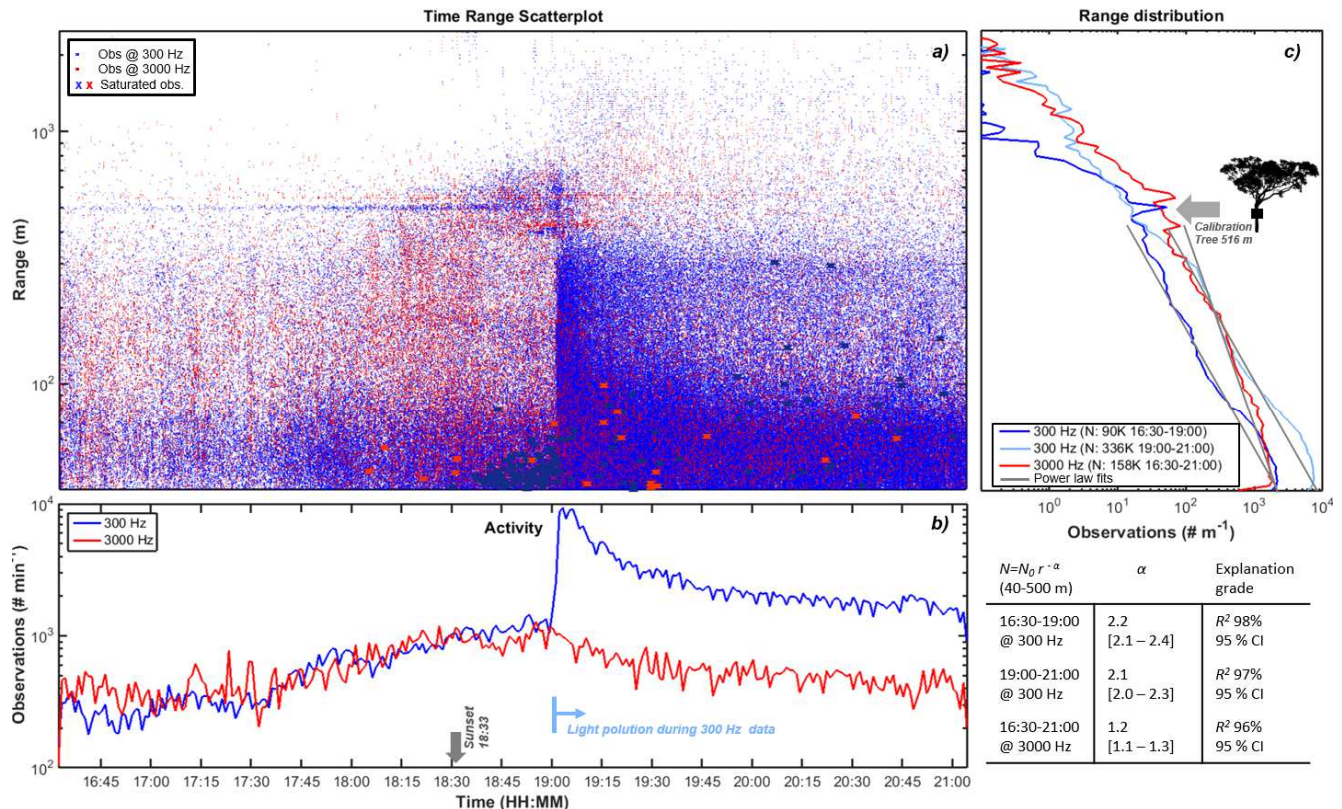


Fig.3 During 4½ hours, 158244 insects were detected at 3000 Hz rate and 426327 insects were detected at 300 Hz rate. 3a: Display all observations in time and space. Generally, more insects are detected at close ranges, however, during daytime the shade of the large Ceiba tree canopy at 516 m induce increased activity, this is predominantly seen in the long exposure more at 300 Hz. After sunset this aggregate broadens in the landscape. 3b: Surprisingly, the counting rate is equivalent for 300 Hz and 3000 Hz during the afternoon and after sunset. At 19:00 on the day of the 300 Hz measurements the test range was subject to light pollution. This was not the case for the 3000 Hz measurements. 3c: show the range distributions of detected insects. Because of the light pollution during the 300 Hz measurements, the data is split in two parts before- and after 19:00.

#### IV. RESULTS

We mask by a threshold on the instantaneous lidar signal,  $I_{sig}$ , when this exceed the static signal plus three times the noise amplitude ( $>SNR=3$ );  $I_{sig(r,t)} > I_{median(r)} + 5 I_{IQR(r)}$ . An insect observation is hereafter defined as a connected island in this range-time mask. The procedure is identical to previous work<sup>39,40</sup>. The range, cross section and apparent size is calibrated as in previous section.

##### A. Aerofauna detection in time and space

All detected insects are presented in time and space in Fig.3. As expected, more insects are detected closer to the lidar. However, a pronounced spatial feature, with increased activity, is where the beam passes under the shade of the canopy of the mighty Ceiba tree at 516 m distance. This is in particular visible for the 300 Hz measurements. Such monumental trees are known to create humid micro climate, shelter and food for both insects and bats<sup>56</sup>. When sun sets, some insects are known to gather over elevated land features by a so called hill-top effect. For bats such trees also provide protection from predators and constitute a landmark and social meeting point in the landscape. We tested observations for detector saturation, and encountered 142 and 21 saturated observations in 300 Hz and 3000 Hz mode respectively. These were predominantly at close range during

the rush hour right after sunset but also at longer ranges later in the evening. This period is popular feeding time for insectivores<sup>28,29,56</sup>. In Fig.3b the counting rates for 300 Hz and 3000 Hz mode is displayed. In the afternoon the curves look surprisingly similar with some 500 observations per minute. The range distribution is however fairly distinct; the 3000 Hz mode generally detects insects at further distances but fails to detect insects in the canopy shade at 516 m. At 19:00 the day of the 300 Hz measurement the guard at the institute campus switched on the lights at the parking lot (35-90m range). This is a significant light pollution source in the otherwise dark and sparsely populated outskirts of Yamoussoukro. Within minutes this drains the remnants of the population under the tree and induce a tenfold increase in activity in the 35-300 m range. Because of this disturbance we divided the 300 Hz data in two parts before and after light pollution.

The range distributions are displayed in Fig.3c. The light pollution during the 300 Hz measurements increase the activity in the vicinity (35-300 m), but the range distribution is roughly the same. The activity associated with the tree disappear because of the light pollution, this is not the case for during the day of the 3000 Hz data with no light pollution. At night time aerofauna is detected at longer distances, this is the case for both 300 Hz and 3000 Hz measurements and could be due to increased activity of night active bats and moth high over ground (the beam height over ground increases after the tree at 516 m). As in previous studies<sup>35,37</sup>, the range distribution can be

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) <

6

roughly explained by a power law;  $N=N_0 r^{-\alpha}$ . We applied this fit for the range between the lidar and the tree with explanations grades ( $R^2$ ) larger than 96%, see lower right insert in Fig.3. The aim of this study was to investigate if high pulse energies during long exposures with slow sample rate could be used to detect smaller insects at further distance at expense of wingbeat information. In contrary we now find with significance by 95% confidence intervals in Fig.3 that 3000 Hz acquisition gives a lower  $\alpha$  value than 300 Hz. Thus 3000 Hz detected more insects at far distance and the absolute number is identical between the slow and fast rate mode (not considering the light pollution one of the days).

### B. Range Dependence of the Observable Span in the Biomass Spectrum

Are the insects seen in the 300 Hz and 3000 Hz data the same? Since wingbeat modulation is not resolved in the 300 Hz data our means of classification are limited to the range and sizing features discussed in Section III.D. In Fig.4 we plot detection range,  $r$ , against the size features  $\sigma$  and  $\delta$ . Again, we split the 300 Hz data into before and after light pollution at 19:00. In order to get a sense of the density of the 584571 observations during the 9 hours we diluted the scatter plot and only plots every 10<sup>th</sup> observation in Fig.4ac. The complete statistics is shown in Fig.4bd. The cross section,  $\sigma$ , measures in Fig.4ab spans three orders of magnitude in each of the modes, limited on the smaller side by detector read out noise and on the larger side by detector saturation which fairly unlikely (1:1000). This range essentially cover aero fauna from midges, fruit flies,

mosquitoes, through bees, moth and dragonflies to bats and swallows (see rough indication in Fig.4. right pane). The scatterplots in Fig.4a display a clear range dependent threshold. Beyond the range of complete overlap,  $r > 2r_0$ . This limit increase by the squared range,  $\sigma_{thrs} \propto r^2$ . This is essentially a consequence of the diffuse assumption in Eq.9. At a couple of Km detection limit reach the larger end of the biomass spectrum.

When lowering the sample rate tenfold, we do indeed see ten times smaller members of the aero fauna. The fact that the remaining and overlapping part of the biomass spectrum is consistent with the fast measurements displaying a typical  $N \propto \sigma^{-1}$  behavior gives us confidence in the calibration routines. In particular we see that much of the activity in the Ceiba tree shade are small insects falling below detection limit at 3000 Hz. This explain the missing feature in Fig.3a. Admittedly 10<sup>-2</sup> mm<sup>2</sup> seems small, low values could arise when exposure times,  $\tau$ , excess transit times,  $\Delta t$ . It could also be dust or pollen since we could not check for wing beats at 300 Hz.

The range of apparent sizes,  $\delta$ , is a smaller and limited on the small side by the size of the pixel footprints in the atmosphere and by the beam width on the larger side, see Fig.4c. The 300 Hz measurements could be subject to motion blur of wingbeats (The stripes arise from a pixel rounding operation).

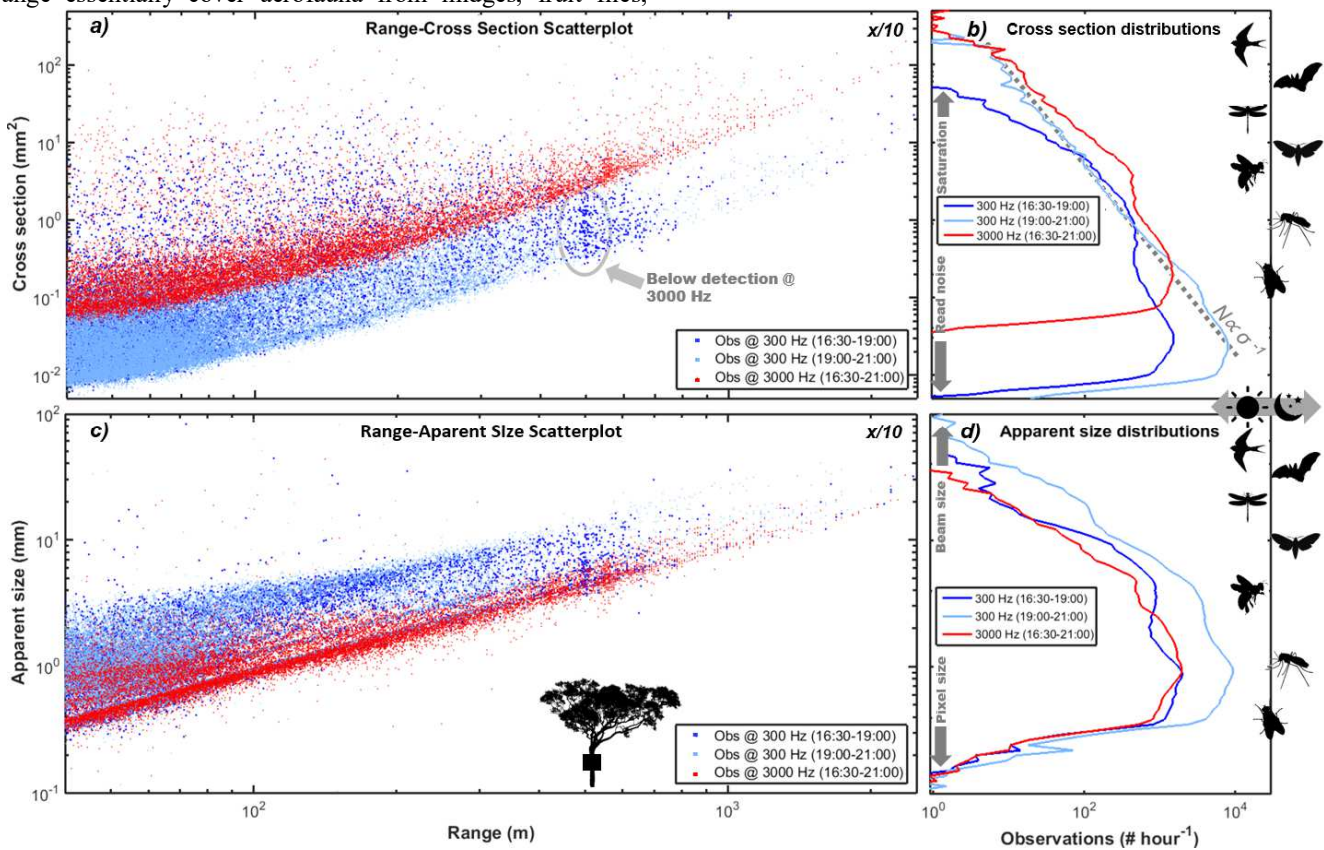


Fig.4 Range dependence of detected aero fauna sizes. 4a: Whereas large organisms can be detected in both modes and seldom saturate, smaller insects with smaller cross sections can be seen further away with long exposures at 300 Hz (note the activity under the tree which is not detected in 3000 Hz mode). 4b: The detected biomass is fairly consistent between the overlap in the two modes. In the evening larger organisms are seen at far distance, the distributed is roughly  $N \propto \sigma^{-1}$ . 4c: The apparent size share the same minimum in the two modes, but could be subject to motion blur smearing out features in the distribution in 4d.

&gt; REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) &lt;

7

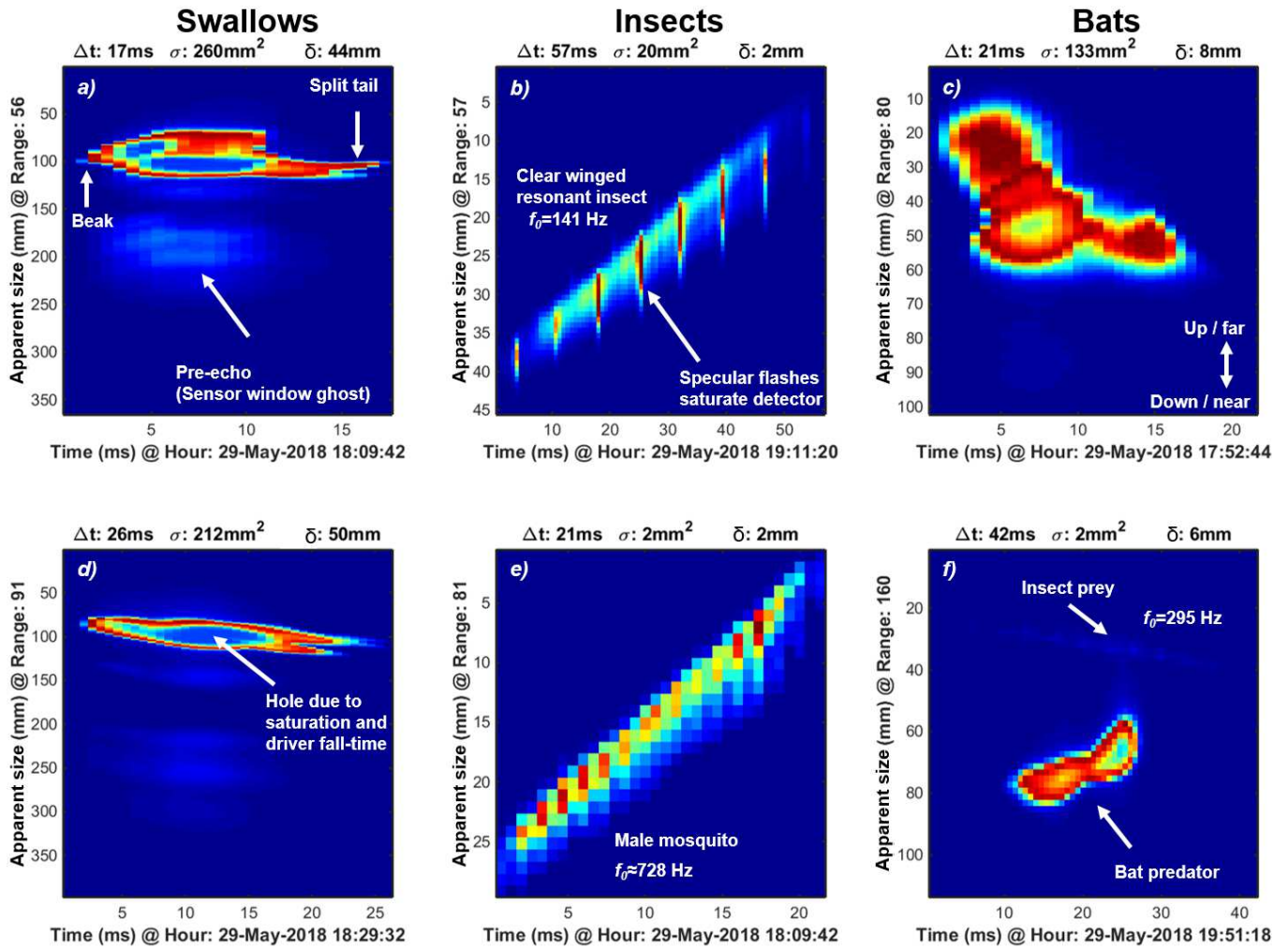


Fig.5 The signals of saturated events in the 3000 Hz were inspected individually. Some signals could be associated with swallows, insects and later bats. Not only vertebrates but also specular flashes from insects causes saturation. Note the associated parameters with each event around each subfigure. 5f display both a bat and an insect at 160 m distance.

### C. Inspection on saturated observations.

What caused saturation in entomological lidar? We used the 3000 Hz data and inspected the 21 saturated observations, see selected examples in Fig.5. In many cases nothing enlightening could be deduced from the signals, but some part of the observation could be attributed swallows, see Fig.5ad. When they intercept the beam they are scanned by the lidar line arrays, the observation start with the beak and ends with the split tail, see Fig.5ab. Because of the driver leakage between odd and even exposed in combination with the strong signal, it causes substantial signal in the  $I_{\text{even}}$ , consequently the lock-in subtraction produces a hole in the middle of the echo. Not only do strong signals saturate they also become weaker due to this (this hardware issue can be fixed).

Although vertebrates account for many of the saturated signals, specular flashes from insect wings also saturated the detector in several cases at 3000 Hz, see Fig.5be. These are peculiar cases, where specular flashes occur in a single 3000 Hz exposure of 310  $\mu\text{s}$ . This occur when wing surface normal coincide with the beam and when the membrane thickness resonate with the laser in backscattering (this happen when wing thickness is close to either 531, 797, 1063, 1329, 1595 or

1860 nm with a 808 nm lidar). Such flashes would be smeared out in time with the long exposures at 300 Hz rate. The crude reflectance,  $R_{\text{insect}}$ , of the case in Fig.5b is 500% compared to Lambertian white. However the size measures,  $\sigma$  and  $\delta$ , are temporal median of the observation omitting specular flashes. The instantaneous reflectance during the flash (which is hardly resolved in time), saturated at 1155%. Specular reflectance relate to diffuse reflectance accordingly;

$$R_{\text{Spec.}} = \frac{R_{\text{Lamb.}}}{\sin\left(\frac{\theta_{\text{rec}}}{2r}\right)^2} \approx \frac{R_{\text{Lamb.}}4r^2}{\theta_{\text{rec}}^2} \quad (\text{Eq.11})$$

At 57 m range a perfect mirror would imply 32  $10^6$  % compared to a diffuse white target. From this we understand that the  $r^2$  attenuation for omnidirectional scattering does not apply to specular flashes from wings which can propagate in a collimated manner. The  $r^2$  attenuation is generally accepted in the lidar community and also appear in Eq.9. But this explains why we see insects further away and a lower  $\alpha$  coefficient for faster rate in Fig.3. It also lead to a number of issues; can diffuse cross sections be used? Are oscillatory waveform in entomological lidar range dependent?

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) <

8

#### D. Apparent sizing and cross section

As a final aspect we looked into the covariance of the two size measures;  $\sigma$  and  $\delta$ , and we compared the quantities in the slow and fast acquisition mode, see Fig.6. When considering and comparing the two size measures it is important to think of how they are measured;  $\sigma$  from intensity and  $\delta$  from pixel spread. Thus a large  $\sigma$  could imply either a large organism or a shiny organism, whereas large  $\delta$  could imply a large or a motion blurred observation. The crude median NIR reflectance,  $\sigma\delta^{-2}$ , for 3000Hz is 24%. This is in accordance with our previous work<sup>25,55</sup> and can be attributed melanization. At 300 Hz, median reflectance drops to just 3% only corresponding to the refractive index difference. Melanin could not absorb 97% at 808 nm, so the losses would need to be explained by transmittance losses in the smaller organisms detected, also the minimum  $\delta$  is limited by the point spread function of a single pixel, so the actual size could be smaller than observed  $\delta$ . We find a main axis of  $\sigma\alpha\delta^2$  relation which to some extent validate the concept of cross section. We found a few but large observations to pertain to a  $\sigma\alpha\delta$  axis, we attribute this both saturation and situation where the organism size exceed the width of the pixel footprint and thus intensity scales linearly with the pixel spread.

We only found limited support for the volumetric scattering  $\sigma\alpha\delta^3$  from the idea of ballistic interaction, also this axis is primarily seen for larger organisms in the 300 Hz mode. It should be considered that, e.g., mosquitoes could appear larger in the 300 Hz mode since the fast wingbeat could increase both  $\sigma$  and  $\delta$ . In particular in the 3000 Hz mode we observe a very steep relation of  $\sigma\alpha\delta^6$ . Distinct melanization and observation aspect can change  $\sigma$  a factor three whereas  $\delta$  would be unaffected. However, it can be seen from Fig.6 that observations on the  $\sigma\alpha\delta^6$  ridge exceed 100% diffuse reflectance, thus they must be attributed specular scattering despite that  $\sigma$  is the temporal median thought to be insensitive to flashes. Finally, we found a  $\sigma\alpha\delta^{2/3}$  for the tiniest and most numerous observations. We restrain from over interpreting this, since these could be affected by minimum limits and we do not have experience in these scales.

#### V. CONCLUSIONS AND OUTLOOK

We evaluated entomological lidar recordings with slow and fast sample rates to investigate the dynamic and ranging properties. We could compare the performance although one of the measurement sessions included a light pollution event. We reported more than half million observations during nine hours at ranges up to couple of kilometers over the Ivorian bush. We provided an accurate analytical explanation for the retrieved air signal during homogeneous conditions. From this, we could reduce the lidar sensitivity to a single value which can be rescaled for laser power and atmospheric conditions and related to noise levels. We have discussed effects and provided corrections of the time-of-flight roundtrip delay and driver rise time for lock-in detection in Scheimpflug lidar. We revised cross section calibration for diffuse targets.

We could indeed verify that slow rates, with long exposures, high laser energies and a just single read-out noise, could section smaller organisms in the biomass spectrum and that the overlapping section is in agreement between the two rates. We also demonstrated a case where distant small insects in the tree shade fell under the detection limit of the fast acquisition, but could be detected by the slow sample rate. However, the total number of observations with slow and fast rate was similar, since fast acquisition observed insects significantly further away, we speculate that this is related to rapid flashes of specular scattering dominating over distances. The overlapping region of the biomass spectrum was fairly consistent between slow and fast mode and displayed a plain reciprocal relation  $N\alpha\sigma^{-1}$  (note that this is not compensated for probe volumes of detectable intervals at different ranges).

Through closer inspection of saturated events at 3000 Hz we could identify large vertebrate insectivores such as swallows and bats. We could also identify insects by wingbeat and demonstrate intensive flashes and realistic size measures for mosquitoes comparing to previous literature<sup>25,53</sup>.

We investigated the covariance of cross section and apparent size, while much of the data supported the idea of a diffuse cross section with a  $\sigma\alpha\delta^2$  relation some events did not follow the assumption of smaller organism size than probe volume ( $\sigma\alpha\delta^2$ ).

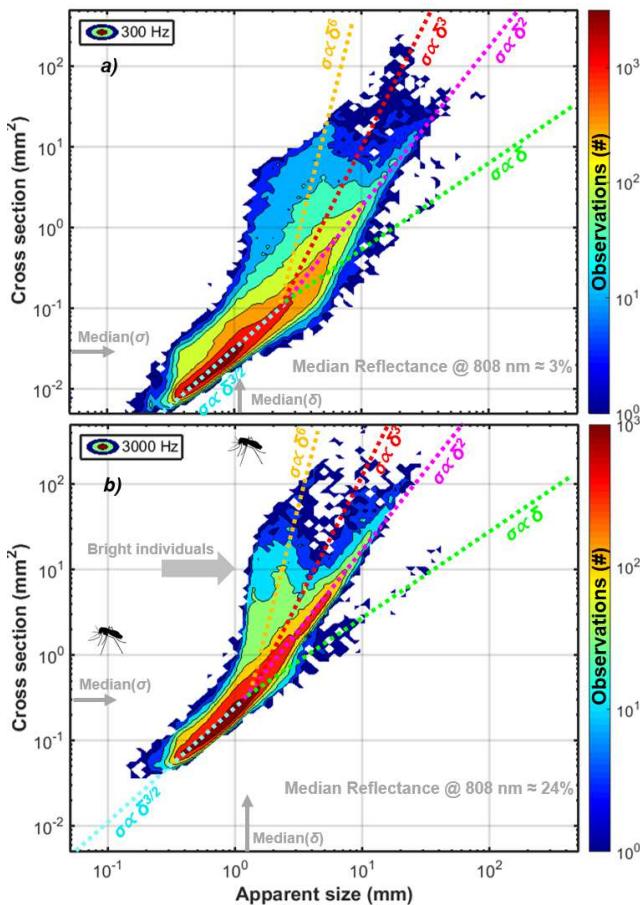


Fig.6 Covariation of backscatter cross section and apparent size for both 300 Hz and 3000 Hz. Various power relations are displayed ranging from linear relation of saturated observations to quadratic relation from diffuse target to a steep cluster exceeding 100% diffuse reflectance.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) <

9

Another group displayed diffuse reflectance exceeding 100%, and were interpreted as glossy. This analysis would much benefit from a more refined study at fast rate separating and resolving size contributions from bodies and wings.

From an ecological perspective we observed the effect of shade of large trees, which is well-known<sup>56</sup>. After sunset we could observe how this range feature disperses, and also how a light pollution event drastically changed the insect activity within minutes within ca. 300 m vicinity of the light. In the relatively dark area surrounding the campus, such light pollution would have an impact on the biodiversity<sup>57</sup> and disturb local bat and insect populations<sup>58,59</sup>. We could identify a predating bat during the dark evening, with a prey with slightly lower wing beat frequencies than mosquitoes. But bats are able to consume around two thousand mosquitoes per night per bat<sup>60</sup>. Indeed, it seems possible that bats may reduce mosquito populations at least locally, and hence reduce malaria transmission, but hard data showing this remains to be seen.

#### DATA AVAILABILITY

The data presented here may be obtained by contacting the authors. The raw data is approximately 500 Gb.

#### ACKNOWLEDGMENT

We appreciate the assistance and good company during the campaign in Ivory Coast, in particular thanks to: Konin Edoukoua, Yebouet Akissi Marie Florence, Kossonou Alvarez Taky Yao, Francois PiuZZi and Bagui Kossan Olivier.

#### REFERENCES

- [1] S. Seibold, M. M. Gossner, N. K. Simons, *et al.*, "Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers," *Nature*, vol. 574, pp. 671-674, 2019.
- [2] C. Rich and T. Longcore, *Ecological consequences of artificial night lighting*: Island Press, 2013.
- [3] X. Giam, "Global biodiversity loss from tropical deforestation," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, pp. 5775-5777, 2017.
- [4] V. A. Drake and D. R. Reynolds, *Radar entomology : observing insect flight and migration* Wallingford, Oxfordshire ; Boston, MA: CABI, 2012.
- [5] W. Daniel Kissling, D. E. Pattemore, and M. Hagen, "Challenges and prospects in the telemetry of insects," *Biological Reviews*, vol. 89, pp. 511-530, 2014.
- [6] G. Hu, K. S. Lim, N. Horvitz, *et al.*, "Mass seasonal bioflows of high-flying insect migrants," *Science*, vol. 354, pp. 1584-1587, 2016.
- [7] V. A. Drake, J. W. Chapman, K. S. Lim, *et al.*, "Ventral-aspect radar cross sections and polarization patterns of insects at X band and their relation to size and form," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, pp. 5022-5044, 2017/09/17 2017.
- [8] I. Potamitis, I. Rigakis, and N.-A. Tatlas, "Automated Surveillance of Fruit Flies," *Sensors*, vol. 17, p. 110, 2017.
- [9] J. Wang, S. Zhu, Y. Lin, *et al.*, "Mosquito counting system based on optical sensing," *Applied Physics B*, vol. 126, p. 28, 2020.
- [10] K. Bjerger, M. V. Sepstrup, J. B. Nielsen, *et al.*, "A light trap and computer vision system to detect and classify live moths (Lepidoptera) using tracking and deep learning," *bioRxiv*, 2020.
- [11] Y. Zhong, J. Gao, Q. Lei, *et al.*, "A vision-based counting and recognition system for flying insects in intelligent agriculture," *Sensors*, vol. 18, p. 1489, 2018.
- [12] I. Rigakis. (2020). *Insectronics*. Available: <https://www.insectronics.net/>

TABLE I  
VARIABLES, VALUES AND UNITS

Symbol	Quantity	Value	Unit
<i>EXPERIMENTAL CONDITIONS:</i>			
$r$	Range from lidar	35..2000	m
$r_{term}$	Range to calibration target	516	m
$R_{term}$	Reflectance of calib. target	1.8	%
$f_s$	Line rate	3000 & 300	Hz
$\tau$	Exposure time	310 & 3313	$\mu$ s
$E_0$	Laser energy/exposure	0.3 & 2.8	mJ
$c$	Speed of light	299792	Kms <sup>-1</sup>
$n_{air}$	Refractive index of air	1.003	-
$\mu_s$	Atmospheric scatter	0.11	Km <sup>-1</sup>
<i>SCHEIMPFLUG LIDAR SPECIFICATIONS:</i>			
-	Baseline separation	814	mm
$\lambda$	Wavelength of the lidar	808 $\pm$ 2	nm
$P$	Laser diode peak power	3 @ 3A	W
-	Laser emission chip size	9 $\times$ 200	$\mu$ m
$O_{exp}$	Expander aperture	102	mm
$F_{exp}$	Expander focal length	500	mm
$\eta$	Expander output coupling	28	%
$O_{rec}$	Receiver aperture	204	mm
$F_{rec}$	Receiver focal length	800	mm
-	Detection filter	808 $\pm$ 3	nm
$\theta_{sens}$	Sensor tilt	45	$^\circ$
$\ell_{pix}$	Pixel size	14 $\times$ 200	$\mu$ m
$p$	Pixels	1..2048	#
<i>CALIBRATION AND ANALYSIS VARIABLES:</i>			
$r_0$	Range of half overlap	79.4	m
$S$	Lidar sensitivity	5200	Bits Km mJ <sup>-1</sup>
$G$	Instrument gain factors	0..1	-
$I$	Lidar intensity counts	0..2 <sup>16</sup> -1	16 bit
$\gamma$	Shape parameter form factor	1.8	-
$\sigma$	Backscatter cross section	10 <sup>-2</sup> ..10 <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>
$\delta$	Apparent size	0.5..100	mm
$\Delta t$	Transit time		ms
$\alpha$	Observed range dependence	1.2..2.2	-
$R$	Diffuse reflectance		
$N$	Number of insects	10 <sup>0</sup> ..10 <sup>5</sup>	#
$R^2$	Adjusted goodness of fit	0-100	%

\* diffraction limited size

- [13] F. Tårnhøj. (2015). *FaunaPhotonics*. Available: [www.faunaphotonics.com](http://www.faunaphotonics.com)
- [14] M. Brydegaard and S. Svanberg, "Photonic monitoring of atmospheric and aquatic fauna," *Laser & Photonics Reviews*, 2018.
- [15] K. S. Repasky, J. A. Shaw, R. Scheppelle, *et al.*, "Optical detection of honeybees by use of wing-beat modulation of scattered laser light for locating explosives and land mines," *Appl. Opt.*, vol. 45, pp. 1839-1843, 2006.
- [16] Z. Guan, M. Brydegaard, P. Lundin, *et al.*, "Insect monitoring with fluorescence lidar techniques: Field experiments," *Appl. Opt.*, vol. 49, pp. 1-11, 2010.
- [17] M. Brydegaard, A. Gebru, and S. Svanberg, "Super resolution laser radar with blinking atmospheric particles – application to interacting flying insects," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 147, pp. 141-151, 2014.
- [18] L. Mei and P. Guan, "Development of an atmospheric polarization Scheimpflug lidar system based on a time-division multiplexing scheme," *Optics Letters*, vol. 42, pp. 3562-3565, 2017/09/15 2017.
- [19] M. Brydegaard, E. Malmqvist, S. Jansson, *et al.*, "The Scheimpflug Lidar Method," *SPIE Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring*, vol. 10406, 2017.
- [20] M. Brydegaard, A. Gebru, C. Kirkeby, *et al.*, "Daily evolution of the insect biomass spectrum in an agricultural landscape accessed with lidar," in *EPJ Web of Conferences*, 2016, p. 22004.
- [21] C. Kirkeby, M. Wellenreuther, and M. Brydegaard, "Observations of movement dynamics of flying insects using high resolution lidar," *Scientific Reports*, vol. 6, p. 29083, 07/04/online 2016.

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) < 10

- [22] M. Brydegaard, S. Jansson, E. Malmqvist, *et al.*, "Lidar reveals Activity Anomaly of Malaria Vectors during Pan-African Eclipse," *Science Advances*, 2020.
- [23] M. Brydegaard and S. Jansson, "Advances in Entomological Laser Radar," presented at the IET Intentional Radar Conference, Nanjing, China, 2018.
- [24] S. Zhu, E. Malmqvist, Y. Li, *et al.*, "Insect abundance over Chinese rice fields in relation to environmental parameters, studied with a polarization-sensitive CW near-IR lidar system," *ILRC28*, 2017.
- [25] A. Gebru, S. Jansson, R. Ignell, *et al.*, "Multiband modulation spectroscopy for determination of sex and species of mosquitoes in flight," *J. Biophotonics*, vol. 11, 2018.
- [26] A. P. Genoud, R. Basistyy, G. M. Williams, *et al.*, "Analysis of predictor variables for mosquito species identification from dual-wavelength polarization-sensitive lidar measurements," in *SPIE Asia-Pacific Remote Sensing*, 2018, p. 13.
- [27] C. Kirkeby, K. Rydhmer, S. M. Cook, *et al.*, "Advances in automatic identification of flying insects using optical sensors and machine learning," *Scientific Reports*, 2020.
- [28] E. Malmqvist, S. Jansson, S. Zhu, *et al.*, "The bat-bird-bug battle: daily flight activity of insects and their predators over a rice field revealed by high resolution Scheimpflug Lidar" *Royal Society Open Science*, vol. 5, 2018.
- [29] S. Jansson, E. Malmqvist, M. Brydegaard, *et al.*, "A Scheimpflug lidar used to observe insect swarming at a wind turbine," *Ecological Indicators*, vol. 117, p. 106578, 2020.
- [30] M. Goerke, Z. Ulanowski, G. Ritter, *et al.*, "Characterizing ice particles using two-dimensional reflections of a lidar beam," *Applied optics*, vol. 56, pp. G188-G196, 2017.
- [31] M. Vollmer and J. A. Shaw, "Brilliant colours from a white snow cover," *Physics Education*, vol. 48, p. 322, 2013.
- [32] M. Brydegaard, S. Jansson, M. Schulz, *et al.*, "Can the narrow red bands of dragonflies be used to perceive wing interference patterns?," *Ecology and evolution*, vol. 8, pp. 5369-5384, 2018.
- [33] J. A. Shaw, N. L. Seldomridge, D. L. Dunkle, *et al.*, "Polarization lidar measurements of honey bees in flight for locating land mines," *Opt. Expr.*, vol. 13, pp. 5853-5863, 2005.
- [34] Z. Liu, L. Li, H. Li, *et al.*, "Preliminary studies on atmospheric monitoring by employing a portable unmanned Mie-scattering Scheimpflug lidar system," *Remote Sensing*, vol. 11, p. 837, 2019.
- [35] K. Rydhmer, J. Prangma, M. Brydegaard, *et al.*, "Lidar profiling of bee activity patterns and foraging distributions," *Animal Telemetry*, Submitted 2020.
- [36] M. J. Tauc, K. M. Frstrup, K. S. Repasky, *et al.*, "Field demonstration of a wing-beat modulation lidar for the 3D mapping of flying insects," *OSA Continuum*, vol. 2, pp. 332-348, 2019/02/15 2019.
- [37] S. Jansson, E. Malmqvist, Y. Mlacha, *et al.*, "Real-time dispersal of malaria vectors in rural Africa monitored with lidar," *Submitted*, 2020.
- [38] B. K. Kouakou, S. Jansson, M. Brydegaard, *et al.*, "Entomological Scheimpflug lidar for estimating unique insect classes in-situ field test from Ivory Coast," *OSA Continuum*, vol. 3, pp. 2362-2371, 2020/09/15 2020.
- [39] E. Malmqvist, "From Fauna to Flames: Remote Sensing with Scheimpflug Lidar," Lund University, 2019.
- [40] S. Jansson, "Entomological Lidar: Target Characterization and Field Applications," Lund University, 2020.
- [41] Y. Li, K. Wang, R. Quintero-Torres, *et al.*, "Insect flight velocity measurement with a CW near-IR Scheimpflug lidar system," *Optics Express*, vol. 28, pp. 21891-21902, 2020/07/20 2020.
- [42] G. Zhao, E. Malmqvist, S. Török, *et al.*, "Dual-band continuous-wave lidar system employed for particle classification," *Appl. Opt.*, vol. To appear, 2018.
- [43] L. Mei and M. Brydegaard, "Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system," *Optics Express*, vol. 23, pp. A1613-A1628, 2015.
- [44] E. Malmqvist, M. Brydegaard, M. Aaldén, *et al.*, "Scheimpflug Lidar for combustion diagnostics," *Optics Express*, 2018.
- [45] J. Larsson, J. Bood, C. T. Xu, *et al.*, "Atmospheric CO2 sensing using Scheimpflug-lidar based on a 1.57um fiber source," *Optics Express*, vol. 27, pp. 17348-17358, 2019/06/10 2019.
- [46] K. Stelmaszczyk, M. Dell'Aglio, S. Chudzynski, *et al.*, "Analytical function for lidar geometrical compression form-factor calculations," *Appl. Opt.*, vol. 44, pp. 1323-1331, 2005.
- [47] S. Zhu, E. Malmqvist, W. Li, *et al.*, "Insect abundance over Chinese rice fields in relation to environmental parameters, studied with a polarization-sensitive CW near-IR lidar system," *Applied Physics B*, vol. 123, 2017.
- [48] J. Riley, "Angular and temporal variations in the radar cross-sections of insects," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1973, pp. 1229-1232.
- [49] M. Brydegaard, "Towards quantitative optical cross sections in entomological laser radar – Potential of temporal and spherical parameterizations for identifying atmospheric fauna," *PLoS One*, vol. 10, p. e0135231, 2015.
- [50] D. G. Stavenga, "Thin film and multilayer optics cause structural colors of many insects and birds," *Materials Today: Proceedings*, vol. 1, pp. 109-121, 2014/01/01 2014.
- [51] M. Brydegaard and S. Svanberg, "Photonic Monitoring of Atmospheric and Aquatic Fauna," *Laser & Photonics Reviews*, p. 1800135, 2018.
- [52] M. Li, S. Jansson, A. Runemark, *et al.*, "Bark beetles as lidar targets and prospects of photonic surveillance," *Journal of Biophotonics*, 2020 submitted.
- [53] S. Jansson, P. Atkinson, R. Ignell, *et al.*, "First Polarimetric Investigation of Malaria Mosquitoes as Lidar Targets," *IEEE JSTQE Biophotonics*, vol. 25, pp. 1-8, 2018.
- [54] A. P. Genoud, Y. Gao, G. M. Williams, *et al.*, "Identification of gravid mosquitoes from changes in spectral and polarimetric backscatter cross-sections," *Journal of biophotonics*, p. e201900123, 2019.
- [55] M. Brydegaard, "Advantages of shortwave infrared LIDAR entomology," in *Imaging and Applied Optics 2014*, Seattle, Washington, 2014, p. LW2D.6.
- [56] J. Rydell, A. Entwistle, and P. A. Racey, "Timing of foraging flights of three species of bats in relation to insect activity and predation risk," *Oikos*, pp. 243-252, 1996.
- [57] F. Hölker, C. Wolter, E. K. Perkin, *et al.*, "Light pollution as a biodiversity threat," *Trends in ecology & evolution*, vol. 25, pp. 681-682, 2010.
- [58] J. Rydell, J. Eklöf, and S. Sánchez-Navarro, "Age of enlightenment: long-term effects of outdoor aesthetic lights on bats in churches," *Royal Society open science*, vol. 4, p. 161077, 2017.
- [59] J. Rydell, M. Gelang, S. Musila, *et al.*, "Bats roosting – Switch-off the lights, please!," *African Conservation Telegraph*, vol. 15, 2019.
- [60] J. Rydell, D. P. McNeill, and J. Eklöf, "Capture success of little brown bats (*Myotis lucifugus*) feeding on mosquitoes," *Journal of Zoology*, vol. 256, pp. 379-381, 2002.



**Mikkel Brydegaard** was born in Copenhagen 1980, received his Msc in Electrical Engineering 2007 and his Phd in Atomic Physics 2012, Docent 2015 all from Lund University. Experienced in instrumentation, optical spectroscopy, bio-photonics, remote sensing and applied mathematics. In post-graduate years Brydegaard pursued research in Stellenbosch and Oslo and his work focused on lidar monitoring of aero-fauna, in particular contributing with the Scheimpflug lidar method. He is currently principal investigator at Dept. Physics and Dept. Biology and senior researcher at Norsk Elektro Optikk.



**Benoit Kouakou** was born in Adjamé, Abidjan, Côte d'Ivoire in 1980. He received the Bachelor's degree in Applied and Fundamental Science in 2009 and Master's degree in Photonics in 2015 from the University of Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire. He is currently pursuing a doctoral degree in the field of entomological remote sensing and spectroscopy at National Polytechnic Institute in Yamoussoukro with scheduled defense later this year.

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) <

11



**Samuel Jansson** was born in Stockholm, Sweden, in 1988. He received the M.Sc. degree in engineering physics in 2015 and the Ph.D. degree in optical remote sensing of insects in 2020, both from the Dept. of Physics at Lund University, Lund, Sweden. He contributed to 22 papers, obtained 1 patent and co-supervised 4 student theses. He is currently working as a researcher at the Department of Biology at Lund University. His research interests include entomological lidar, radar, and machine learning techniques and how they can be applied to studying vector ecology, migration ecology and insect decline.



**Jens Rydell** was born in Sweden 1953, received PhD 1990 in Animal Ecology at Lund University. Ass. Professor in Zoology at Gothenburg University in 1998. Primary research on the biology of bats and insects with the focus on ultrasonic echolocation and communication, specifically bat-insect interactions, granted by the Swedish Research Council 1992-2005. Subsequently (2009-present), granted by the Swedish Energy Agency, researching the environmental consequences of wind farming, and designing mitigation measures to minimize the killing of bats. Most recently engaged in researching the negative effect of light pollution on nocturnal animals, specifically bats. Author of ca 150 refereed research papers and several books and other articles. Received the Swedish Research Council Researcher Award in 2000, the Royal Swedish Academy of Science Conservation Award in 2017 and the Skåne Wind Farming Academy Prize in 2017.



**Jeremie Zoueu** is a professor of Photonics at the National Polytechnic Institute (INP-HB) in Yamoussoukro (Cote d'Ivoire). In 1992, he received a M.S. degree in the field of Laser Engineering at Galilee Institute in Paris (University of Paris XIII) and holds a Ph.D. in physics from Pierre & Marie Curie University in France in the field of lasers and photonic materials in 1996. He is currently the Director of the Interdisciplinary Research and Innovation Unit and the founder and head of the Instrumentation, Imaging and Spectroscopy Laboratory at INP-HB. On the international level, he is the coordinator of the African Spectral Imaging Network (AFSIN) and also a VCU (Virginia Commonwealth University) Affiliate Faculty.

# High Dynamic Range in Entomological Scheimpflug Lidars

Mikkel Brydegaard<sup>1,2,3,4</sup>, Benoit Kouakou<sup>4</sup>, Samuel Jansson<sup>1,2</sup>, Jens Rydell<sup>2</sup>, Jeremie Zoueu<sup>4</sup>

**Abstract—** Minimizing insecticide use, preventing of vector diseases and facilitating biodiversity assessments are suitable applications of recent advances in photonic insect surveillance and entomological lidar. The tools also comprise a new window into fundamental aspect of the fascinating life and ecology of insects and their predators *in situ*. Compared to conventional insect assessment by sweep nets and specialized traps of numerous designs, entomological lidar provides much larger counts and statistics allowing for analysis of minute details in time and space. Although the lidar penetration into the phylogenetic tree cannot be compared to microscopic and genetic analysis of trap catches, the classification can in principle be instantaneous and lidar can provide a representative picture of flight activity across all species. At the same time, it is evident that lidars are subject to finite detection range given by the instrument noise and saturation levels, and therefore, intervals of the biomass spectra are sectioned at different ranges. The Scheimpflug lidar allows an interesting trade-off between fast sample rate and low pulse energy for retrieving wing beat harmonics and slow sample rates with high pulse energy for detecting small species far away. In this paper, we revise calibration, sizing and associated deficiencies, and report count rates to  $10^4$  insects/minute up to 2 km range. We investigate if and how high dynamic range can be exploited in entomological lidar and also how fast and slow sample rates could complement each other and capture a wider span of the biomass spectrum.

**Index Terms—** Aerofauna, Biophotonics, Ecology, Entomology, Environmental Monitoring, Laser Radar, Lidar, Remote Sensing.

## I. BACKGROUND AND MOTIVATION

THE changing climate and the ongoing anthropogenic conversion of our landscape<sup>1</sup> leads to extinction of pollinating insects as well as invasion of new territories by pests and disease vectors. Pesticide overuse and light pollution<sup>2</sup> pushes beneficiary insects and insectivores back towards the few remaining nature reserves, particularly in the tropics<sup>3</sup>. A rapidly changing world requires swift measures for conservation ecology which in term set demands for rapid diagnostics tools *in situ*. However, when it comes to entomological surveys we find ourselves blinded from the grand overview; what species to catch? Which traps to use?

Submitted 1<sup>st</sup> October 2020. This work was supported by the Royal Physiographic Society in Lund, the Crafoord Foundation, the African Spectral Imaging Network by International Science Program in Uppsala, the Félix Houphouët-Boigny Institute, the Swedish Research Council, the European Research Council through the ERC starting grant *BugFlash*.

M. Brydegaard ([mikkel.brydegaard@fysik.lth.se](mailto:mikkel.brydegaard@fysik.lth.se)), S. Jansson ([Jansson.Samuel@gmail.com](mailto:Jansson.Samuel@gmail.com)) and J. Rydell ([jens.rydell@telia.com](mailto:jens.rydell@telia.com)) is with the Lund University, Dept. Physics and Dept. Biology, Lund, Sweden. M. Brydegaard is also with Norsk Elektro Optikk, Oslo, Norway and co-founder of FaunaPhotonics, Denmark. B. Kouakou ([benoitkouakou@gmail.com](mailto:benoitkouakou@gmail.com)) and J.Zoueu ([jzoueu@yahoo.fr](mailto:jzoueu@yahoo.fr)) is at Félix Houphouët-Boigny Institute, at the Instrumentation, Imaging and Spectroscopy Laboratory, Yamoussoukro, Ivory Coast.

How many? Where to position traps in the landscape and when to empty and with what frequency? The following, analysis of traps catches will take month of work by dedicated experts, even in a limited study.

This calls for engineering solutions and, hence, insect surveillance was pursued from the 1970<sup>th</sup> by radar<sup>4,5</sup>. Important insights in insect migration insects have been revealed<sup>6</sup> as well as clues to target identity<sup>7</sup>. However, ground-clutter constrains the applicability of radar near the ground.

Distributed sensors, or E-traps, have been proposed<sup>8-11</sup> including commercial initiatives<sup>12,13</sup>. Much of the discussion regarding positioning of the trap, the lure and species biasing is however well known from the use of conventional traps.

Entomological laser radar<sup>14</sup>, hereafter called lidar, emerged 15 years ago<sup>15,16</sup>. In particular, the Scheimpflug lidar concept<sup>17-19</sup> greatly increased the efficiency of counting insects *in situ*<sup>20-22</sup>. Implementation of multiple wavelength<sup>23</sup>- or polarization<sup>24</sup>-bands makes it possible to interact with molecules and microstructure in distant insects and improve target classification<sup>25-27</sup>. Lidar also allow to study species over a large size span from midges to vertebrate insectivores<sup>20,28,29</sup>.

The optical power of presented E-traps and entomological lidars does not differ noticeably, but the great advantage of lidars is that the laser light is recycled meter after meter, thus a relatively large probe volume can be trans-illuminated by a sufficient intensity. Consequently, lidars yield insect counts several orders of magnitudes higher than E-traps. Whereas radar echoes decrease by  $r^4$ , since both the beam and the backscatter diverge, lidar signals are generally thought to decrease by  $r^2$  since only the backscatter diverges. This is, however, not necessarily true for flat and specular targets<sup>30,31</sup>. This also include insect wings<sup>32</sup> and some effects of this will be presented in this report.

In principle, lidars can be used vertically<sup>29</sup> or swept to produce radial 2D scans<sup>33-35</sup> or spherical 3D scans<sup>36</sup>. In practice, there are few report attempting to quantitatively evaluate and interpret range profiles of insects<sup>35,37</sup>. A major challenge is the necessity of accurate knowledge of the beam shape at all distances and the handling of range dependent detection limits. The latter implies that specific sections of the aerofauna biomass spectrum is captured at different ranges.

In this paper we will first revise entomological lidar calibration. We will then comparatively investigate the detection limits for insect sizing and ranging for long and short exposures with high- respectively low- pulse energies. Interesting ecological aspects of how aerofauna activity changes during the course of the day in relation to vegetation and light pollution is also presented.



## II. TEST RANGE AND INSTRUMENTATION

### A. Test Range

The Ivorian Scheimpflug lidar<sup>38</sup> is positioned on second floor in the Instrumentation, Imaging and Spectroscopy laboratory, at Félix Houphouët-Boigny Institute, Yamoussoukro, Ivory Coast. It overlooks the Ivorian bush with agricultural patches with cassava and banana. Ground features also include mango trees, palms and termite mounds. At the campus, abandoned houses and a partly collapsed basement provide shelter for

### B. Scheimpflug Lidar

The instrument used is an entomological Scheimpflug lidar. The design resemble similar systems elsewhere<sup>17,19,21,22,24,37,39-42</sup>. Such systems comprise a baseline mounted on a motorized tripod, with a transmitter in one end and a receiver in the other. The specifications are given in Table 1. The lidar data is acquired by a USB2 camera (Glaz LineScan1, Synertronic Design, South Africa) with a linear CMOS sensor (S11639-01, Hamamatsu, Japan). The device is controlled by custom made

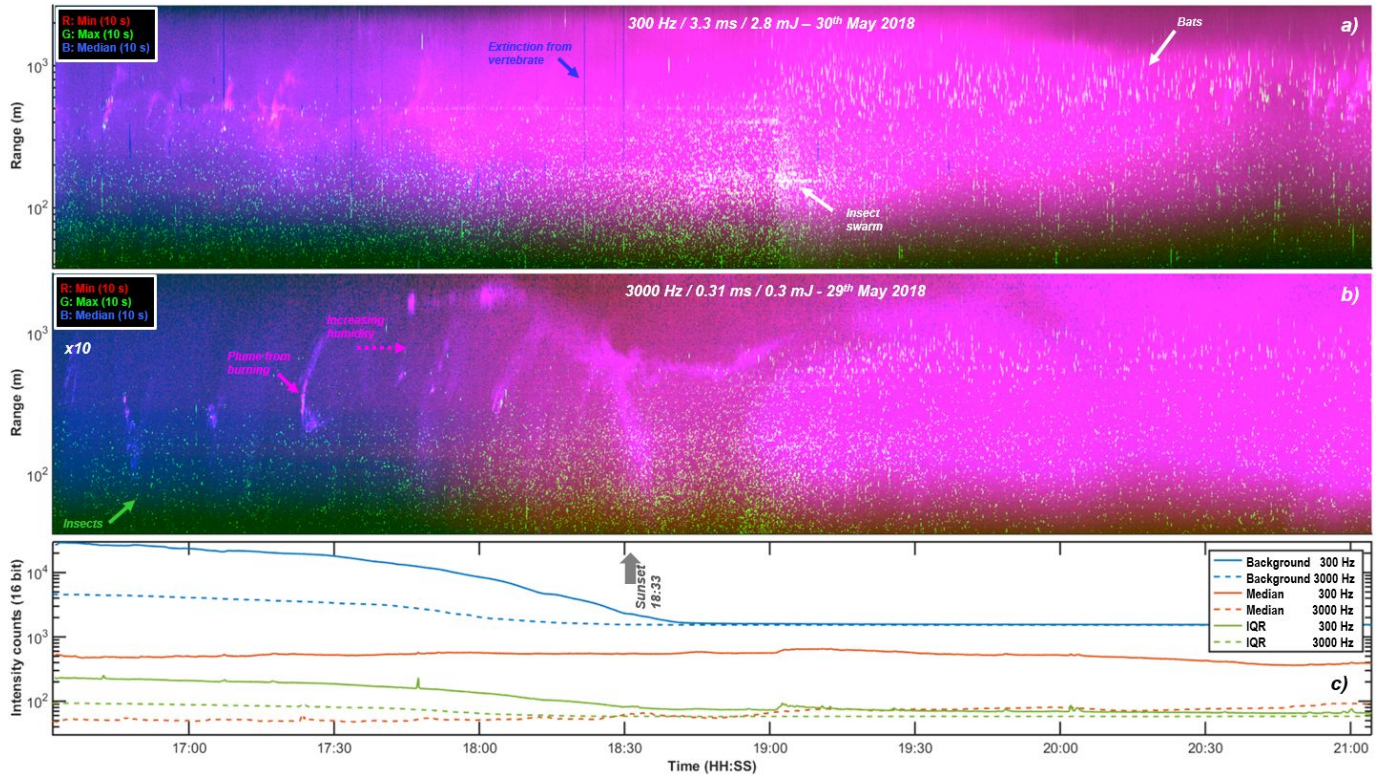


Fig.1 Time-range overview maps of the two successive evenings reported. The maps are color-coded such that each column represent the temporal minimum-, median- and maximum- value for each pixel in each 10 s data file. Note that the range scale is logarithmic. During the evening the humidity and atmospheric scatter coefficient increases, this increases the static atmospheric echo reflected minimum and median by purple color. Occasional plumes also affect the static air echo. Insects causes narrow spikes to the maximum signal and are seen as green dots. Large vertebrates can efficiently extinguish the entire beam hereafter atmospheric echo diminish, this is seen as blue lines in 1a. The brightness in 1b have been increased tenfold to compensate for the shorter exposure. The lower pane 1c, display how the average properties of background sunlight (dark exposures), air signal (median) and noise (inter quartile range, IQR) changes throughout the evenings.

horseshoe bats and swallows. We report evening data from the late hot and dry season with stable and reproducible weather. The transect starts at 6°56'26.4''N 5°13'28.7'' W and closely passes under the canopy of a huge silk-cotton *Ceiba* tree at 6°53'30.1''N 5°13'13.4''W located 516 m away heading 84°. A black neoprene calibration target is mounted on the trunk of the tree. The beam is horizontal and fluctuating between 6 m and 14 m over ground in the reported transect.

interface provided by the producer. In this study, the sensor and lidar was operated at two distinct sampling rates of 300 Hz and 3000 Hz in two consecutive evenings. The sampling frequency and strobe signal in turn control the laser diode modulation, and respective laser energy per exposure is estimated to 2804  $\mu$ J and 225  $\mu$ J.

## III. DATA AND CALIBRATION

In this section we revise the data format and calibration procedures, including various refinement compared to our earlier reports<sup>20,39,40</sup>.

### A. Data format

Raw data is saved in files spanning 10 s each. These include 16 Bit light intensity measurements,  $I_{(r,t)}$ , in 2048 pixel and either 3000 or 30000 exposures for 300 Hz and 3000 Hz sample rate respectively. The odd exposures,  $I_{odd}$ , include laser light,  $I_{bright(r)}$ , background light,  $I_{bgr(r)}$ , and dark current,  $I_{dark(r)}$ . The

even exposures,  $I_{even}$ , include background light and dark current. Note that the dark current is denoted with range (pixel) dependency, this is because of structured dark current on CMOS and potential temperature gradients on the sensor.

We collected data during 4½ hours around sunset, acquired two consecutive days with fast and slow sample rates. In Fig.1, an overview of the dataset is presented. In these color-coded range-time maps, the minimum-, median- and maximum-intensity value of each file is displayed in each column.

### B. Range Calibration and Resolution

Range calibrations are discussed in previous work<sup>39,40,43,44</sup>. We calibrated the range,  $r$ , by the geometry of our lidar instrument and GPS coordinates of the lidar and a calibration target at 516 m distance. Due to the triangulating nature of Scheimpflug lidar, range resolution is thought to deteriorate tangentially or approximately with  $r^2$ . However, the resolution also depends on the beam width<sup>44</sup>, and by strategically choosing the beam expander size<sup>19</sup> it is possible to compensate this deterioration by a converging beam and attain a linearly deteriorating range uncertainty typically in the order of 3%. Whereas ranges between lidar and calibration target is fairly accurate, it can be expected that small inaccuracies can cause ranging error to drift when extrapolating at further ranges than the calibration target. See further discussion<sup>45</sup>.

### C. Instrument Function and Atmospheric Return

Just as other instruments, such as spectrometers, have a response function for, e.g., different wavelengths, lidars have a range dependent sensitivity, referred to as the *lidar form factor*. This function is distinct for the distributed atmospheric propagation media and also for diffuse- and specular- hard targets. Because the depth of each successive probe volume of Scheimpflug lidars increases by  $r^2$ , then the back scatter increases accordingly. This implies that the atmospheric return in Scheimpflug lidars are not subject to  $r^2$  attenuation, as known from *Time-of-Flight* lidars. The lidar formfactor is therefore equivalent to the fraction of laser light transilluminating each pixel footprint in the atmosphere. Due to beam expansion, the beam is typically wider the *Field-of-View* at close distance. This is known as the region of incomplete overlap. The overlap function of Scheimpflug lidars can be expressed as:

$$G_{overlap(r)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{r_0}{r}\right)^\gamma} \quad (Eq.1)$$

This logistic function on logarithmic base resembles previous analytical overlap functions<sup>46</sup>. The  $r_0$  denotes range of half overlap and  $\gamma$  is a steepness factor. For our setup we found  $r_0 = 79$  m, and  $\gamma=1.8$ . Previous work<sup>19</sup> gives a longer indication of complete overlap than  $2r_0$ . We note that it is comparable but the previous estimate is based on geometrical optics and gives a longer and more restrictive value.

Scheimpflug lidars, commonly employ synchronized *lock-in* detection for background rejection<sup>18,42,47</sup>. This implies that the

laser is switched *on-* and *off* between even and odd exposures, and that the difference constitutes the lidar signals. As in ordinary lock-in detection, there can be a phase delay,  $\varphi$ , between the sampling (line array exposures) and the carrier wave after the round trip. Thus,  $\varphi$  is range dependent and with high sample rate the signal and dark timeslot will eventually swap for the distant pixels. This phenomena can be expressed and corrected for by a rotational matrix operation;

$$\begin{bmatrix} I_{bright(r)} \\ I_{bgr(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos & \sin \\ -\sin & \cos \end{bmatrix}^{\varphi(r)} \begin{bmatrix} I_{odd(r)} - I_{dark(r)} \\ I_{even(r)} - I_{dark(r)} \end{bmatrix} \quad (Eq.2)$$

$$\varphi(r) = \frac{\pi f_s r n_{air}}{c} + \varphi_{driver} \quad (Eq.3)$$

$$I_{sig(r,t)} = I_{bright(r,t)} - I_{bgr(r,t)} \quad (Eq.4)$$

Ideally there is no driver delays, but we detected  $\varphi_{driver} = 0.9^\circ$  @  $f_s=300$  Hz and  $4.1^\circ$  @  $f_s=3000$  Hz. This constitute a laser leak from odd to even exposures of 1.6% and 7% respectively. The reason is issues with laser diode fall-times and can be fixed by improving laser driver circuit, adjusting exposure times and read-out gap and by choosing the right polarity on the trigger flank. For now, this was corrected according to Eq.2 to Eq.4 and the specified  $\varphi_{driver}$ . Since the exposures and carrier wave are more squared than sinusoidal the range dependent time-of-flight loss can be expressed as a triangle wave:

$$G_{ToF(r,f_s)} = 1 - \frac{4f_s r n_{air}}{c}, \quad 2f_s r n_{air} < c \quad (Eq.5)$$

Our experiment employ a horizontal beam, and between occasional plumes from agricultural burnings, the signal is smooth in time and space, and the atmosphere can be assumed homogeneous. When this is the case, the expected lidar backscatter should attain the form:

$$G_{air(r,t)} = \mu_{s(t)} e^{-2\mu_{s(t)} r} \quad (Eq.6)$$

Since the 808 nm lidar band does not coincide with any absorption bands in the atmosphere, the attenuation coefficient entirely derives from scattering. Note that the scatter coefficient,  $\mu_s$ , varies with temperature and humidity, and thus commonly changes during the evenings, see Fig.1. At 808 nm, the minimal  $\mu_s$  value is  $0.0025 \text{ Km}^{-1}$  (molecular Rayleigh scattering), but typically the value varies between  $0.1 \text{ Km}^{-1}$  clear conditions to  $10 \text{ Km}^{-1}$  dense fog. The homogeneous air lidar signal can be found statistically by the time median<sup>37</sup> during clear conditions. When this is the case, it can be described accurately by the combined instrument function:

$$I_{air(r,t)} = S E_0 G_{air(r,t)} G_{ToF(r,f_s)} G_{overlap(r)} \quad (Eq.7)$$

Here,  $E_0$  is the laser energy during the exposure and  $S$  is the lidar sensitivity. This analytic function yielded an explanation grade of 99.98 % adjusted  $R^2$  when fitted to the median homogeneous air signal, see example in Fig.2. We encountered  $\approx 5.2 \text{ kBits Km mJ}^{-1}$ . With our pulse energies,  $E_0$ , of  $2.8 \text{ mJ}$  @  $300 \text{ Hz}$  and  $0.3 \text{ mJ}$  @  $3000 \text{ Hz}$  and  $\mu_s \approx 0.1 \text{ Km}^{-1}$ , we acquired respectively  $I_{sig} \approx 1.1 \text{ kBit}$  and  $I_{sig} \approx 0.1 \text{ kBit}$ , at complete overlap,

for comparison the single shot noise level (IQR) is around  $I_{noise}=0.1$  kBit, see Fig. 1c. The modelled signal,  $I_{sig}$ , is compared to data in Fig. 2.

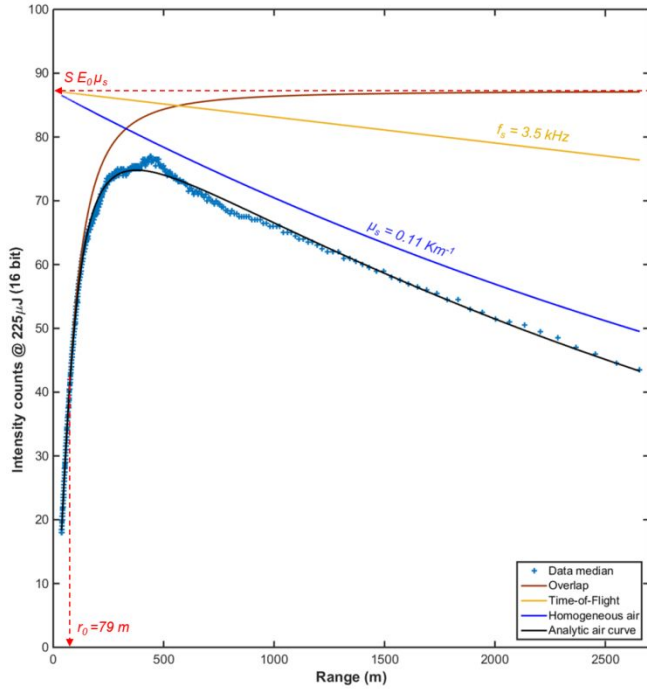


Fig.2 When the atmosphere is homogenous the retrieved air signal can be accurately ( $R^2$ : 99.98) described by an overlap function, the time-of-flight desynchronization and the atmospheric scatter coefficient. This reduced lidar sensitivity to a single value,  $S$ , in units of Bits Km  $J^{-1}$  to be compared to noise bits or across systems.

#### D. Calibration of Insect Cross Sections and Sizes

Inspired from Radar Cross Sections<sup>48</sup> (RCS), an optical cross section,  $\sigma$ , was introduced<sup>49</sup>. The backscattered cross section quantity is the product of the geometrical cross section from the projected aspect and the diffuse reflectance of a hard target,  $\sigma_{back\ scat.}=AR$ . Correspondingly the extinction cross section would be the product of area and opacity,  $\sigma_{ext.}=A(I-T) \approx A$  (ballistic light is either scattered or absorbed when transilluminating insects). In our setup  $\sigma_{ext.}$  can be seen for vertebrate (Fig. 1a) but is generally below noise threshold for insects. The cross sections are wavelength dependent, in the near infrared in this study (700-1000 nm) mainly influenced by melanin absorption. In the short wave infrared (1000-1700 nm) it is primary affected by liquid water absorption. When resolved at kHz sampling, the cross sections depend on the phase in the wing beat cycle and can be decomposed into a body envelope and oscillatory part. When wing surface normal coincide with the beam, the spectral cross section can be explained by thin film interference across the spectrum<sup>32,50</sup>. For more details on lidar light interaction with insects see<sup>51</sup>.

While insect cross sections can be characterized fairly accurately in laboratory<sup>25,52,53</sup> they are challenging to estimate accurately remotely beyond the first digit. Such estimate relies on the assumption that a) the organism is much smaller than the beam, b) that it does not transit peripherally and c) that the beam

is top hat rather than Gaussian, see discussion<sup>54</sup>. In practice assumption are partially valid.

At 808 nm the reflectance of most aerofauna is approximately 20% due to melanin<sup>55</sup>. On the other hand, specular conditions can yield scattering hundreds times relative to a Lambertian white target<sup>32</sup>.

Although optical cross section suffers from these deficiencies, it remains as a fairly intuitive measure and one of the few entities to compare between studies, species and instruments. In laboratory, cross sections can be calibrated by white Lambertian Teflon balls<sup>25,54</sup>. In lidar studies like this, the beam is inaccessible and we calibrate the value against a flat board at a known distance, coated black diffuse neoprene foam with a reflectance,  $R_{term.}$ , of 1.8% @ 808 nm.

$$\sigma_{term} = R_{term}A_{probe}(r_{term}) \quad (\text{Eq.8})$$

Here,  $A_{probe}$ , is the spatial overlapping area of the beam and field of view. We then use the analytical air signal in Eq.7 to extrapolate the lidar sensitivity to other ranges accordingly:

$$\sigma_{insect}(r,t) = \frac{\sigma_{term}I_{air}(r_{term})r_{insect}^2(I(r_{insect,t}) - I_{air}(r_{insect}))}{I_{air}(r_{insect})r_{term}^2(I_{term} - I_{air}(r_{term}))} \quad (\text{Eq.9})$$

The equation can be verified by replacing the sub index term “insect” with term “term.”. The  $I_{air}$  term denotes the instrument range response and  $\sigma$  a known fix point. The  $r^2$  terms represent the assumption of diffuse Lambertian and omnidirectional scattering form insect and calibration target. We will later return to this discussion.

Apart from cross sections deduced from light intensities, we also successfully applied an additional size measure; apparent size,  $\delta_{insect}$ . The entity is deduced from opening angle in the beam and the pixel spread of the echoes according to;

$$p_{cent} = \frac{\sum_{mask} I_{insect(p,t)} p}{\sum_{mask} I_{insect(p,t)}} \quad (\text{Eq.10})$$

$$\delta_{insect(t)} = \frac{r \cos \theta_{sens} \ell_{pix}}{F_{rec}} \sqrt{\frac{\sum_{mask} I_{insect(p,t)} (p - p_{cent})^2}{\sum_{mask} I_{insect(p,t)}}$$

Since insect envelopes varies from Gaussian- to top hat shapes and can include specular flashes, we choose to robustly reduce the time dependent size measures  $\sigma_{insect(t)}$  and  $\delta_{insect(t)}$ , by taking the temporal median for their duration of the observation. In addition, note that wingbeat are not resolved in the 300 Hz mode. Hereafter, each observation is represented by a single pair of size measures.

Note that apparent size is unaffected by melanin and specular flashes. From their units (see Table.1) we understand that  $\sigma \propto \delta^2$ . A crude of estimate of diffuse reflectance of the insects is therefore  $R_{insect} \approx \sigma \delta^{-2}$ . Although  $\sigma$  is a measure of area, we know that light interacts ballistically with the tissue in the abdomen of small insects such as mosquitoes<sup>53</sup>. This happens when the organism size is small in relation to the mean free path in the tissue<sup>l</sup>. This implies that the interaction path length of the

backscattered light is longer and thus more depolarized than for the forward scattered light<sup>53</sup>. In this regime, light scatters from the tissue and eggs inside the insects and scattering scales with depth. In other words; for small insects, then the retrieved light,  $I_{insect}$ , originates from the volume and not the area, this would imply a  $\sigma \propto \delta^3$  relation.

known to create humid micro climate, shelter and food for both insects and bats<sup>56</sup>. When sun sets, some insects are known to gather over elevated land features by a so called hill-top effect. For bats such trees also provide protection from predators and constitute a landmark and social meeting point in the landscape. We tested observations for detector saturation, and encountered 142 and 21 saturated observations in 300 Hz and 3000 Hz mode

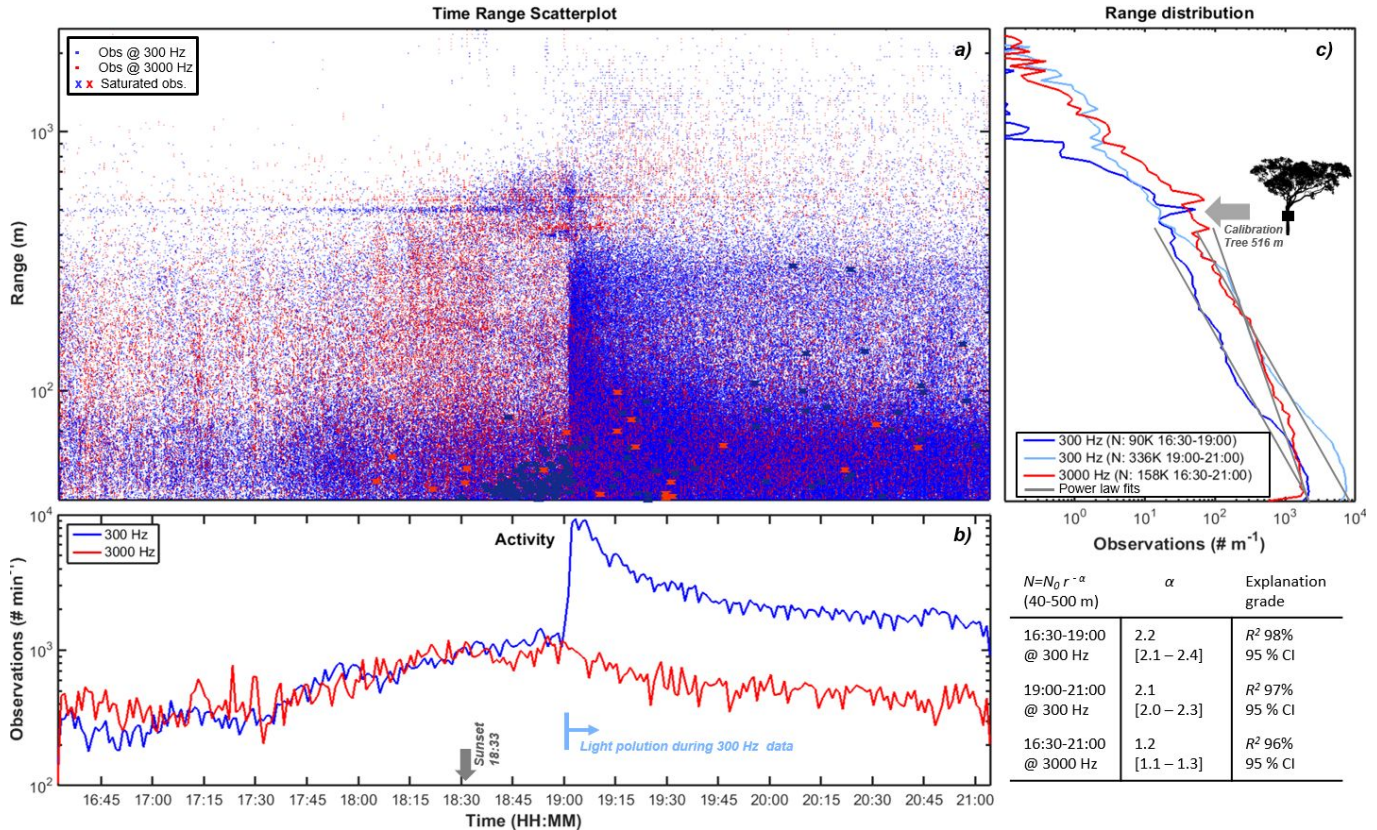


Fig.3 During 4½ hours, 158244 insects were detected at 3000 Hz rate and 426327 insects were detected at 300 Hz rate. 3a: Display all observations in time and space. Generally, more insects are detected at close ranges, however, during daytime the shade of the large Ceiba tree canopy at 516 m induce increased activity, this is predominantly seen in the long exposure more at 300 Hz. After sunset this aggregate broadens in the landscape. 3b: Surprisingly, the counting rate is equivalent for 300 Hz and 3000 Hz during the afternoon and after sunset. At 19:00 on the day of the 300 Hz measurements the test range was subject to light pollution. This was not the case for the 3000 Hz measurements. 3c: show the range distributions of detected insects. Because of the light pollution during the 300 Hz measurements, the data is split in two parts before- and after 19:00.

#### IV.RESULTS

We mask by a threshold on the instantaneous lidar signal,  $I_{sig}$ , when this exceed the static signal plus three times the noise amplitude ( $>SNR=3$ );  $I_{sig(r,t)} > I_{median(r)} + 5 I_{IQR(r)}$ . An insect observation is hereafter defined as a connected island in this range-time mask. The procedure is identical to previous work<sup>39,40</sup>. The range, cross section and apparent size is calibrated as in previous section.

##### A. Aerofauna detection in time and space

All detected insects are presented in time and space in Fig.3. As expected, more insects are detected closer to the lidar. However, a pronounced spatial feature, with increased activity, is where the beam passes under the shade of the canopy of the mighty Ceiba tree at 516 m distance. This is in particular visible for the 300 Hz measurements. Such monumental trees are

respectively. These were predominantly at close range during the rush hour right after sunset but also at longer ranges later in the evening. This period is popular feeding time for insectivores<sup>28,29,56</sup>. In Fig.3b the counting rates for 300 Hz and 3000 Hz mode is displayed. In the afternoon the curves look surprisingly similar with some 500 observations per minute. The range distribution is however fairly distinct; the 3000 Hz mode generally detects insects at further distances but fails to detect insects in the canopy shade at 516 m. At 19:00 the day of the 300 Hz measurement the guard at the institute campus switched on the lights at the parking lot (35-90m range). This is a significant light pollution source in the otherwise dark and sparsely populated outskirts of Yamoussoukro. Within minutes this drains the remnants of the population under the tree and induce a tenfold increase in activity in the 35-300 m range. Because of this disturbance we divided the 300 Hz data in two parts before and after light pollution.

The range distributions are displayed in Fig.3c. The light pollution during the 300 Hz measurements increase the activity in the vicinity (35-300 m), but the range distribution is roughly

the same. The activity associated with the tree disappear because of the light pollution, this is not the case for during the day of the 3000 Hz data with no light pollution. At night time aerofauna is detected at longer distances, this is the case for both 300 Hz and 3000 Hz measurements and could be due to increased activity of night active bats and moth high over ground (the beam height over ground increases after the tree at 516 m). As in previous studies<sup>35,37</sup>, the range distribution can be roughly explained by a power law;  $N=N_0 r^{-\alpha}$ . We applied this fit for the range between the lidar and the tree with explanations grades ( $R^2$ ) larger than 96%, see lower right insert in Fig.3. The aim of this study was to investigate if high pulse energies during long exposures with slow sample rate could be used to detect smaller insects at further distance at expense of wingbeat information. In contrary we now find with significance by 95% confidence intervals in Fig.3 that 3000 Hz acquisition gives a

### B. Range Dependence of the Observable Span in the Biomass Spectrum

Are the insects seen in the 300 Hz and 3000 Hz data the same? Since wingbeat modulation is not resolved in the 300 Hz data our means of classification are limited to the range and sizing features discussed in Section III.D. In Fig.4 we plot detection range,  $r$ , against the size features  $\sigma$  and  $\delta$ . Again, we split the 300 Hz data into before and after light pollution at 19:00. In order to get a sense of the density of the 584571 observations during the 9 hours we diluted the scatter plot and only plots every 10<sup>th</sup> observation in Fig.4ac. The complete statistics is shown in Fig.4bd. The cross section,  $\sigma$ , measures in Fig.4ab spans three orders of magnitude in each of the modes, limited on the smaller side by detector read out noise and on the larger side by detector saturation which fairly unlikely (1:1000). This range essentially cover aerofauna from midges, fruit flies,

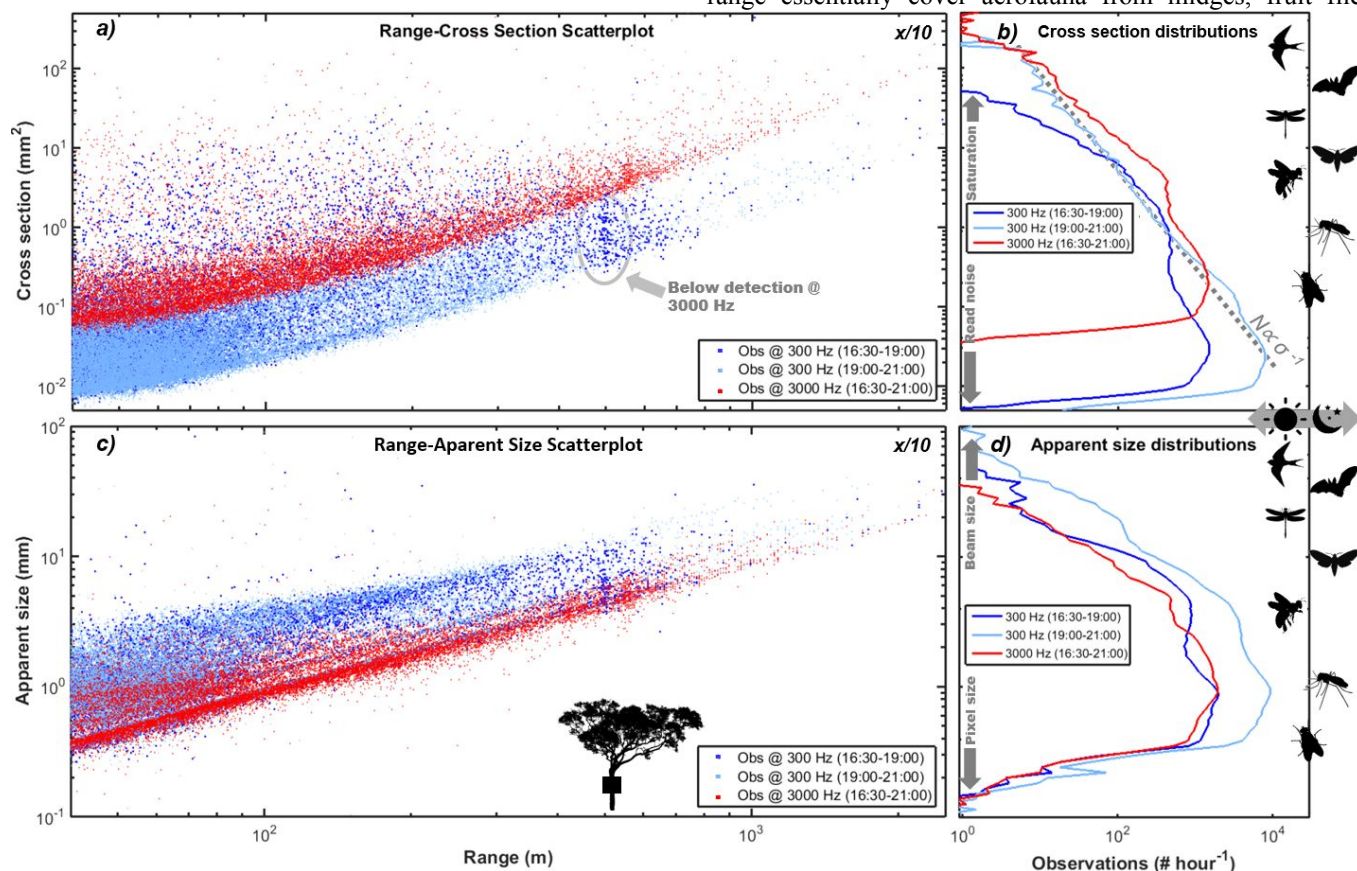


Fig.4 Range dependence of detected aero fauna sizes. 4a: Whereas large organisms can be detected in both modes and seldom saturate, smaller insects with smaller cross sections can be seen further away with long exposures at 300 Hz (note the activity under the tree which is not detected in 3000 Hz mode). 4b: The detected biomass is fairly consistent between the overlap in the two modes. In the evening larger organisms are seen at far distance, the distributed is roughly  $N \propto \sigma^{-1}$ . 4c: The apparent size share the same minimum in the two modes, but could be subject to motion blur smearing out features in the distribution in 4d.

lower  $\alpha$  value than 300 Hz. Thus 3000 Hz detected more insects at far distance and the absolute number is identical between the slow and fast rate mode (not considering the light pollution one of the days).

mosquitoes, through bees, moth and dragonflies to bats and swallows (see rough indication in Fig.4. right pane). The scatterplots in Fig.4a display a clear range dependent threshold. Beyond the range of complete overlap,  $r > 2r_0$ . This limit increase by the squared range,  $\sigma_{thrs} \propto r^2$ . This is essentially a consequence of the diffuse assumption in Eq.9. At a couple of Km detection limit reach the larger end of the biomass spectrum.

When lowering the sample rate tenfold, we do indeed see ten times smaller members of the aerofauna. The fact that the remaining and overlapping part of the biomass spectrum is

> REPLACE THIS LINE WITH YOUR PAPER IDENTIFICATION NUMBER (DOUBLE-CLICK HERE TO EDIT) <

7

consistent with the fast measurements displaying a typical  $N \propto \sigma^{-1}$  behavior gives us confidence in the calibration routines. In particular we see that much of the activity in the Ceiba tree shade are small insects falling below detection limit at 3000 Hz. This explain the missing feature in Fig.3a. Admittedly  $10^{-2} \text{ mm}^2$  seems small, low values could arise when exposure times,  $\tau$ , excess transit times,  $\Delta t$ . It could also be dust or pollen since we could not check for wing beats at 300 Hz.

The range of apparent sizes,  $\delta$ , is a smaller and limited on the small side by the size of the pixel footprints in the atmosphere and by the beam width on the larger side, see Fig.4c. The 300 Hz measurements could be subject to motion blur of wingbeats (The stripes arise from a pixel rounding operation).

see Fig.5ab. Because of the driver leakage between odd and even exposed in combination with the strong signal, it causes substantial signal in the  $I_{\text{even}}$ , consequently the lock-in subtraction produces a hole in the middle of the echo. Not only do strong signals saturate they also become weaker due to this (this hardware issue can be fixed).

Although vertebrates account for many of the saturated signals, specular flashes from insect wings also saturated the detector in several cases at 3000 Hz, see Fig.5be. These are peculiar cases, where specular flashes occur in a single 3000 Hz exposure of  $310 \mu\text{s}$ . This occur when wing surface normal coincide with the beam and when the membrane thickness resonate with the laser in backscattering (this happen when wing thickness is close to either 531, 797, 1063, 1329, 1595 or

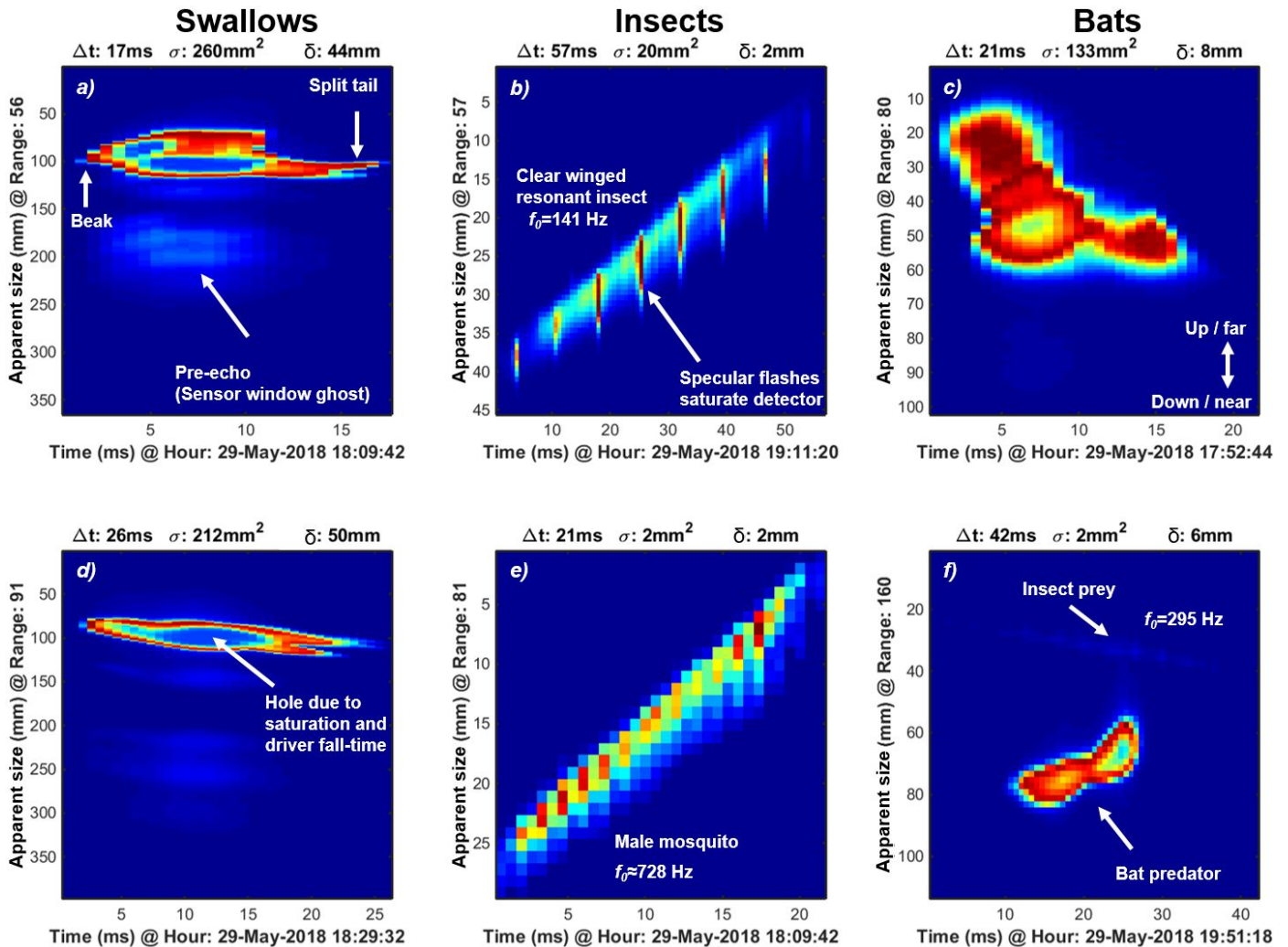


Fig.5 The signals of saturated events in the 3000 Hz were inspected individually. Some signals could be associated with swallows, insects and later bats. Not only vertebrates but also specular flashes from insects causes saturation. Note the associated parameters with each event around each subfigure. 5f display both a bat and an insect at 160 m distance.

### C. Inspection on saturated observations.

What caused saturation in entomological lidar? We used the 3000 Hz data and inspected the 21 saturated observations, see selected examples in Fig.5. In many cases nothing enlightening could be deduced from the signals, but some part of the observation could be attributed swallows, see Fig.5ad. When they intercept the beam they are scanned by the lidar line arrays, the observation start with the beak and ends with the split tail,

1860 nm with a 808 nm lidar). Such flashes would be smeared out in time with the long exposures at 300 Hz rate. The crude reflectance,  $R_{\text{insect}}$ , of the case in Fig.5b is 500% compared to Lambertian white. However the size measures,  $\sigma$  and  $\delta$ , are temporal median of the observation omitting specular flashes. The instantaneous reflectance during the flash (which is hardly resolved in time), saturated at 1155%. Specular reflectance relate to diffuse reflectance accordingly;

$$R_{Spec.} = \frac{R_{Lamb.}}{\sin\left(\frac{\theta_{rec}}{2r}\right)^2} \approx \frac{R_{Lamb.}4r^2}{\phi_{rec}^2} \quad (\text{Eq.11})$$

At 57 m range a perfect mirror would imply 32 10<sup>6</sup> % compared to a diffuse white target. From this we understand that the  $r^2$  attenuation for omnidirectional scattering does not apply to specular flashes from wings which can propagate in a collimated manner. The  $r^2$  attenuation is generally accepted in the lidar community and also appear in Eq.9. But this explains why we see insects further away and a lower  $\alpha$  coefficient for faster rate in Fig.3. It also lead to a number of issues; can diffuse cross sections be used? Are oscillatory waveform in entomological lidar range dependent?

#### D. Apparent sizing and cross section

As a final aspect we looked into the covariance of the two size measures;  $\sigma$  and  $\delta$ , and we compared the quantities in the slow and fast acquisition mode, see Fig.6. When considering and comparing the two size measures it is important to think of how they are measured;  $\sigma$  from intensity and  $\delta$  from pixel spread. Thus a large  $\sigma$  could imply either a large organism or a shiny organism, whereas large  $\delta$  could imply a large or a motion blurred observation. The crude median NIR reflectance,  $\sigma\delta^{-2}$ , for 3000Hz is 24%. This is in accordance with our previous work<sup>25,55</sup> and can be attributed melanization. At 300 Hz, median reflectance drops to just 3% only corresponding to the refractive index difference. Melanin could not absorb 97% at 808 nm, so the losses would need to be explained by transmittance losses in the smaller organisms detected, also the minimum  $\delta$  is limited by the point spread function of a single pixel, so the actual size could be smaller than observed  $\delta$ . We find a main axis of  $\sigma\alpha\delta^2$  relation which to some extent validate the concept of cross section. We found a few but large observations to pertain to a  $\sigma\alpha\delta$  axis, we attribute this both saturation and situation where the organism size exceed the width of the pixel footprint and thus intensity scales linearly with the pixel spread.

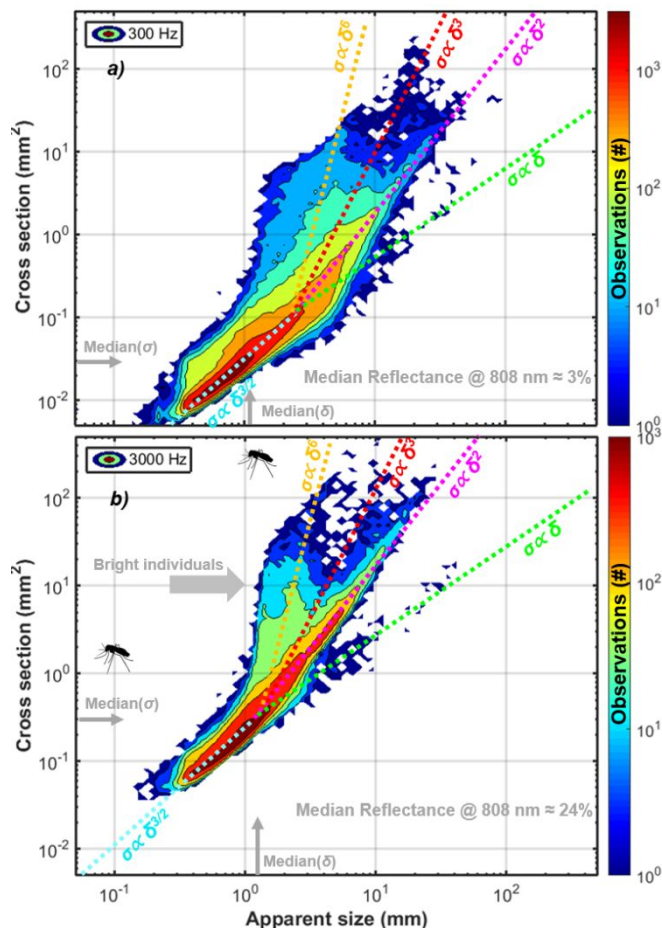


Fig.6 Covariation of backscatter cross section and apparent size for both 300 Hz and 3000 Hz. Various power relations are displayed ranging from linear relation of saturated observations to quadratic relation from diffuse target to a steep cluster exceeding 100% diffuse reflectance.

We only found limited support for the volumetric scattering  $\sigma\alpha\delta^3$  from the idea of ballistic interaction, also this axis is primarily seen for larger organisms in the 300 Hz mode. It should be considered that, e.g., mosquitoes could appear larger in the 300 Hz mode since the fast wingbeat could increase both  $\sigma$  and  $\delta$ . In particular in the 3000 Hz mode we observe a very steep relation of  $\sigma\alpha\delta^6$ . Distinct melanization and observation aspect can change  $\sigma$  a factor three whereas  $\delta$  would be unaffected. However, it can be seen from Fig.6 that observations on the  $\sigma\alpha\delta^6$  ridge exceed 100% diffuse reflectance, thus they must be attributed specular scattering despite that  $\sigma$  is the temporal median thought to be insensitive to flashes. Finally, we found a  $\sigma\alpha\delta^{2/3}$  for the tiniest and most numerous observations. We restrain from over interpreting this, since these could be affected by minimum limits and we do not have experience in these scales.

#### V. CONCLUSIONS AND OUTLOOK

We evaluated entomological lidar recordings with slow and fast sample rates to investigate the dynamic and ranging properties. We could compare the performance although one of the measurement sessions included a light pollution event. We reported more than half million observations during nine hours at ranges up to couple of kilometers over the Ivorian bush. We provided an accurate analytical explanation for the retrieved air signal during homogeneous conditions. From this, we could reduce the lidar sensitivity to a single value which can be rescaled for laser power and atmospheric conditions and related to noise levels. We have discussed effects and provided corrections of the time-of-flight roundtrip delay and driver rise time for lock-in detection in Scheimpflug lidar. We revised cross section calibration for diffuse targets.

We could indeed verify that slow rates, with long exposures, high laser energies and a just single read-out noise, could section smaller organisms in the biomass spectrum and that the overlapping section is in agreement between the two rates. We also demonstrated a case where distant small insects in the tree shade fell under the detection limit of the fast acquisition, but could be detected by the slow sample rate. However, the total number of observations with slow and fast rate was similar, since fast acquisition observed insects significantly further away, we speculate that this is related to rapid flashes of specular scattering dominating over distances. The overlapping region of the biomass spectrum was fairly consistent between slow and fast mode and displayed a plain reciprocal relation  $N\alpha\sigma^{-1}$  (note that this is not compensated for probe volumes of detectable intervals at different ranges).

Through closer inspection of saturated events at 3000 Hz we could identify large vertebrate insectivores such as swallows and bats. We could also identify insects by wingbeat and demonstrate intensive flashes and realistic size measures for mosquitoes comparing to previous literature<sup>25,53</sup>.

We investigated the covariance of cross section and apparent size, while much of the data supported the idea of a diffuse cross section with a  $\sigma\alpha\delta^2$  relation some events did not follow the assumption of smaller organism size than probe volume ( $\sigma\alpha\delta^2$ ).



Another group displayed diffuse reflectance exceeding 100%, and were interpreted as glossy. This analysis would much benefit from a more refined study at fast rate separating and resolving size contributions from bodies and wings.

From an ecological perspective we observed the effect of shade of large trees, which is well-known<sup>56</sup>. After sunset we could observe how this range feature disperses, and also how a light pollution event drastically changed the insect activity within minutes within ca. 300 m vicinity of the light. In the relatively dark area surrounding the campus, such light pollution would have an impact on the biodiversity<sup>57</sup> and disturb local bat and insect populations<sup>58,59</sup>. We could identify a predating bat during the dark evening, with a prey with slightly lower wing beat frequencies than mosquitoes. But bats are able to consume around two thousand mosquitoes per night per bat<sup>60</sup>. Indeed, it seems possible that bats may reduce mosquito populations at least locally, and hence reduce malaria transmission, but hard data showing this remains to be seen.

#### DATA AVAILABILITY

The data presented here may be obtained by contacting the authors. The raw data is approximately 500 Gb.

#### ACKNOWLEDGMENT

We appreciate the assistance and good company during the campaign in Ivory Coast, in particular thanks to: Konin Edoukoua, Yebouet Akissi Marie Florence, Kossonou Alvarez Taky Yao, Francois PiuZZi and Bagui Kossan Olivier.

#### REFERENCES

- [1] S. Seibold, M. M. Gossner, N. K. Simons, *et al.*, "Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers," *Nature*, vol. 574, pp. 671-674, 2019.
- [2] C. Rich and T. Longcore, *Ecological consequences of artificial night lighting*: Island Press, 2013.
- [3] X. Giam, "Global biodiversity loss from tropical deforestation," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, pp. 5775-5777, 2017.
- [4] V. A. Drake and D. R. Reynolds, *Radar entomology : observing insect flight and migration* Wallingford, Oxfordshire ; Boston, MA: CABI, 2012.
- [5] W. Daniel Kissling, D. E. Pattemore, and M. Hagen, "Challenges and prospects in the telemetry of insects," *Biological Reviews*, vol. 89, pp. 511-530, 2014.
- [6] G. Hu, K. S. Lim, N. Horvitz, *et al.*, "Mass seasonal bioflows of high-flying insect migrants," *Science*, vol. 354, pp. 1584-1587, 2016.
- [7] V. A. Drake, J. W. Chapman, K. S. Lim, *et al.*, "Ventral-aspect radar cross sections and polarization patterns of insects at X band and their relation to size and form," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, pp. 5022-5044, 2017/09/17 2017.
- [8] I. Potamitis, I. Rigakis, and N.-A. Tatlas, "Automated Surveillance of Fruit Flies," *Sensors*, vol. 17, p. 110, 2017.
- [9] J. Wang, S. Zhu, Y. Lin, *et al.*, "Mosquito counting system based on optical sensing," *Applied Physics B*, vol. 126, p. 28, 2020.
- [10] K. Bjerger, M. V. Sepstrup, J. B. Nielsen, *et al.*, "A light trap and computer vision system to detect and classify live moths (Lepidoptera) using tracking and deep learning," *bioRxiv*, 2020.
- [11] Y. Zhong, J. Gao, Q. Lei, *et al.*, "A vision-based counting and recognition system for flying insects in intelligent agriculture," *Sensors*, vol. 18, p. 1489, 2018.
- [12] I. Rigakis. (2020). *Insectronics*. Available: <https://www.insectronics.net/>

TABLE I  
VARIABLES, VALUES AND UNITS

Symbol	Quantity	Value	Unit
<i>EXPERIMENTAL CONDITIONS:</i>			
$r$	Range from lidar	35..2000	m
$r_{term}$	Range to calibration target	516	m
$R_{term}$	Reflectance of calib. target	1.8	%
$f_s$	Line rate	3000 & 300	Hz
$\tau$	Exposure time	310 & 3313	$\mu$ s
$E_0$	Laser energy/exposure	0.3 & 2.8	mJ
$c$	Speed of light	299792	Kms <sup>-1</sup>
$n_{air}$	Refractive index of air	1.003	-
$\mu_s$	Atmospheric scatter	0.11	Km <sup>-1</sup>
<i>SCHEIMPFLUG LIDAR SPECIFICATIONS:</i>			
-	Baseline separation	814	mm
$\lambda$	Wavelength of the lidar	808 $\pm$ 2	nm
$P$	Laser diode peak power	3 @ 3A	W
-	Laser emission chip size	9"x200	$\mu$ m
$\theta_{exp}$	Expander aperture	102	mm
$F_{exp}$	Expander focal length	500	mm
$\eta$	Expander output coupling	28	%
$\theta_{rec}$	Receiver aperture	204	mm
$F_{rec}$	Receiver focal length	800	mm
-	Detection filter	808 $\pm$ 3	nm
$\theta_{sens}$	Sensor tilt	45	$^\circ$
$\ell_{pix}$	Pixel size	14x200	$\mu$ m
$p$	Pixels	1..2048	#
<i>CALIBRATION AND ANALYSIS VARIABLES:</i>			
$r_0$	Range of half overlap	79.4	m
$S$	Lidar sensitivity	5200	Bits Km mJ <sup>-1</sup>
$G$	Instrument gain factors	0.1	-
$I$	Lidar intensity counts	0..2 <sup>16</sup> -1	16 bit
$\gamma$	Shape parameter form factor	1.8	-
$\sigma$	Backscatter cross section	10 <sup>-2</sup> ..10 <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>
$\delta$	Apparent size	0.5..100	mm
$\Delta t$	Transit time		ms
$\alpha$	Observed range dependence	1.2..2.2	-
$R$	Diffuse reflectance		
$N$	Number of insects	10 <sup>0</sup> ..10 <sup>5</sup>	#
$R^2$	Adjusted goodness of fit	0-100	%

\* diffraction limited size

- [13] F. Tårnhøj. (2015). *FaunaPhotonics*. Available: [www.faanaphotonics.com](http://www.faanaphotonics.com)
- [14] M. Brydegaard and S. Svanberg, "Photonic monitoring of atmospheric and aquatic fauna," *Laser & Photonics Reviews*, 2018.
- [15] K. S. Repasky, J. A. Shaw, R. Scheppele, *et al.*, "Optical detection of honeybees by use of wing-beat modulation of scattered laser light for locating explosives and land mines," *Appl. Opt.*, vol. 45, pp. 1839-1843, 2006.
- [16] Z. Guan, M. Brydegaard, P. Lundin, *et al.*, "Insect monitoring with fluorescence lidar techniques: Field experiments," *Appl. Opt.*, vol. 49, pp. 1-11, 2010.
- [17] M. Brydegaard, A. Gebru, and S. Svanberg, "Super resolution laser radar with blinking atmospheric particles – application to interacting flying insects," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 147, pp. 141-151, 2014.
- [18] L. Mei and P. Guan, "Development of an atmospheric polarization Scheimpflug lidar system based on a time-division multiplexing scheme," *Optics Letters*, vol. 42, pp. 3562-3565, 2017/09/15 2017.
- [19] M. Brydegaard, E. Malmqvist, S. Jansson, *et al.*, "The Scheimpflug Lidar Method," *SPIE Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring*, vol. 10406, 2017.
- [20] M. Brydegaard, A. Gebru, C. Kirkeby, *et al.*, "Daily evolution of the insect biomass spectrum in an agricultural landscape accessed with lidar," in *EPJ Web of Conferences*, 2016, p. 22004.
- [21] C. Kirkeby, M. Wellenreuther, and M. Brydegaard, "Observations of movement dynamics of flying insects using high resolution lidar," *Scientific Reports*, vol. 6, p. 29083, 07/04/online 2016.

- [22] M. Brydegaard, S. Jansson, E. Malmqvist, *et al.*, "Lidar reveals Activity Anomaly of Malaria Vectors during Pan-African Eclipse," *Science Advances*, 2020.
- [23] M. Brydegaard and S. Jansson, "Advances in Entomological Laser Radar," presented at the IET Intentional Radar Conference, Nanjing, China, 2018.
- [24] S. Zhu, E. Malmqvist, Y. Li, *et al.*, "Insect abundance over Chinese rice fields in relation to environmental parameters, studied with a polarization-sensitive CW near-IR lidar system," *ILRC28*, 2017.
- [25] A. Gebru, S. Jansson, R. Ignell, *et al.*, "Multiband modulation spectroscopy for determination of sex and species of mosquitoes in flight," *J. Biophotonics*, vol. 11, 2018.
- [26] A. P. Genoud, R. Basistyy, G. M. Williams, *et al.*, "Analysis of predictor variables for mosquito species identification from dual-wavelength polarization-sensitive lidar measurements," in *SPIE Asia-Pacific Remote Sensing*, 2018, p. 13.
- [27] C. Kirkeby, K. Rydhmer, S. M. Cook, *et al.*, "Advances in automatic identification of flying insects using optical sensors and machine learning," *Scientific Reports*, 2020.
- [28] E. Malmqvist, S. Jansson, S. Zhu, *et al.*, "The bat-bird-bug battle: daily flight activity of insects and their predators over a rice field revealed by high resolution Scheimpflug Lidar" *Royal Society Open Science*, vol. 5, 2018.
- [29] S. Jansson, E. Malmqvist, M. Brydegaard, *et al.*, "A Scheimpflug lidar used to observe insect swarming at a wind turbine," *Ecological Indicators*, vol. 117, p. 106578, 2020.
- [30] M. Goerke, Z. Ulanowski, G. Ritter, *et al.*, "Characterizing ice particles using two-dimensional reflections of a lidar beam," *Applied optics*, vol. 56, pp. G188-G196, 2017.
- [31] M. Vollmer and J. A. Shaw, "Brilliant colours from a white snow cover," *Physics Education*, vol. 48, p. 322, 2013.
- [32] M. Brydegaard, S. Jansson, M. Schulz, *et al.*, "Can the narrow red bands of dragonflies be used to perceive wing interference patterns?," *Ecology and evolution*, vol. 8, pp. 5369-5384, 2018.
- [33] J. A. Shaw, N. L. Seldomridge, D. L. Dunkle, *et al.*, "Polarization lidar measurements of honey bees in flight for locating land mines," *Opt. Expr.*, vol. 13, pp. 5853-5863, 2005.
- [34] Z. Liu, L. Li, H. Li, *et al.*, "Preliminary studies on atmospheric monitoring by employing a portable unmanned Mie-scattering Scheimpflug lidar system," *Remote Sensing*, vol. 11, p. 837, 2019.
- [35] K. Rydhmer, J. Prangmsma, M. Brydegaard, *et al.*, "Lidar profiling of bee activity patterns and foraging distributions," *Animal Telemetry*, Submitted 2020.
- [36] M. J. Tauc, K. M. Frstrup, K. S. Repasky, *et al.*, "Field demonstration of a wing-beat modulation lidar for the 3D mapping of flying insects," *OSA Continuum*, vol. 2, pp. 332-348, 2019/02/15 2019.
- [37] S. Jansson, E. Malmqvist, Y. Mlacha, *et al.*, "Real-time dispersal of malaria vectors in rural Africa monitored with lidar," *Submitted*, 2020.
- [38] B. K. Kouakou, S. Jansson, M. Brydegaard, *et al.*, "Entomological Scheimpflug lidar for estimating unique insect classes in-situ field test from Ivory Coast," *OSA Continuum*, vol. 3, pp. 2362-2371, 2020/09/15 2020.
- [39] E. Malmqvist, "From Fauna to Flames: Remote Sensing with Scheimpflug Lidar," Lund University, 2019.
- [40] S. Jansson, "Entomological Lidar: Target Characterization and Field Applications," Lund University, 2020.
- [41] Y. Li, K. Wang, R. Quintero-Torres, *et al.*, "Insect flight velocity measurement with a CW near-IR Scheimpflug lidar system," *Optics Express*, vol. 28, pp. 21891-21902, 2020/07/20 2020.
- [42] G. Zhao, E. Malmqvist, S. Török, *et al.*, "Dual-band continuous-wave lidar system employed for particle classification," *Appl. Opt.*, vol. To appear, 2018.
- [43] L. Mei and M. Brydegaard, "Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system," *Optics Express*, vol. 23, pp. A1613-A1628, 2015.
- [44] E. Malmqvist, M. Brydegaard, M. Aaldén, *et al.*, "Scheimpflug Lidar for combustion diagnostics," *Optics Express*, 2018.
- [45] J. Larsson, J. Bood, C. T. Xu, *et al.*, "Atmospheric CO2 sensing using Scheimpflug-lidar based on a 1.57 $\mu$ m fiber source," *Optics Express*, vol. 27, pp. 17348-17358, 2019/06/10 2019.
- [46] K. Stelmaszczyk, M. Dell'Aglia, S. Chudzynski, *et al.*, "Analytical function for lidar geometrical compression form-factor calculations," *Appl. Opt.*, vol. 44, pp. 1323-1331, 2005.
- [47] S. Zhu, E. Malmqvist, W. Li, *et al.*, "Insect abundance over Chinese rice fields in relation to environmental parameters, studied with a polarization-sensitive CW near-IR lidar system," *Applied Physics B*, vol. 123, 2017.
- [48] J. Riley, "Angular and temporal variations in the radar cross-sections of insects," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1973, pp. 1229-1232.
- [49] M. Brydegaard, "Towards quantitative optical cross sections in entomological laser radar – Potential of temporal and spherical parameterizations for identifying atmospheric fauna," *PLoS One*, vol. 10, p. e0135231, 2015.
- [50] D. G. Stavenga, "Thin film and multilayer optics cause structural colors of many insects and birds," *Materials Today: Proceedings*, vol. 1, pp. 109-121, 2014/01/01 2014.
- [51] M. Brydegaard and S. Svanberg, "Photonic Monitoring of Atmospheric and Aquatic Fauna," *Laser & Photonics Reviews*, p. 1800135, 2018.
- [52] M. Li, S. Jansson, A. Runemark, *et al.*, "Bark beetles as lidar targets and prospects of photonic surveillance," *Journal of Biophotonics*, 2020 submitted.
- [53] S. Jansson, P. Atkinson, R. Ignell, *et al.*, "First Polarimetric Investigation of Malaria Mosquitos as Lidar Targets," *IEEE JSTQE Biophotonics*, vol. 25, pp. 1-8, 2018.
- [54] A. P. Genoud, Y. Gao, G. M. Williams, *et al.*, "Identification of gravid mosquitoes from changes in spectral and polarimetric backscatter cross-sections," *Journal of biophotonics*, p. e201900123, 2019.
- [55] M. Brydegaard, "Advantages of shortwave infrared LIDAR entomology," in *Imaging and Applied Optics 2014*, Seattle, Washington, 2014, p. LW2D.6.
- [56] J. Rydell, A. Entwistle, and P. A. Racey, "Timing of foraging flights of three species of bats in relation to insect activity and predation risk," *Oikos*, pp. 243-252, 1996.
- [57] F. Hölker, C. Wolter, E. K. Perkin, *et al.*, "Light pollution as a biodiversity threat," *Trends in ecology & evolution*, vol. 25, pp. 681-682, 2010.
- [58] J. Rydell, J. Eklöf, and S. Sánchez-Navarro, "Age of enlightenment: long-term effects of outdoor aesthetic lights on bats in churches," *Royal Society open science*, vol. 4, p. 161077, 2017.
- [59] J. Rydell, M. Gelang, S. Musila, *et al.*, "Bats roosting – Switch-off the lights, please!," *African Conservation Telegraph*, vol. 15, 2019.
- [60] J. Rydell, D. P. McNeill, and J. Eklöf, "Capture success of little brown bats (*Myotis lucifugus*) feeding on mosquitoes," *Journal of Zoology*, vol. 256, pp. 379-381, 2002.



**Mikkel Brydegaard** was born in Copenhagen 1980, received his Msc in Electrical Engineering 2007 and his Phd in Atomic Physics 2012, Docent 2015 all from Lund University. Experienced in instrumentation, optical spectroscopy, bio-photonics, remote sensing and applied mathematics. In post-graduate years Brydegaard pursued research in Stellenbosch and Oslo and his work focused on lidar monitoring of aero-fauna, in particular contributing with the Scheimpflug lidar method. He is currently principal investigator at Dept. Physics and Dept. Biology and senior researcher at Norsk Elektro Optikk.



**Benoît Kouakou** was born in Adjamé, Abidjan, Côte d'Ivoire in 1980. He received the Bachelor's degree in Applied and Fundamental Science in 2009 and Master's degree in Photonics in 2015 from the University of Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire. He is currently pursuing a doctoral degree in the field of entomological remote sensing and spectroscopy at National Polytechnic Institute in Yamoussoukro with scheduled defense later this year.



**Samuel Jansson** was born in Stockholm, Sweden, in 1988. He received the M.Sc. degree in engineering physics in 2015 and the Ph.D. degree in optical remote sensing of insects in 2020, both from the Dept. of Physics at Lund University, Lund, Sweden. He contributed to 22 papers, obtained 1 patent and co-supervised 4 student theses. He is currently working as a researcher at the Department of Biology at Lund University. His research interests include entomological lidar, radar, and machine learning techniques and how they can be applied to studying vector ecology, migration ecology and insect decline.



**Jens Rydell** was born in Sweden 1953, received PhD 1990 in Animal Ecology at Lund University. Ass. Professor in Zoology at Gothenburg University in 1998. Primary research on the biology of bats and insects with the focus on ultrasonic echolocation and communication, specifically bat-insect interactions, granted by the Swedish Research Council 1992-2005. Subsequently (2009-present), granted by the Swedish Energy Agency, researching the environmental consequences of wind farming, and designing mitigation measures to minimize the killing of

bats. Most recently engaged in researching the negative effect of light pollution on nocturnal animals, specifically bats. Author of ca 150 refereed research papers and several books and other articles. Received the Swedish Research Council Researcher Award in 2000, the Royal Swedish Academy of Science Conservation Award in 2017 and the Skåne Wind Farming Academy Prize in 2017.



**Jeremie Zoueu** is a professor of Photonics at the National Polytechnic Institute (INP-HB) in Yamoussoukro (Cote d'Ivoire). In 1992, he received a M.S. degree in the field of Laser Engineering at Galilee Institute in Paris (University of Paris XIII) and holds a Ph.D. in physics from Pierre & Marie Curie University in France in the field of lasers and photonic materials in 1996. He is currently the Director of the Interdisciplinary Research and Innovation Unit and the founder and head of the Instrumentation, Imaging and Spectroscopy Laboratory at INP-HB. On the international level, he is the coordinator of the

African Spectral Imaging Network (AFSIN) and also a VCU (Virginia Commonwealth University) Affiliate Faculty.