



HAL
open science

Systemes LIDAR pour la caracterisation à distance des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère

Nicolas Cezard

► **To cite this version:**

Nicolas Cezard. Systemes LIDAR pour la caracterisation à distance des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère. Ingénierie de l'environnement. Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées, 2021. tel-03323833

HAL Id: tel-03323833

<https://hal.science/tel-03323833v1>

Submitted on 23 Aug 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École Doctorale Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace

**HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES DE L'UNIVERSITÉ TOULOUSE III PAUL
SABATIER**

Présentée par

Nicolas CÉZARD

**Systèmes LIDAR pour la caractérisation à distance des propriétés
physico-chimiques de l'atmosphère**

Soutenue le 11 Mai 2021

Devant le jury composé de :

M. Frédéric Parol	Professeur des Universités	Rapporteur
M. Patrick Rairoux	Professeur des Universités	Rapporteur
M. Philippe Roy	Directeur de Recherche	Rapporteur
Mme Clémence Pierangelo	Ingénieure	Examinatrice
M. Vincent Noël	Chargé de Recherche	Examineur
M. Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry	Professeur des Universités	Président du jury
M. Philippe Keckhut	Physicien	Parrain HDR

A tous mes professeurs, maitres de stages, directeurs de thèse, encadrants, collègues, doctorants et stagiaires, qui m'ont guidé ou accompagné sur les sentiers ardu mais stimulants de la recherche,

A Stéphanie, pour son soutien et sa patience lors de la rédaction du manuscrit,

A Émile, pour avoir bien voulu naître après la soutenance !

1. Table des matières

Introduction	7
Chapitre 1 - Introduction aux systèmes Lidars.....	10
1. Quatre famille de systèmes lidars	10
2. Deux méthodes de détection	12
3. Bilan radiométrique d'un lidar impulsional.....	13
4. Lidars en diffusion et en absorption.....	14
Chapitre 2 – Parcours de recherche.....	17
1. Environnement de recherche.....	17
2. Lidars à diffusion Rayleigh-Mie	18
3. Lidars à absorption différentielle en bande large	20
4. Lidars à diffusion Raman pour la détection de gaz	23
5. Lidars fibrés bi-fonction DIAL/Doppler.....	25
6. Lidars pour la détection de gaz depuis l'espace.....	27
7. Et maintenant à Toulouse.....	30
Chapitre 3 – Outils et Méthodes.....	31
1. Outils de modélisation des propriétés de diffusion et absorption atmosphérique..	32
2. Outils technologiques : zoom sur les sources lasers infrarouges.....	49
3. Outils et méthodes de traitement de signal et de prévision de performance.....	61
Chapitre 4 – Résultats de recherches	70
1. Les lidars Rayleigh PADL et MMEDTAC	71
2. Le lidar Raman CALISTO.....	79
3. Les lidars IP-DIAL SHADOAS à source fibrée supercontinuum	87
4. Les lidars IP-DIAL SEPIA et MICLID à source accordable NeSCOPO.....	96
5. Le lidar DIAL-Doppler fibré VEGA	105
6. Etudes et développements pour la détection de gaz par lidar spatial.....	117
Chapitre 5 - Conclusions et Perspectives	130
1. Synthèse de mon parcours de recherche jusqu'en 2020	130
2. Impact des recherches menées.....	131
3. Perspectives : mes projets de recherches pour le futur.....	132
Annexe 1 – Production scientifique	140
1. Publications dans des revues à comité de lecture	140
2. Publications de proceedings de conférence.....	140
3. Communications en conférence sans publication des proceedings	143
4. Présentations orales en conférences et workshops.....	143
5. Thèse de 3eme cycle	144

6.	Brevets.....	144
7.	Enveloppes Soleau.....	144
Annexe 2 - Curriculum Vitae		145
1.	Titres universitaires	145
2.	Expériences professionnelles de recherche	145
3.	Enseignements et dissémination scientifique.....	146
4.	Activités liées à la recherche	146
5.	Encadrement	148

Introduction

L'atmosphère est un milieu dont les propriétés physiques et chimiques déterminent en grande partie les conditions de vie de l'Homme sur Terre. C'est aussi le milieu dans lequel évoluent tous les systèmes aéroportés, et la science du vol serait impossible sans la connaissance du milieu atmosphérique. L'étude des propriétés de l'atmosphère est donc une nécessité vitale pour l'Homme en général, mais aussi plus particulièrement pour les missions de recherches de l'ONERA dans les domaines de la Défense, de l'Aéronautique, et de l'Espace. Transparente à l'œil nu, insaisissable matériellement, et étendue dans les trois dimensions de l'espace, l'atmosphère n'est pas un milieu facile à étudier. Bien sûr, de très nombreux instruments sont capables de le caractériser *in situ*, mais de telles mesures sont par définition ponctuelles, très limitées dans l'espace. C'est pourquoi il est particulièrement intéressant de développer des outils permettant de caractériser le milieu atmosphérique *à distance*.

Pour cela, la technique LIDAR (*Light Detection and Ranging*) dispose d'un potentiel remarquable. Il s'agit d'une technique de télédétection analogue au Radar, mais pour laquelle l'émetteur, le plus souvent un laser, fonctionne dans le domaine des fréquences optiques. La longueur d'onde émise étant très petite ($<20 \mu\text{m}$), elle est capable d'interagir avec les molécules de gaz et les particules de poussière en suspension dans l'atmosphère (également nommées aérosols). En captant la très faible fraction de lumière rétrodiffusée par les molécules et aérosols atmosphériques, il est possible d'accéder, par divers procédés, à un grand nombre de propriétés atmosphériques, comme la vitesse du vent, la température de l'air, sa densité, ou encore la nature et la concentration des gaz et aérosols en présence. De plus, l'interaction laser-matière étant continue au fil de la propagation du rayon laser dans l'atmosphère, la technique lidar permet des mesures non seulement *à distance*, mais également *résolues spatialement* le long de l'axe de visée. Et si le dispositif de visée est muni d'un scanner angulaire, il devient possible de caractériser l'atmosphère dans les trois dimensions de l'espace. La technique lidar est donc susceptible de délivrer beaucoup plus d'informations qu'une instrumentation *in situ*.

Depuis 2004, mes recherches à l'ONERA ont ainsi porté sur la conception de systèmes lidars pour la caractérisation à distance des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère. En m'appuyant sur les innovations techniques issues des laboratoires de l'ONERA, et en faisant par ailleurs un usage averti et créatif des technologies commercialement disponibles ainsi que des méthodes existantes de traitement de l'information, mes travaux ont permis de mettre au point de nouveaux systèmes d'observation de l'atmosphère. Leurs applications sont nombreuses, et touchent à la fois aux domaines de la Défense (manœuvrabilité des avions, détection de gaz de combat), de l'Aéronautique (aide au contrôle de vol, détection de turbulences), de l'Espace (surveillance planétaire des gaz à effet de serre) et de la Sécurité/Environnement (mesures de gaz polluants ou dangereux). Le Tableau 1 ci-dessous donne un premier aperçu de la diversité des systèmes lidars que j'ai abordés, et dont il sera question dans ce mémoire.

	Longueur d'onde	Instrument	Principe de mesure	Paramètres mesurés (*) à venir	Famille de lidar	Technologie laser	Type de détection	Technologie détecteur
UV	0,35 µm	PADL	Diffusion Rayleigh	Vent Température Densité	Localisé	Cristal Nd :YAG à 1064 nm triplé à 355 nm	Directe	Caméra CCD Silicium
		MMEDTAC		Densité	Profileur			Tube Photomultiplicateur (PMT)
	0,35-0,42 µm	CALISTO	Diffusion Raman	H ₂ , H ₂ O, N ₂ (O ₂ , Temp.)*	Profileur			Photomultiplicateur Silicium (SiPM)
SWIR	1.3-1.5 µm	SHADOAS SWIR	Absorption	H ₂ O, CH ₄	A chemin intégré	Laser fibré supercontinuum	Cohérente	Photodiode InGaAs
	1.5 µm	Mini-peigne		H ₂ O (CO ₂)*	Profileur	Laser fibré cohérent		Photodiode InGaAs + traitement radiofréquence
	1.64 µm	VEGA		CH ₄ + Vent (flux)*				
	2.05 µm	HELENA		CO ₂ + Vent (flux)*				
MWIR	3-4 µm	SHADOAS MWIR	Absorption	CH ₄ , H ₂ O, COV	A chemin intégré	Laser fibré supercontinuum	Directe	Barette linéaire PbSe
	3-4 µm	SEPIA				Cristal NeSCOPO		Photodiode InSb
LWIR	7.5-11 µm	MICLID	Absorption	Gaz de combat	A chemin intégré	Cristal NeSCOPO	Directe	Photodiode HgCdTe

Tableau 1 – Synthèse des principaux systèmes lidars réalisés au cours de mes recherches.

La conception et la réalisation de nouveaux systèmes lidars exigent des connaissances et des compétences pluridisciplinaires. Mes travaux de recherche m'ont ainsi conduit, pour des problèmes et applications variés, à m'investir particulièrement dans **trois domaines clés**.

- Le premier est celui de la **physique et de l'optique atmosphériques**. Pour bien mesurer les grandeurs physiques recherchées, il est nécessaire de bien comprendre et modéliser les liens qui les unissent aux propriétés optiques et statistiques du signal lidar observé. Cette démarche fait appel à des connaissances variées en physico-chimie atmosphérique, interaction lumière-matière, et optique statistique.

- Le second domaine est celui des **technologies optroniques**. Pour chaque système lidar, il s'agit d'évaluer les propriétés, avantages et inconvénients de la source laser, du détecteur, et de tous les composants susceptibles de se trouver entre les deux (modulateurs, interféromètres, analyseurs spectraux, télescopes...). Or les technologies varient en fonction de la longueur d'onde du système, et j'ai eu l'occasion de travailler sur des lidars très divers fonctionnant dans l'UV, le SWIR, le MWIR et le LWIR (cf. Tableau 1). Cette variété a nécessité une veille technologique approfondie, et l'acquisition de nombreuses connaissances en photonique, interférométrie, optoélectronique, et instrumentation générale.

- Le troisième domaine est celui du **traitement de l'information** contenue dans le signal lidar. Ce domaine présente deux facettes intimement liées. La première consiste à évaluer la quantité d'information que transporte théoriquement le signal attendu, en calculant les *performances prévisionnelles* du système. La seconde consiste à appliquer aux signaux lidar réellement reçus les opérations appropriées de *traitement de signal*, afin d'extraire les informations recherchées avec le maximum de performance possible. Dans ces deux registres, il est nécessaire d'acquérir des connaissances spécifiques en mathématiques statistiques et traitement du signal numérique.

Ces trois domaines clés constituent les principaux fils rouges des différents travaux qui seront détaillés par la suite.

Ce mémoire est constitué de cinq chapitres et de deux annexes. Le **premier chapitre** propose tout d'abord une brève introduction générale aux systèmes lidars. Le lecteur déjà confirmé dans ce domaine pourra le survoler, mais le lecteur moins spécialisé y trouvera des schémas et des définitions utiles pour les chapitres suivants. Dans le **second chapitre**, je présente un résumé de mon parcours de recherche depuis 2004, en adoptant une perspective chronologique et thématique afin de faire ressortir le cheminement scientifique suivi. Dans le **troisième chapitre**, je reviens sur les trois « fils rouges » évoqués plus haut, et présente pour chacun d'entre eux les outils et les méthodes fondamentales que j'ai utilisés, et qui ont sous-tendu l'ensemble de mes travaux. Le **quatrième chapitre** présente les principaux résultats de mes recherches jusqu'à aujourd'hui, et détaille notamment les différents systèmes présentés au Tableau 1. Pour chaque thème, je présenterai le contexte applicatif des travaux effectués, leur positionnement par rapport à l'état de l'art, leurs résultats, et enfin leurs perspectives. Le **cinquième et dernier chapitre** fera une courte synthèse de mon parcours et des résultats obtenus, puis il présentera mon projet de recherche pour les années à venir. **Deux annexes** compléteront le document, la première listant l'ensemble de ma production scientifique par catégorie (publications, communications...), et la seconde présentant mon Curriculum Vitae détaillé.

Chapitre 1 - Introduction aux systèmes Lidars

NB : les figures présentées dans ce court chapitre sont issues du cours éponyme que j'ai préparé et dispensé à des étudiants de Master 2 à Polytech Paris Sud de 2014 à 2016.

Le mot LIDAR est l'acronyme de *Light Detection and Ranging*. Il s'agit d'un capteur qui émet, dans le domaine optique, un flux directif en direction d'une cible, et qui analyse le flux rétrodiffusé pour mesurer certains paramètres physiques. Sa dénomination fait directement allusion à celle du RADAR (*Radio Detection and Ranging*) dont le principe est identique, à la différence qu'un radar opère dans le domaine des radiofréquences.

1. Quatre famille de systèmes lidars

On peut distinguer quatre familles de lidars : lidars sur cible dure, lidars atmosphériques à chemins intégrés, lidars atmosphériques profileurs et lidars atmosphériques localisés. On rencontrera dans ce mémoire un ou plusieurs exemples de systèmes dans chaque catégorie.

Les **lidars sur cible dure**, représentés en Figure 1, fournissent une information localisée dans l'espace (ponctuelle), et caractérisent la cible, qui peut être un véhicule, un avion, une surface maritime ou continentale... Le coefficient de rétrodiffusion de la cible peut être important, de sorte que des lasers de faible puissance, relativement à la distance de la cible, peuvent être employés. Les paramètres mesurés de la cible peuvent être par exemple sa distance et sa forme (télémétrie 3D, altimétrie), sa vitesse (vélocimétrie), son spectre de vibration (vibrométrie), ou encore sa composition chimique de surface (spectrométrie Raman de surface, de fluorescence, de plasma).

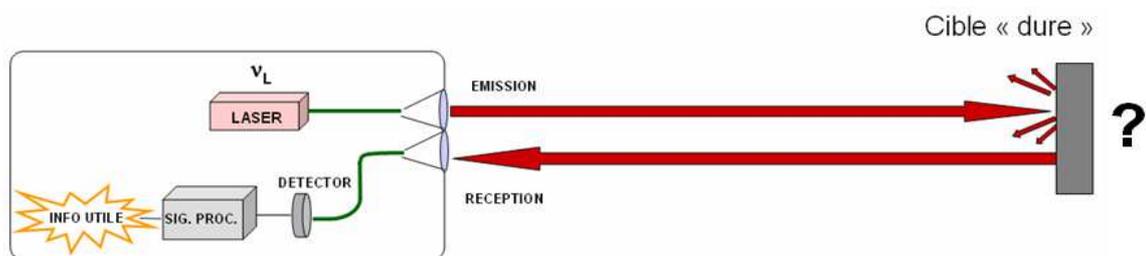


Figure 1 : Lidar sur cible dure

Les **lidars atmosphériques à chemin intégrés** (Integrated-Path ou IP en anglais), représentés en Figure 2, sont techniquement des lidars sur cible dure, sauf que l'information recherchée caractérise non plus la cible elle-même, mais l'atmosphère située entre l'émetteur et la cible. De tels systèmes sont couramment utilisés, y compris dans l'industrie, pour étudier l'atmosphère, notamment lorsque les sources lasers ne sont pas assez puissantes pour exploiter directement la diffusion atmosphérique. Ils sont également utilisés dans le domaine des lidars spatiaux pour la mesure des gaz à effet de serre à l'échelle planétaire.

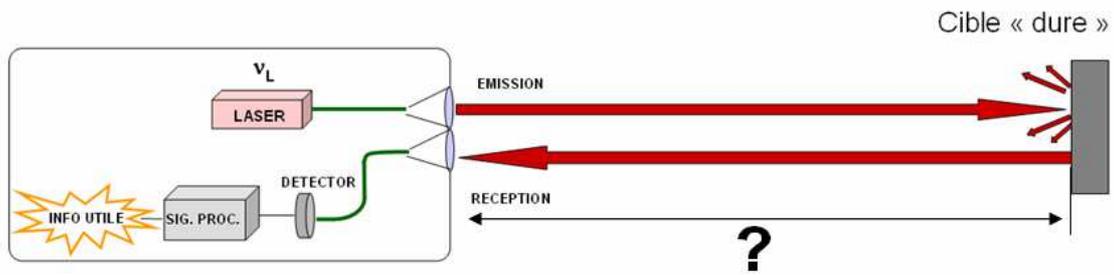


Figure 2 : Lidar atmosphérique à chemin intégré

Par contraste, les **lidars atmosphériques profileurs**, représentés en Figure 3, exploitent le signal issu de la rétrodiffusion du laser par les molécules et aérosols de l'atmosphère elle-même. La rétrodiffusion survenant tout au long de la propagation du faisceau laser, ces lidars sont capables de fournir le profil d'un ou plusieurs paramètres atmosphériques tout au long d'une ligne de visée : vitesse de la masse d'air (anémométrie), température, densité, concentration des gaz atmosphériques, ou encore concentration et dimension des aérosols atmosphériques.

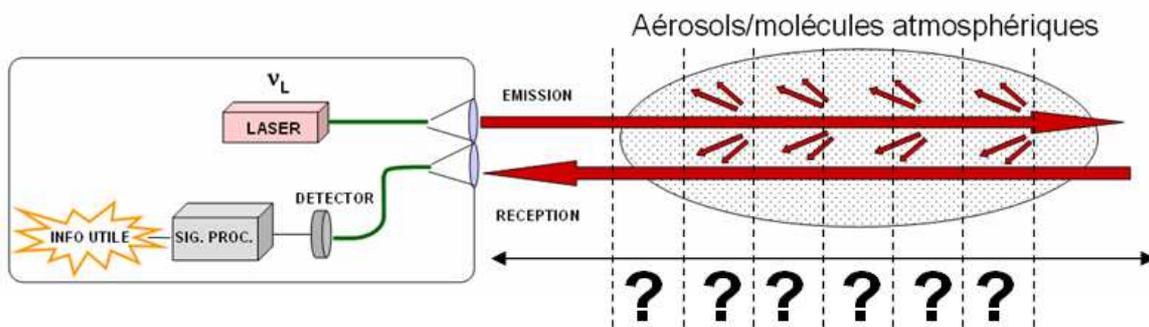


Figure 3 : Lidar atmosphérique profileur

Les **lidars atmosphériques localisés**, illustrés en Figure 4, exploitent eux aussi le signal de diffusion atmosphérique, mais seul le signal issu d'une zone de l'espace précise et limitée est efficacement détecté et analysé par le lidar. La distance et le volume d'analyse sont choisis à l'avance par conception (par effet de mise au point du récepteur par exemple, ou par application d'une porte temporelle au détecteur). Dans ce cas, on n'obtient plus un profil mais un unique point de mesure localisé dans l'atmosphère.

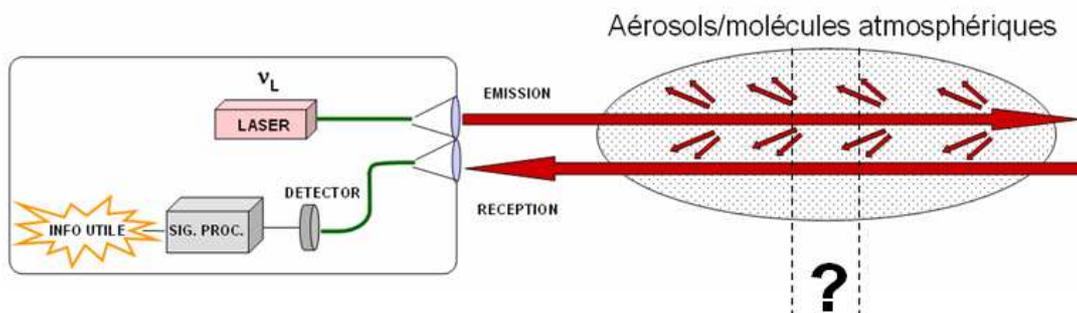


Figure 4 : Lidar atmosphérique localisé

2. Deux méthodes de détection

Il existe également deux principales techniques de détection en lidar : la détection directe, et la détection cohérente. On en verra également divers exemples dans ce manuscrit.

La **détection directe**, représentée en Figure 5, désigne la méthode de détection la plus courante, celle où l'on focalise « directement » le signal lidar sur un détecteur. Le courant délivré par le photo-détecteur est alors proportionnel au module carré du champ électrique incident. C'est la technique la plus simple, mais par contre l'information sur la phase temporelle du signal est perdue.

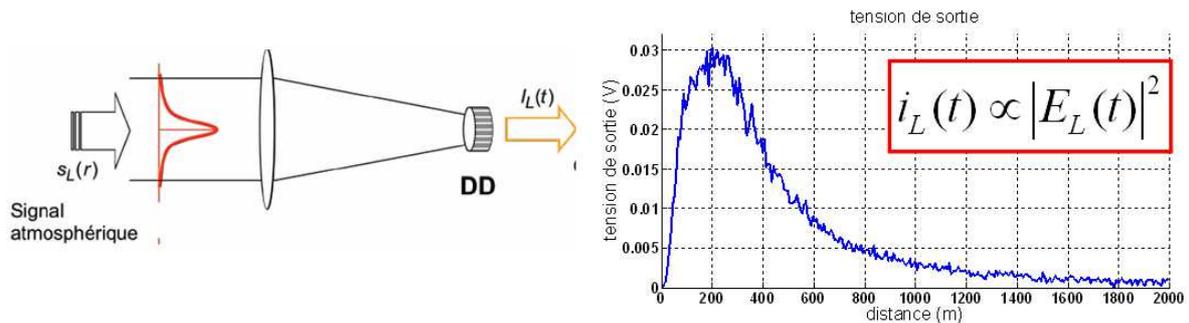


Figure 5 : Principe de la détection directe (DD). Le courant délivré i_L est proportionnel au module carré du champ laser E_L .

La **détection cohérente**, quant à elle, met en œuvre l'interférence, sur le détecteur, du signal lidar incident avec un signal de référence appelé « Oscillateur local (OL) », souvent issu du laser source lui-même. Le courant délivré par le photo-détecteur est alors proportionnel au module carré de la somme des deux champs électromagnétiques, dont on ne va généralement conserver que le signal d'interférence, comme représenté sur la Figure 6. Ce signal d'interférence évolue dans la gamme des radiofréquences, puisque le mélange avec l'oscillateur local élimine la porteuse optique. Il contient des informations sur l'amplitude et sur la phase de l'onde lidar, qu'il est possible d'exploiter de diverses manières. Comme le signal est aussi amplifié par le champ oscillateur local, la détection cohérente est aussi un bon moyen de limiter l'impact du bruit du détecteur et du bruit solaire sur une mesure lidar. Néanmoins, en tant que dispositif interférométrique, elle exige en contrepartie une grande finesse de réglage optique (ce qui apporte son lot de contraintes techniques) et est plus sensible que la détection directe aux sources de bruits de phase (speckle atmosphérique, turbulence...).

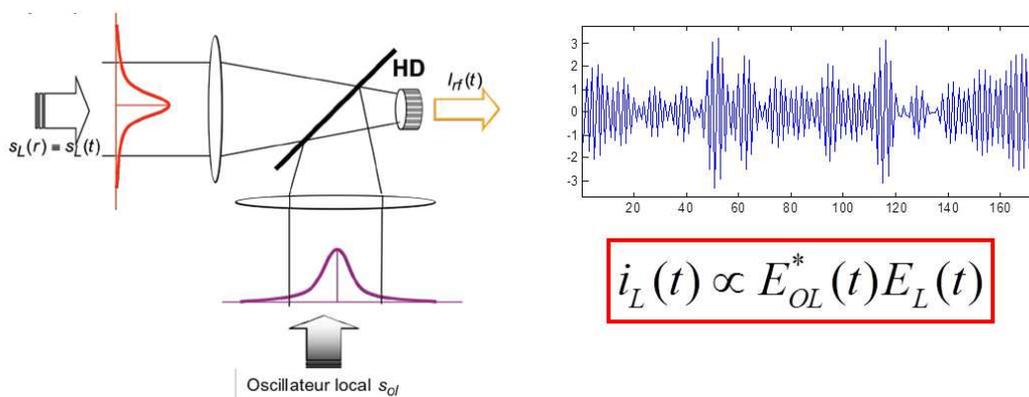


Figure 6 : Principe de la détection cohérente. Le courant utile d'interférence i_L délivré par le détecteur est proportionnel au produit du champ E_L du signal lidar et du champ conjugué E_{OL} de l'oscillateur local.

3. Bilan radiométrique d'un lidar impulsif

L'écriture du bilan radiométrique d'un lidar va permettre d'introduire également quelques notions fondamentales pour la suite. Nous limiterons ici la discussion au cas des lidars impulsifs, à l'instar de la quasi-totalité des systèmes qui seront décrits par la suite.

Considérons le cas d'un lidar impulsif, à détection directe, arrivant à incidence normale sur **une cible dure** à distance z_c . Comme le montre le diagramme « espace-temps » de la Figure 7, si une impulsion de durée τ_p est émise avec un profil de puissance $P_e(t)$, son écho, fortement atténué, sera enregistré par le récepteur au bout du temps d'aller-retour $t_{AR}=2z_c/c$.

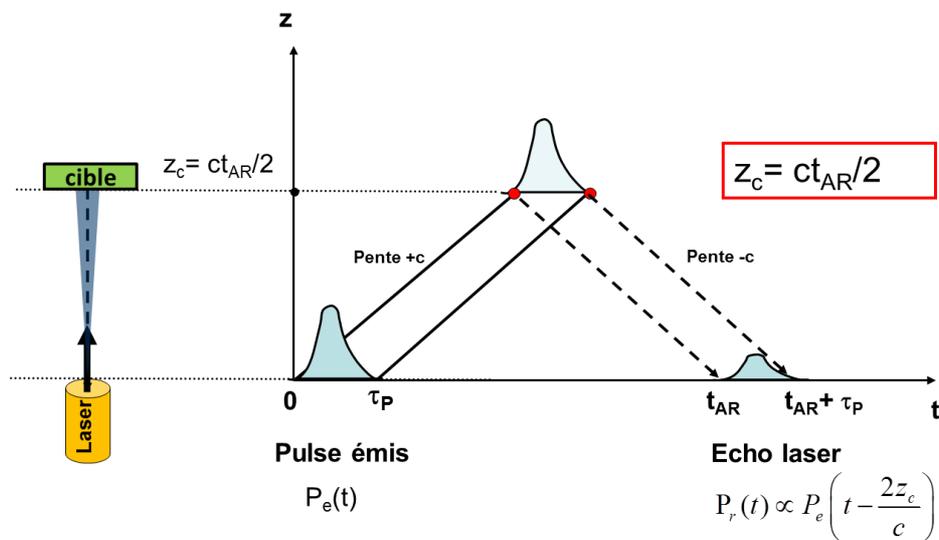


Figure 7 : Diagramme lidar « espace-temps » pour un lidar sur cible dure ou pour un lidar à chemin intégré.

En supposant que le temps de réponse du détecteur est beaucoup plus rapide que la durée d'impulsion, le courant délivré par le photo-détecteur sera donné par la formule approchée:

$$i_{lid}(t) = S_{det} P_e(t) \left(\frac{\rho}{\pi} \right) \left(\frac{A_{pup}}{z_c^2} \right) T_{opt} \gamma(z_c) \exp \left(-2 \int_0^{z_c} \alpha_{atm}(z) dz \right) \quad (1)$$

Où :

- S_{det} est la sensibilité du détecteur (A/W)
- $P_e(t)$ la puissance laser émise (W)
- ρ/π le coefficient de diffusion (en sr^{-1}) de la cible (supposée lambertienne ici)
- A_{pup}/z_c^2 l'angle solide de réception (sr), avec A_{pup} la surface de collection (m^2)
- T_{opt} la transmission globale des optiques du lidar aller/retour (entre 0 et 1)
- $\gamma(z_c)$ la valeur (entre 0 et 1) de la « fonction de recouvrement » du faisceau laser et du champ de vue du récepteur au niveau de la cible
- $\alpha_{atm}(z)$ le profil du coefficient d'extinction de l'atmosphère en m^{-1}

On peut extraire d'un tel signal diverses informations. Le temps d'arrivée du signal nous informe sur la distance de la cible (téléométrie), le coefficient de diffusion sur le type de surface rencontrée... Si l'on s'intéresse à l'atmosphère entre le laser et la cible (cas des lidars atmosphériques à chemins intégrés), la seule information disponible sur l'atmosphère est contenue dans le coefficient d'extinction α_{atm} , lié aux pertes par diffusion et absorption des aérosols et des molécules.

Le bilan radiométrique d'un lidar **atmosphérique** (toujours impulsionnel) n'est pas tellement différent de celui obtenu sur cible dure. La différence tient au fait que le faisceau laser est rétrodiffusé continuellement par l'atmosphère. Ainsi, comme le montre le graphique « espace-temps » de la Figure 8, à chaque instant t_R , le récepteur reçoit simultanément les échos issus du segment $[z_{min}, z_{max}]$, avec $z_{min}=c(t_R-\tau_P)/2$ et $z_{max}=z_{min}+c\tau_P/2$, où τ_P est la durée d'impulsion. Ce segment, de longueur $\Delta z=c\tau_P/2$, constitue la limite inférieure de résolution spatiale du lidar (sur l'axe). On appelle communément « case distance » l'intervalle de résolution effectif d'un lidar atmosphérique (qui peut être plus grand que Δz si la bande passante du détecteur n'est pas adaptée à la durée d'impulsion).

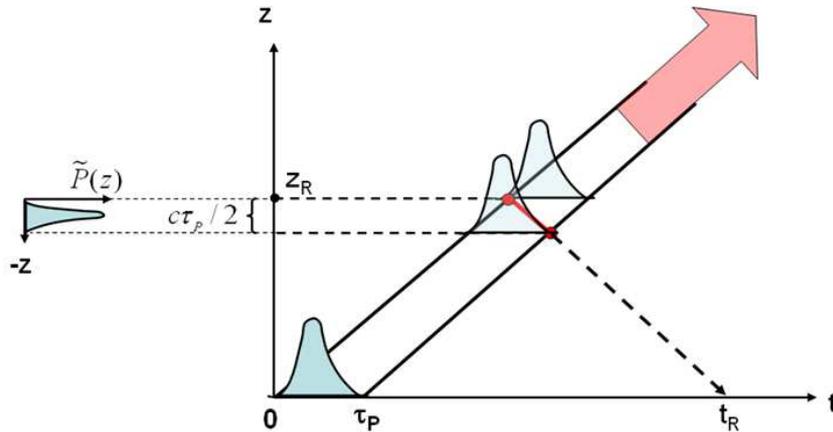


Figure 8 : diagramme lidar « espace-temps » pour un lidar atmosphérique profileur

L'expression du courant perçu à chaque instant t s'écrit donc sous la forme d'une intégrale dans une zone d'espace correspondant à une case distance. L'autre différence est qu'il faut remplacer le coefficient de diffusion directionnelle de la cible dure (facteur ρ/π) par celle de l'atmosphère, notée $\beta_{atm}(z)dz$, qui devient elle-même une fonction de l'espace. On appelle β_{atm} le coefficient de rétrodiffusion de l'atmosphère ($m^{-1}.sr^{-1}$). On obtient donc :

$$i_{lid}(t) = \int_{z_{min}}^{z_{max}} S_{det} P_e(t - 2z/c) \beta_{atm}(z) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha_{atm}(z') dz'\right) \left(\frac{A_{pup}}{z^2}\right) T_{opt} \gamma(z) dz \quad (2)$$

Les lidars atmosphériques, outre leur résolution spatiale (dans le cas des lidars profileurs), donnent donc également accès à des informations supplémentaires sur l'atmosphère, convoyées par le coefficient de rétrodiffusion β_{atm} . Il en va de même des lidars atmosphériques localisés, pour lesquels en revanche, on n'analyse qu'une seule case distance.

4. Lidars en diffusion et en absorption

S'agissant des lidars atmosphériques, on va donc rencontrer deux sortes de sondeurs :

- Les lidars « en diffusion », pour lesquels l'information recherchée est contenue dans le terme β_{atm} . Ce sera le cas des lidars Rayleigh-Mie et Raman qui seront présentés plus loin. Par nature, ces systèmes ne peuvent être que des lidars atmosphériques profileurs ou localisés.

- Les lidars « en absorption », pour lesquels l'information recherchée est contenue dans le terme α_{atm} : ce sera le cas des lidars DIAL (Differential Absorption Lidar), dont on présentera dans ce document plusieurs variantes, à chemin intégré ou profileurs.

Le schéma typique d'un lidar « en diffusion » est représenté en Figure 9. Le laser se propageant dans l'atmosphère va susciter une réponse en diffusion de l'atmosphère tout au long de sa propagation. Ce peut-être la diffusion des aérosols (diffusion Mie), ou bien celle des molécules de gaz par le biais de la diffusion Rayleigh ou de la diffusion Raman (nous reviendrons au chapitre 3.1 sur ces différents processus). Nous présenterons par exemple dans ce mémoire (cf. Tableau 1) le cas du lidar PADL (lidar atmosphérique localisé, exploitant le signal Rayleigh-Mie pour des mesures de vitesse, température et densité de l'air), et celui du lidar CALISTO (lidar atmosphérique profileur, exploitant le signal de diffusion Raman pour des mesures de concentrations de gaz multi-espèces).

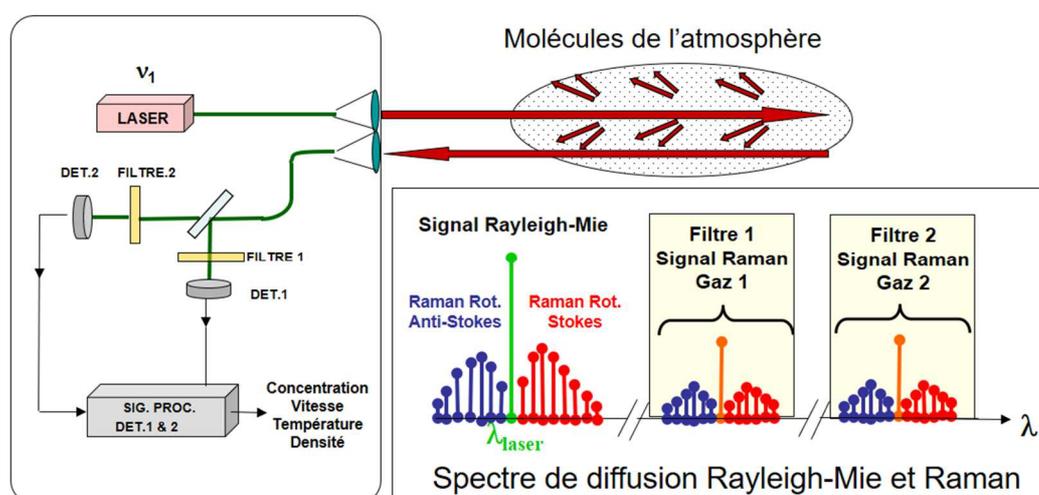


Figure 9 – Principe d'un lidar « en diffusion ». Le système exploite directement les signaux diffusés par l'atmosphère (diffusion Mie, Rayleigh, ou Raman) – ici les filtres dessinés correspondent à un lidar Raman (cf. chap.4.2).

Les lidars « en absorption » peuvent quant à eux se présenter sous différentes formes. Comme l'absorption n'est pas un phénomène générateur de lumière (elle en supprime au contraire), elle ne peut être visualisée que par contraste entre des signaux de diffusion subissant plus ou moins d'absorption au cours de leur propagation atmosphérique. L'absorption différentielle, subie par des faisceaux lasers émis à différentes fréquences, permet alors de mesurer le rapport de mélange volumique (Volume Mixing Ratio ou VMR) de différentes espèces gazeuses (CO_2 , CH_4 , H_2O ...). On parle de lidar en absorption différentielle ou DIAL (*Differential Absorption Lidar*).

Dans un lidar IP-DIAL (Integrated-Path DIAL), à chemin intégré, on utilise la diffusion d'une cible dure à l'extrémité d'une ligne de visée pour fournir le signal lidar, comme illustré sur la Figure 10. On mesure alors le contenu intégré du gaz cible sur le chemin optique, c'est-à-dire par exemple des ppm.m (VMR intégré). Nous présenterons dans ce mémoire plusieurs exemple de lidars IP-DIAL, notamment les systèmes SHADOAS, SEPIA, MICLID et Mini-peigne. Si par ailleurs on effectue la mesure par lidar de la distance de la cible dure (télémétrie), on peut calculer le VMR moyen du gaz cible sur la ligne de visée. Ce concept de mesure IP-DIAL/télémétrie est au cœur des lidars DIAL spatiaux en cours de développement, nous y reviendrons également.

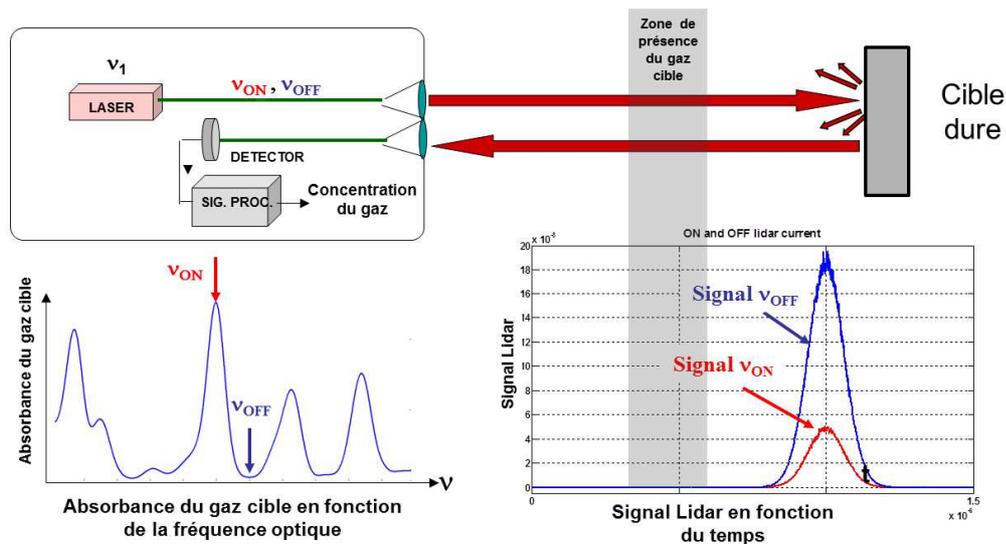


Figure 10 – Principe du lidar IP-DIAL. Le système ne peut localiser le gaz cible dans l'espace, mais sa présence et sa concentration intégrée sont révélées par la différence d'amplitude des signaux lidars enregistrés aux longueurs d'onde ON (absorbée) et OFF (non absorbée).

Dans un lidar RR-DIAL (Range-Resolved DIAL), on utilise la diffusion des aérosols et/ou des molécules pour fournir le signal lidar, comme le montre la Figure 11. Les signaux de diffusion sont alors continus au fur et à mesure que les faisceaux lasers se propagent, et l'analyse de leur absorption différentielle au cours du temps peut ainsi révéler l'évolution dans l'espace de la concentration du gaz cible. L'information obtenue sur le gaz est alors bien plus riche et complète que pour un système IP-DIAL. Mais le coefficient de diffusion atmosphérique étant beaucoup plus faible que celui d'une cible dure, les systèmes RR-DIAL exigent en contrepartie, à portée équivalente, davantage de puissance laser, et/ou de sensibilité en détection. Nous présenterons plusieurs exemples de systèmes RR-DIAL dans ce document, notamment les lidars VEGA et HELENA (le plus pouvant le moins, ces systèmes fonctionnent également en IP-DIAL).

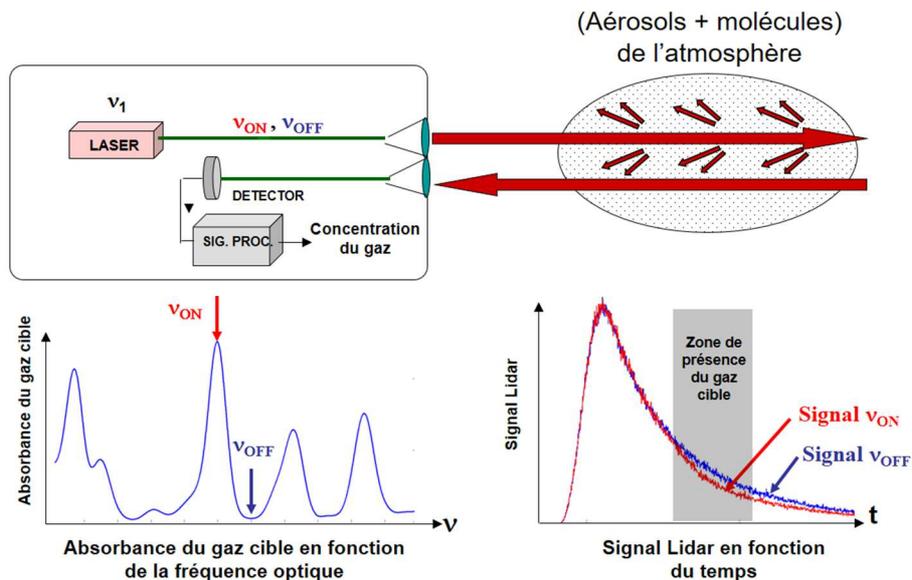


Figure 11 – Principe du lidar RR-DIAL (Range-Resolved DIAL). La vitesse différentielle de décroissance du signal lidar à la longueur d'onde ON et OFF est l'indicateur de la présence du gaz.

Chapitre 2 – Parcours de recherche

Ce chapitre vise à fournir au lecteur, d'une part, une première introduction aux thèmes de recherche abordés et aux contextes dans lesquels ils se sont inscrits, et d'autre part, une présentation du cheminement que j'ai suivi au cours de mon parcours scientifique de 2004 à aujourd'hui. Les chapitres 3 et 4 permettront de revenir en détails sur les différents outils et méthodes employés, ainsi que sur les principaux résultats de recherche, qui ne seront par conséquent que brièvement évoqués ici. Les notes de bas de page dans ce chapitre indiquent les références des principales publications et communications que j'ai (co)signé dans chacun des domaines évoqués, ainsi que les thèses que j'ai directement encadrées, ou aux résultats desquelles j'ai contribué significativement.

1. Environnement de recherche

Tout travail de recherche prenant place dans un environnement donné, et étant fortement influencé par lui, il me semble important de présenter tout d'abord l'environnement de recherche qui fut le mien de 2004 à aujourd'hui.

Je suis entré au Département d'Optique et Techniques Associées (DOTA) de l'ONERA en 2004, pour réaliser mon stage de Master. J'ai alors rejoint l'unité de recherche « Sources Laser et Systèmes » (SLS), localisée à Palaiseau, et constituée alors d'une quinzaine de personnes et d'un doctorant. J'y ai ensuite réalisé ma thèse (2004-2008), et j'ai été recruté en 2007 comme ingénieur de recherche titulaire. J'ai travaillé dans l'unité SLS jusqu'à la fin de l'année 2019, date à laquelle, pour des motifs familiaux, j'ai rejoint le centre ONERA de Toulouse, toujours au DOTA. Je reviendrai sur ce mouvement récent en fin de document, au moment d'évoquer les perspectives de mes travaux. Les recherches qui sont mentionnées dans ce mémoire se sont donc essentiellement déroulées dans l'unité SLS à Palaiseau. On trouvera aussi plusieurs exemples de travaux menés en collaboration avec l'unité « Systèmes Lasers pour la Métrologie » du Département de Mesures Physiques (DPHY/SLM), équipe de Palaiseau également impliquée, depuis les années 2010, dans le développement de systèmes lidars.

A mon arrivée en 2004, l'unité SLS était dirigée par Jean-Pierre Cariou et venait de s'organiser autour de deux principaux pôles d'activités : un « Pôle Laser », dédié au développement de nouvelles sources laser infrarouges à base de technologies fibrées (à 1.5 μm initialement), et un « Pôle Lidar », visant au développement de systèmes lidars Doppler à détection cohérente, pour effectuer des télémessures de vent (anémométrie) ou de vitesses et vibrations d'objets distants (vélocimétrie, vibrométrie). Bien entendu, le pôle Lidar avait vocation à solliciter le pôle Laser afin de bénéficier de sources fibrées de nouvelle génération, non disponibles commercialement, et aux performances optimisées pour les applications Lidar envisagées. A cette époque le premier lidar Doppler impulsif fibré à 1.5 μm , pour l'anémométrie, était en passe d'être mis au point dans l'unité (thèse de Matthieu Valla, 2001-2004). Il allait bientôt contribuer au succès de la jeune société Leosphere, après un transfert de technologie réussi qui vit aussi le départ vers Leosphere de Jean-Pierre Cariou, remplacé à la tête de l'unité SLS par Claudine Besson (2004).

C'est dans ce contexte très dynamique que se sont déroulés mon stage de Master, puis ma thèse, sur le sujet de la mesure de vent, de température, et de densité atmosphérique par lidar Doppler moléculaire. Ce sujet s'est rapidement révélé singulier au sein de l'équipe, car il impliquait

de recourir à des technologies très différentes de celles développées jusqu'alors par les pôles Laser et Lidar. Ce positionnement original m'a certes posé initialement quelques difficultés, mais il m'a aussi conduit à développer un autre regard sur « le monde des lidars ». C'est probablement cette expérience qui m'a permis et m'a donné envie d'explorer par la suite une palette élargie de systèmes lidars toujours différents et visant des applications variées. Cette diversité constitue, je crois, un aspect singulier de ma carrière de recherche jusqu'à aujourd'hui.

2. Lidars à diffusion Rayleigh-Mie

Mon sujet de thèse (2004-2008), poursuivant mon stage de Master, a porté sur l'étude de faisabilité d'un lidar dit « moléculaire » ou « à diffusion Rayleigh », visant à mesurer à courte distance à la fois la vitesse du vent, mais aussi sa température et sa densité atmosphérique. J'ai eu la chance d'être dirigé, lors de ce parcours initiatique qu'est la thèse, par Jean-Pierre Huignard (Thales R&T), Pierre Flamant¹ (Laboratoire de Météorologie Dynamique), et Agnès Dolfi-Bouteyre (Onera), ce qui m'a permis de bénéficier de trois approches complémentaires de la recherche.

Le sujet visait à définir des opportunités de nouveaux équipements pour les avions du futur et pour les avions d'armes. En effet, déterminer la vitesse de la masse d'air en amont d'un avion devait permettre d'assister les systèmes de commandes de vol de ce dernier, afin d'anticiper, contrebalancer, voir éviter, des zones de turbulences. Or les lidars Doppler cohérents développés jusqu'alors dans mon unité, basés sur la diffusion de Mie des aérosols atmosphériques, n'offraient de solution fiable que dans les basses couches atmosphériques où les aérosols sont abondants. A haute altitude, où seule la présence de molécules de gaz est certaine, il était nécessaire, pour assurer une disponibilité de mesure infaillible, de songer à un autre type de lidar, basé sur la diffusion moléculaire, dite « de Rayleigh ». La diffusion Rayleigh semblait par ailleurs pouvoir offrir en même temps la possibilité de mesurer la température et la densité de l'air, deux autres paramètres aérodynamique de grand intérêt pour le contrôle de vol.

Mes travaux m'ont donc d'abord conduit à étudier les ressorts du processus de diffusion Rayleigh, des phénomènes d'ordre deux qui l'accompagnent (diffusion Raman et Brillouin), et de la diffusion de Mie sur les aérosols, dont le signal interfère spectralement avec le signal de diffusion Rayleigh. J'ai ensuite proposé la conception d'un lidar fonctionnant dans l'ultra-violet (UV), l'intensité du phénomène de diffusion Rayleigh étant en effet exacerbée aux faibles longueurs d'ondes (en λ^{-4}). La grande largeur spectrale de diffusion Rayleigh (plusieurs GHz dans l'UV) interdisant le recours aux techniques d'interférométrie fibrée et de détection cohérente, je me suis alors penché sur les méthodes d'analyse spectrale du signal lidar par interférométrie en espace libre (interféromètres de Fabry-Perot, de Mach-Zehnder, de Michelson) et par détection directe. Dans ce mode de fonctionnement, le laser UV devait réunir des qualités de forte énergie impulsionnelle et de finesse spectrale, impliquant là aussi une technologie en espace libre (cavité laser injectée). C'est ainsi que le système lidar conçu, basé sur une détection directe dans le domaine UV avec des optiques en espace libre, s'est révélé le presque-exact opposé des lidars Doppler développés par ailleurs dans l'unité, basés sur une détection cohérente dans le domaine IR avec des composants fibrés !

¹ Décédé en 2020, Pierre Flamant a dirigé au cours de sa généreuse carrière 24 doctorants (je fus le 21ème). Qu'il me soit permis de lui rendre hommage ici.

J'ai finalement proposé une technique d'analyse spectrale originale basée sur des interféromètres de Michelson, et entrepris de développer un démonstrateur lidar nommé PADL² (**P**rototype of an **Air-Data Lidar**) utilisant ce principe. A cette époque, suivant le sillage des travaux de mon collègue Matthieu Valla (qui partageait mon bureau) sur les lidars Doppler cohérents, je me suis également formé à l'emploi des techniques d'estimation paramétrique au maximum de vraisemblance, ainsi qu'au calcul des Bornes de Cramer-Rao d'un système lidar (notions sur lesquelles je reviendrai plus en détail au chapitre 3.3). En les appliquant à ma propre problématique de thèse, j'ai pu d'une part développer une méthode efficace pour le traitement des interférogrammes de Michelson³, et d'autre part calculer les performances prévisionnelles du lidar pour la mesure des paramètres atmosphériques recherchés (vent, température, densité, et rapport de diffusion Rayleigh/Mie)⁴. Enfin, un travail de réalisation expérimentale m'a permis de démontrer la faisabilité technique d'une mesure de vent par lidar Rayleigh-Mie avec la méthode proposée⁵, démonstration originale et à l'état de l'art de l'époque.

Au cours de ma thèse, j'ai ainsi acquis des connaissances originales pour mon unité de recherche, dans le domaine des lasers, détecteurs et optiques UV, des systèmes interférométriques multi-ondes et à deux ondes, et des méthodes de traitement de signal associées. Ces nouvelles connaissances ont contribué à faciliter le positionnement de mon unité sur la thématique des lidars Rayleigh, pour des projets bilatéraux, nationaux ou européens. Avec mon recrutement à l'Onera en 2007, peu avant la fin de ma thèse, j'ai eu l'opportunité de mener moi-même certains de ces projets, et de participer à plusieurs autres. J'ai par exemple pris part au projet ANR MMEDTAC (2008-2010), dédié à la mesure de Turbulences en Air Clair (TAC) par lidar depuis le sol. J'ai participé notamment, au cours de ce projet, à une campagne de mesure à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) et à la mise en place d'une chaîne de réception à comptage de photon, qui permit plus tard la mise en évidence (quoique ténue) de TAC⁶. J'ai également mené une étude nommée SARA pour le compte de Sagem (2009), puis participé, mais d'un peu plus loin, aux projets européens FP6-FLYSAFE (2005-2009) puis FP7-DELICAT (2009-2014), dédiés entre autres à la définition et réalisation d'un lidar Rayleigh embarqué pour la détection et compensation des TAC.

Néanmoins, malgré nos efforts, la technologie des lidars Rayleigh n'était pas, autour des années 2010, assez mature pour constituer un équipement embarqué suffisamment léger et fiable. Ressentant une forme d'essoufflement de cette thématique, notamment après le désengagement de plusieurs partenaires industriels, j'ai voulu évoluer vers de nouvelles activités, en particulier le développement de systèmes lidars pour la détection des gaz atmosphériques. Cette activité me semblait à la fois attractive, porteuse, et pas totalement dissociée de celle des lidars Rayleigh. En

² J'avoue n'avoir donné ce nom au prototype qu'au moment d'écrire ces lignes, pour plus de clarté dans ce mémoire. Il était sinon connu au sein de mon unité comme « le lidar Rayleigh », un nom trop peu explicite...

³ **N. Cézar**d, A. Dolfi-Bouteyre, J-P. Huignard, and P-H. Flamant "Development of a short-range 355-nm Rayleigh-Mie lidar using a Michelson interferometer for wind speed measurements", Proc. SPIE 6750, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing III, 675008 (2007)

⁴ **N. Cézar**d, A. Dolfi-Bouteyre, J-P. Huignard, and P-H. Flamant, "Performance evaluation of a dual fringe-imaging Michelson interferometer for air parameter measurements with a 355 nm Rayleigh-Mie lidar," Appl. Opt. 48, 2321-2332 (2009)

⁵ **N. Cézar**d, A. Dolfi-Bouteyre, J.P. Huignard, P.H. Flamant "Potential of the Michelson Interferometer fringe-imaging technique for Rayleigh-Mie spectral analysis", *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 24*, Boulder, USA (2008)

⁶ A. Hauchecorne, C. Cot, F. Dalaudier, J. Porteneuve, T. Gaudo, R. Wilson, C. Cénac, C. Laqui, P. Keckhut, J-M. Perrin, A. Dolfi, **N. Cézar**d, L. Lombard, and C. Besson, "Tentative detection of clear-air turbulence using a ground-based Rayleigh lidar", Appl. Opt. 55, 3420-3428 (2016)

effet, les molécules de gaz atmosphériques constituant le support du signal Rayleigh, j'avais déjà acquis des bases en matière de physico-chimie atmosphérique et interaction lumière-molécule. En me tournant vers les lidars pour la détection de gaz, les molécules atmosphériques devenaient simplement l'objet d'étude par elles-mêmes.

J'ai donc pris ce virage en 2009-2010, en accord avec ma direction, de sorte que mon activité sur les lidars Rayleigh fut « mise en sommeil » à cette époque. Un sommeil toutefois léger, puisque j'ai continué à suivre, dans les années qui suivirent, les activités sur cette thématique à l'Onera et dans d'autres laboratoires. J'ai par exemple contribué significativement à l'accompagnement scientifique d'un doctorant allemand du DLR (Jonas Herbst 2015-2019), lequel a poursuivi mes propres travaux de thèse en développant un lidar Rayleigh UV à interféromètre de Michelson plus robuste (monolithique). A l'Onera, la thématique des lidars Rayleigh fait l'objet d'une nouvelle phase de travaux depuis 2018, et j'ai depuis lors co-encadré plusieurs stages sur ce sujet. Actuellement, le lidar Rayleigh connaît en effet un regain d'intérêt, car il reste pertinent dans son principe, et les évolutions technologiques, notamment sur les lasers et les interféromètres, sont favorables. De nouvelles plateformes aéroportées en haute-altitude comme les HAPS (High-Altitude Pseudo Satellites) sont également en train de voir le jour, et pourraient faire apparaître de nouveaux besoins en matière de lidars Rayleigh.

3. Lidars à absorption différentielle en bande large

Vers 2010, j'ai commencé mes recherches sur la caractérisation par lidar des espèces chimiques contenues dans l'atmosphère, une thématique nouvelle pour moi comme pour mon unité de recherche. Ce fut d'abord dans la perspective des lidars à absorption différentielle et à large bande, en particulier dans le domaine spectral 3-4 μm . Ce domaine, qui fait partie de la bande MWIR (*Middle-Wave Infrared*, entre 3 et 5 μm), est en effet d'une importance particulière car il comprend des signatures fortes du méthane et de nombreux autres composés organiques volatils (COV), tandis que la transparence atmosphérique y est élevée. C'est donc un domaine d'intérêt pour la mesure de polluants industriels ou de gaz issus de combustion (moteurs d'avion, missiles...).

A cette époque, une partie des activités du Pôle Laser de mon unité s'était alors tournée, pour des applications civiles et de défense, vers le développement de sources impulsives fibrées d'un nouveau genre, dites « à supercontinuum », dont le spectre pouvait s'étendre continuellement de 1 à 4 μm par exaltation d'effets non linéaires dans des fibres spéciales. Au même moment, une autre technologie laser était développée au sein de l'unité DPHY/SLM (dirigée alors par Michel Lefebvre) : celle des oscillateurs paramétriques optiques largement accordables et en cavités imbriquées (Nested Cavity OPO, ou NesCOPO). Cette technologie commençait à atteindre elle aussi une maturité suffisante pour envisager la réalisation de systèmes lidars pour la détection de gaz. Je reviendrai au chapitre 3.2 de manière plus détaillée sur les sources laser supercontinuum et NesCOPO.

Un enjeu commun s'est donc naturellement fait jour, consistant à évaluer le potentiel applicatif de ces deux technologies laser, supercontinuum fibré et NesCOPO, pour la télédétection de multiples espèces de gaz par absorption différentielle, en particulier dans la bande 3-4 μm . Les puissances laser disponibles étant encore faibles, il s'agissait principalement d'anticiper et de tester les performances de mesure en mode IP-DIAL (cf. Figure 10), tout en gardant en ligne de mire l'éventualité d'une progression future vers des mesures résolues RR-DIAL (cf. Figure 11).

J'ai commencé par assimiler les principes physiques de la spectroscopie d'absorption moléculaire ro-vibrationnelle. Puis j'ai développé un code de transfert radiatif en transmission (détaillé au chapitre 3.1), faisant usage de diverses bases de données spectroscopiques, afin de calculer le spectre d'absorption d'un mélange arbitraire de gaz le long d'un axe de visée laser, dans des conditions variées de rapports de mélanges, de température et de pression. Je me suis également intéressé davantage à la diffusion de Mie des aérosols atmosphériques, phénomène que je n'avais abordé jusqu'alors que comme une source d'interférence pour les lidars Rayleigh. En effet, pour des mesures dans la troposphère, et en particulier dans le MWIR, la diffusion Rayleigh sur les molécules est négligeable par rapport à la diffusion de Mie sur les aérosols. Ces derniers sont donc les seuls « fournisseurs » du signal lidar lorsque celui-ci opère en mode résolu (RR-DIAL), raison pour laquelle il était particulièrement important de s'y intéresser. J'ai donc là aussi développé un code permettant d'évaluer les coefficients d'absorption et d'extinction de mélanges d'aérosols très divers.

En associant différentes briques de codes de calcul (en libre-accès, ou bien de mon cru), j'ai fini par développer un outil versatile de modélisation numérique nommé **LIDIASOL** (Lidar Dial pour applications Sol). Cet outil me permettait, pour un lidar totalement paramétrable à source supercontinuum ou à source accordable de type NesCOPO, et dans une vaste gamme de conditions atmosphériques, de modéliser le signal et la précision de mesure prévisionnelle d'un système à partir du calcul des Bornes de Cramer-Rao (cf. chapitre 3.3). Le code LIDIASOL n'a ensuite pas cessé de s'enrichir au fil de mes recherches, intégrant progressivement de nouvelles fonctionnalités comme on le verra par la suite.

En parallèle, j'ai encadré dès 2010 les travaux de post-doctorat de **Julien Fade**, avec lequel nous avons travaillé en profondeur sur le thème du traitement de l'information multi-spectrale en spectroscopie large bande (supercontinuum et NesCOPO), pour des problèmes d'estimation, de détection, et d'identification. Dans la lignée des techniques utilisées pour le lidar Rayleigh-Mie, nous avons étudié les performances d'un estimateur paramétrique au maximum de vraisemblance. Puis nous avons abordé des questions nouvelles pour moi, en travaillant sur le problème de la détection d'un gaz. En s'appuyant sur la théorie des tests de Neyman-Pearson, nous avons déterminé comment calculer les courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) d'un lidar IP-DIAL, afin d'anticiper les probabilités de fausses alarmes et de bonne détection dans un scénario donné⁷. Enfin, nous avons abordé la question de l'identification des espèces de gaz à partir d'un signal multi-spectral, en se concentrant sur les méthodes de régression à complexité pénalisée. Des critères de pénalisation très originaux, basés sur la théorie descriptive de l'information⁸, ont été en particulier étudiés et testés avec succès.

Je reviendrai en détails, au cours du chapitre 3.3, sur ces différents outils pour l'estimation, la détection, et l'identification de gaz, mais cette période de travail a été pour moi une source importante d'enrichissement scientifique et méthodologique. Elle m'a notamment permis d'élargir mon regard sur les différentes missions de mesure que l'on peut assigner à un système lidar, et sur les critères de performances que l'on peut associer à chacune d'entre elle.

⁷ J. Fade et **N. Cézard**. Supercontinuum Lidar absorption spectroscopy for gas detection and concentration estimation. *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 25*, Jul 2010, Saint-Petersburg, Russia (2010)

⁸ J. Fade, S. Lefebvre, and **N. Cézard**, "Minimum Description Length approach for unsupervised spectral unmixing of multiple interfering gas species," *Opt. Express* 19, 13862-13872 (2011)

Les travaux expérimentaux menés sur les lidars IP-DIAL à large bande ont pris naturellement des chemins différents selon le type de source laser utilisé. Sur les lidars à supercontinuum fibré, nous avons d’abord développé, toujours au cours du post-doctorat de Julien Fade, un premier banc expérimental fonctionnant dans le SWIR et réalisé des tests de lidar IP-DIAL pour la détection de méthane et de vapeur d’eau. A l’issue du post-doc, j’ai d’ailleurs pu appliquer avec succès aux signaux expérimentaux les algorithmes d’identification à complexité pénalisée développés auparavant⁹. En parallèle, le développement par le Pôle Laser du laser supercontinuum en bande MWIR progressait au laboratoire. Sur les NesCOPO, une collaboration a pris place avec l’équipe DPHY/SLM, notamment au cours du **PRF SEPIA** (Projet de Recherche Fédérateur de l’Onera, 2012-2016), afin de co-développer un lidar multi-espèces accordable en bande MWIR.

C’est dans ce contexte que j’ai encadré mon premier doctorant, **Alexandre Dobroc** (2011-2014), dirigé par Michel Lefebvre (ONERA/DPHY). Ses travaux de thèse ont permis tout d’abord de développer, à partir d’outils méthodologiques communs, des méthodes de traitement multi-spectrales adaptables à la fois aux lidars à sources supercontinuum et aux lidars à sources accordables¹⁰. Dans le domaine des supercontinuum, nous avons démontré la faisabilité de mesures quantitativement fiables de la concentration de multiples espèces de gaz (CH₄ et H₂O) dans le SWIR¹¹. Dans le MWIR, un banc de spectrographie rapide a également été initié, mettant en œuvre pour la première fois la source supercontinuum à verre fluoré développée par le Pôle Laser de l’unité, et permettant de réaliser de premières expériences de mesure de CH₄ dans le MWIR (3.3μm)¹⁰. Dans le domaine des NesCOPO, les travaux de thèse ont également permis, après un fructueux travail de collaboration avec la doctorante **Jessica Barrientos-Barria** (2012-2015, DPHY/SLM, encadrée par Myriam Raybaut) de réaliser des premières mesures IP-DIAL multi-espèces (CH₄ et H₂O) dans le MWIR¹². Dans ce domaine, j’ai aussi apporté une contribution plus personnelle et originale, en m’intéressant au problème de l’optimisation de la séquence de longueurs d’onde optimale à émettre par le NesCOPO, en fonction de l’objectif de mesure et dans un temps contraint¹².

L’ensemble de ces développements a impliqué pour moi, à cette époque, l’assimilation de nombreuses nouvelles connaissances en matière de sources laser non linéaires dans les cristaux et dans les fibres optiques, de spectroscopie expérimentale (à réseaux, à transformée de Fourier), de détection infrarouge (mono-détecteurs, matrices), et de traitement de signal.

A l’issue de la thèse de A. Dobroc et du PRF SEPIA, j’ai poursuivi les travaux sur le lidar supercontinuum pendant encore un an. J’ai finalisé le banc de spectrographie supercontinuum à haute cadence en bande MWIR (3-4 μm), initié pendant la thèse et baptisé **SHADOAS** (Supercontinuum Light Generation for Differential Optical Absorption Spectroscopy). Puis j’ai

⁹ **N. Cézard**, A. Dobroc, G. Canat, M. Duhant, W. Renard, C. Alhenc-Gelas, S. Lefebvre, and J. Fade, "Supercontinuum laser absorption spectroscopy in the mid-infrared range for identification and concentration estimation of a multi-component atmospheric gas mixture", Proc. SPIE 8182, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VII, 81820V (2011)

¹⁰ Alexandre Dobroc, « *Etude et réalisation de dispositifs optiques à large couverture spectrale pour la détection multi-gaz à distance* », Thèse de doctorat de l’Ecole Polytechnique, soutenue le 18 décembre 2013

¹¹ A. Dobroc and **N. Cézard**, "Performance assessment and signal processing for range-integrated concentration measurement of gas species using supercontinuum absorption spectroscopy," Appl. Opt. 51, 8470-8480 (2012)

¹² J. Barrientos Barria, A. Dobroc, H. Coudert-Alteirac, M. Raybaut, **N. Cézard**, J.-B. Dherbecourt, T. Schmid, B. Faure, G. Souhaité, J. Pelon, J.-M. Melkonian, A. Godard, and M. Lefebvre, "Simultaneous remote monitoring of atmospheric methane and water vapor using an integrated path DIAL instrument based on a widely tunable optical parametric source," Appl. Phys. B: Lasers Opt. 117(1), 509–518 (2014).

démontré la capacité de cet instrument à mesurer des spectres de 200 nm de large en seulement 0.1 seconde à haute résolution (0.8 cm^{-1}) dans le MWIR à $3.3\mu\text{m}$ ¹³. A l'époque, ces résultats étaient à l'état de l'art, et l'association d'une source supercontinuum fibrée en verre fluoré dans le MWIR et d'un spectrographe statique et rapide (basé sur une barrette linéaire de détecteurs photoconductifs en PbSe) était véritablement innovante.

Toutefois, malgré ces démonstrations encourageantes, il devenait de plus en plus clair à cette époque (2014-2015) que la technologie des lidars supercontinuum en bande MWIR présentait aussi de sérieux écueils. En raison d'une part de la fragilité des fibres MWIR (en verre fluoré), et de leur interfaçage délicat avec les fibres en silice (soudure et collage difficiles), il n'était pas possible de progresser à court terme vers des applications de terrain. Malgré des tentatives pour les résoudre, les obstacles techniques restèrent significatifs. Par ailleurs les applications pratiques des lidars supercontinuum demeuraient incertaines dans le MWIR, tandis que l'accès au LWIR, plus prometteur pour les applications défense, s'avérait beaucoup plus difficile techniquement (cf. chapitre 3.2). Vers 2015, pour ces différentes raisons, et également devant l'importante montée en volume d'autres travaux de recherche qui requéraient toute mon attention, il fut décidé collégalement, au sein de mon unité, de cesser nos travaux sur les sources et lidars fibrés à supercontinuum.

Sur les lidars accordables en bande large de type NesCOPO, ma collaboration avec l'unité DPHY/SLM s'est en revanche poursuivie, notamment dans le cadre du projet EDA **MICLID** (2015-2018) mené par Jean-Michel Melkonian. MICLID est un lidar accordable en bande large dans le domaine spectral LWIR (Long-Wave Infrared, $8\text{-}12\mu\text{m}$), destiné à la télédétection de gaz de combats (Sarin, moutarde...). Il est basé sur la même technologie de base que le lidar SEPIA précédemment développé dans le MWIR, mais présente une architecture plus complexe pour accéder au LWIR¹⁴. Au cours de ce projet, j'ai pu d'abord enrichir le code LIDIASOL pour modéliser les performances attendues du lidar MICLID dans le LWIR, et proposer des optimisations de son fonctionnement¹⁵. J'ai pu également établir les courbes ROC prévisionnelles du système (cf. chapitre 3.3). Ces travaux, publiés fin 2020, pourront servir de base pour rendre plus efficaces et opérationnels de futurs systèmes lidars de surveillance et sécurité.

4. Lidars à diffusion Raman pour la détection de gaz

Les prémices de mes travaux sur les lidars Raman pour la détection de gaz remontent également à 2010. Cette année-là, l'Andra (Agence Nationale de gestion des Déchets Radioactifs) est venue solliciter l'Onera afin de rechercher des solutions de télédétection des vapeurs de dihydrogène (H_2) émises par les colis de déchets radioactifs, dont elle a la responsabilité du stockage à long terme. En France, les colis de déchets radioactifs sont en effet susceptibles d'être stockés à terme dans des galeries situées dans le sous-sol profond (concept de stockage géologique du projet Cigeo mené par l'Andra). Or des émanations de dihydrogène pourraient créer un risque d'incendie. Maitriser ce

¹³ **N. Cézard**, G. Canat, A. Dobroc, M. Duhant, W. Renard, and C. Besson, "Fast and wideband supercontinuum absorption spectroscopy in the mid-IR range," in *Imaging and Applied Optics 2014*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper LW4D.4 (2014)

¹⁴ J-M. Melkonian, J. Armougom, M. Raybaut, J-B. Dherbecourt, G. Gorju, **N. Cézard**, A. Godard, V. Pašiškevičius, R. Coetzee, and J. Kadlčák, "Long-wave infrared multi-wavelength optical source for standoff detection of chemical warfare agents," *Appl. Opt.* **59**, 11156-11166 (2020)

¹⁵ **N. Cézard** and J-M. Melkonian, "Long-wave infrared multi-wavelength IPDA lidar for standoff detection of chemical warfare agents: theoretical study," *Appl. Opt.* **59**, 11167-11179 (2020)

risque constitue donc un enjeu de sécurité tout à fait majeur. L'étude de recherche d'une solution lidar m'a alors été confiée. Néanmoins, je me suis rapidement aperçu que l'hydrogène moléculaire (H_2), en tant que molécule diatomique homonucléaire (i.e. constituée de deux atomes identiques), ne pouvait être efficacement détecté qu'en spectroscopie de diffusion Raman.

Je me suis donc intéressé à la diffusion Raman et à la spectroscopie rovibrationnelle du même nom. J'avais déjà rencontré la diffusion Raman lors de mes recherches sur les lidars Rayleigh, mais c'était dans ce domaine un phénomène d'ordre deux, d'intensité négligeable. Cette fois, pour mesurer une concentration d'hydrogène dans l'atmosphère, il allait falloir détecter et quantifier ce signal Raman extrêmement faible. J'ai proposé pour cela, à l'issue d'une première phase d'étude, un concept de Lidar Raman dans l'UV (pour exacerber l'intensité de diffusion qui, comme la diffusion Rayleigh, évolue en λ^{-4}), muni d'une chaîne de détection très sensible à comptage de photons. J'ai également développé un modèle prédictif des performances de mesure atteignables, et mis en évidence le risque d'interférence entre les signatures Raman de l'hydrogène et de la vapeur d'eau. Pour « dé-mélanger » les signatures, j'ai alors proposé de mesurer les deux espèces en même temps à l'aide d'un lidar multi-voies, mesurant simultanément les signaux de diffusion des molécules H_2 , H_2O , et N_2 (ce dernier, comme référence radiométrique).

Cette proposition a été retenue et a permis d'initier le premier accord de collaboration entre l'Andra et l'Onera. De 2013 à 2017, j'ai ainsi piloté le projet **CALISTO** (Caractérisation par Lidar de Cellules de Stockage) et encadré les travaux de thèse **d'Anasthase Limery**¹⁶ (dirigé par Alain Hauchecorne, LATMOS). Ces travaux ont permis tout d'abord de rassembler les données bibliographiques (très éparses) nécessaires au calcul des spectres rotationnels et ro-vibrationnels de section efficace Raman des molécules N_2 , O_2 , et surtout H_2 et H_2O . Ils ont ensuite permis de mettre au point un modèle *end-to-end* de lidar Raman multi-voies, d'anticiper les performances d'une variété de dimensionnements possibles, et de sélectionner un concept technique détaillé pour mener le développement expérimental. Cette étape m'a permis d'acquérir, tout en accompagnant le doctorant, de nouvelles connaissances en matières d'optiques et composants UV (filtres spectraux, détecteurs à comptage de photon...). Des méthodes spécifiques de traitement de signal ont également été développées, basées sur des techniques de seuillage et comptage de signaux discrets (chaque photon détecté générant une impulsion de signal). In fine, le démonstrateur lidar réalisé a montré des performances de détection de H_2 et H_2O tout à fait convaincantes¹⁷, et le projet CALISTO a été un succès. A notre connaissance, il s'agissait de la première démonstration d'un lidar capable de quantifier simultanément la concentration d'hydrogène et de vapeur d'eau sur plusieurs centaines de mètres et à très haute résolution spatiale (1 mètre seulement).

Suite à ce projet et à cette thèse, l'Andra a souhaité poursuivre le développement du démonstrateur. J'ai alors co-établi avec l'Andra un programme de recherche, qui a permis au projet **CALISTO-2** de voir le jour en Juillet 2020. D'une durée de 3 ans, ce projet va permettre d'améliorer techniquement le démonstrateur lidar, mais surtout de l'enrichir de nouvelles fonctionnalités, en particulier la mesure de température et de dioxygène. L'objectif d'ici fin 2023 est de parvenir à un

¹⁶ A. Liméry, « Étude et réalisation d'un lidar Raman pour la détection d'hydrogène et de vapeur d'eau dans une alvéole de stockage de colis radioactifs », Thèse de doctorat de l'université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, soutenue le 27 mars 2018.

¹⁷ A. Liméry, **N. Cézard**, D. Fleury, D. Goular, C. Planchat, J. Bertrand, and A. Hauchecorne, "Raman lidar for hydrogen gas concentration monitoring and future radioactive waste management," *Opt. Expr.* **25**, 30636-30641 (2017)

système multifonctions (H_2 , H_2O , O_2 , Température) et de le tester dans l'environnement souterrain caractéristique de l'application visée par l'Andra.

Outre la satisfaction d'avoir suscité la réalisation d'un lidar Raman innovant et apportant une solution potentielle à un problème concret, l'expérience gagnée sur les lidars Raman m'a également permis d'élargir ma culture sur les différentes solutions lidars qui peuvent être apportées à un problème de télédétection de gaz en général. Cette expérience m'a en effet permis de mieux discerner les avantages, inconvénients, et complémentarités des techniques lidar DIAL et Raman.

5. Lidars fibrés bi-fonction DIAL/Doppler

Les lidars DIAL à large bande spectrale que nous avons évoqués plus haut (Supercontinuum, NesCOPO très accordables) sont des systèmes bien appropriés si l'on ne connaît pas les molécules en présence, ou si l'on souhaite mesurer un grand nombre d'entre elles. Mais pour des objectifs plus ciblés, visant par exemple une seule espèce chimique, il est plus pertinent de réaliser un lidar DIAL à bande spectrale étroite, c'est-à-dire concentrant toute la puissance optique de la source laser au niveau d'une seule raie d'absorption bien choisie.

Parmi les différentes solutions techniques pour réaliser un lidar DIAL en bande étroite, mes recherches se sont concentrées essentiellement sur les systèmes fibrés, en bande SWIR (1.5-2 μ m). Ce choix visait d'une part à bénéficier des innovations techniques réalisées au sein du Pôle Laser de mon unité, sur les amplificateurs fibrés. D'autre part, les lidars fibrés offrent beaucoup de souplesse de conception, en particulier sur les profils temporels et spectraux des impulsions laser émises. Ce sont là des degrés de liberté supplémentaires, inaccessibles à d'autres technologies, et qu'il est possible d'exploiter pour proposer des systèmes d'observation novateurs. Par ailleurs, les lidars fibrés permettent aussi de séparer aisément, dans l'architecture laser, les étages d'injection et d'amplification, notamment grâce aux architectures dite MOPA (Master Oscillator Power Amplifier, cf. chapitre 3.2). Cette capacité les rend ainsi particulièrement adaptés à la technique de détection dite « cohérente » du signal diffusé par les aérosols atmosphériques. Or la détection cohérente donne accès à la phase électromagnétique du signal lidar, à partir de laquelle on peut déduire la vitesse du vent (principe du Lidar Doppler). En utilisant une détection cohérente, il est donc possible d'envisager des lidars fibrés bi-fonction DIAL-Doppler, permettant de mesurer simultanément la concentration d'un gaz et sa vitesse. A partir de 2013, l'un de mes axes de recherches a ainsi consisté à explorer ce potentiel bi-fonction tout à fait unique des lidars fibrés. Le projet NAOMI (2014-2019) a fourni le cadre idéal à ces travaux.

Le **projet NAOMI** (New Advanced Observation Methods Integration) est un Partenariat Recherche-Industrie (PRI) mis en place entre l'Onera et la société Total, qui s'est déroulé sur 5 ans, de 2014 à 2019. Dès 2013, l'Onera a été sollicité par Total dans le but de développer de nouveaux moyens de télédétection d'hydrocarbures, notamment sous forme gazeuse. Le but était de pouvoir mesurer, à distance de sécurité, la concentration et le débit de fuites de gaz (en priorité le méthane CH_4) au voisinage d'installations industrielles accidentées. Ce besoin faisait suite à l'accident d'Elgin, du nom de cette plate-forme pétrolière en mer du Nord qui dut être évacuée en 2012 suite à une fuite massive de méthane qui dura plusieurs semaines. Suite à cette sollicitation, j'ai proposé d'étudier un concept de lidar fibré cohérent bi-fonction DIAL et Doppler, pour la télémessure simultanée de la concentration de méthane et de la vitesse de vent. Un tel système aurait en effet le potentiel pour mesurer de manière autonome le débit d'une fuite (le débit étant le produit de la

concentration de gaz et de la vitesse du vent normale à la surface de mesure). Néanmoins le défi scientifique était grand. Il fallait d'une part réaliser une source laser fibrée, émettant à une longueur d'onde d'absorption suffisamment sensible du méthane, et possédant toutes les qualités pour réaliser un lidar cohérent DIAL-Doppler (il n'existe toujours pas aujourd'hui de source commerciale de ce type). D'autre part, il fallait ensuite réaliser un prototype de lidar fibré bi-fonction suffisamment robuste et performant pour pouvoir faire des tests de détection de fuites de méthane sur un terrain industriel. Le tout en cinq ans.

L'ensemble de ce projet a été retenu par Total, et le premier défi, celui de la source laser, a été relevé grâce au brillant travail de thèse de Philippe Benoit (2013-2017), encadré par Guillaume Canat (alors responsable du Pôle Laser de l'unité). Pour atteindre la longueur d'onde d'absorption du méthane la plus adaptée à la technologie fibré (1.65 μm), le doctorant et ses encadrants ont développé un amplificateur Raman impulsif très innovant, et parfaitement adapté au besoin lidar. En parallèle, je réalisais pour ma part la pré-étude de faisabilité du système lidar (2015-2016). En enrichissant le code LIDIASOL de nouveaux modules propres aux systèmes cohérents, et en prenant en compte les techniques d'estimation spectrales usuellement mises en œuvre dans ces systèmes, j'ai établi le pré-dimensionnement du lidar et calculé ses performances prévisionnelles. Ce travail approfondi m'a permis de compléter encore mes connaissances sur les lidars en général, en me confrontant pour la première fois à un système lidar cohérent.

L'étude détaillée et la réalisation du lidar bi-fonction ont ensuite fait l'objet de la thèse de **Simon le Méhauté**¹⁸ (2016-2019), que j'ai encadré à l'Onera (directeur Hervé Delbarre, LPCA Dunkerque). Les travaux menés avec le doctorant ont permis de développer le lidar, baptisé **VEGA** (Vent & Gaz), ainsi qu'un code *end-to-end* de modélisation instrumentale, et des algorithmes de traitement adaptés aux signaux de détection cohérente¹⁹. En 2017, j'ai également co-encadré le travail de P. Benoit pendant un CDD d'un an (à la suite de sa thèse) pour procéder à l'intégration de l'amplificateur dans le lidar VEGA. Les compétences en électronique, mécanique, et informatique de plusieurs ingénieurs de mon unité de recherche ont également été sollicitées pour finaliser le démonstrateur. A travers le projet NAOMI, c'est vraiment un travail collectif que j'ai eu le plaisir de piloter. Nous sommes ainsi parvenus en 5 ans à réaliser le démonstrateur lidar VEGA, et en 2018, j'ai pu diriger les tests du lidar lors de la campagne expérimentale de fin de projet, sur le terrain industriel de Lacq (Pyrénées-Atlantiques). Les résultats se sont révélés d'une grande richesse, avec de nombreuses détections réussies de panaches de méthane, et des mesures de vent simultanées. Réaliser de telles mesures avec un lidar fibré constituait une première mondiale, et le projet NAOMI s'est ainsi conclu par un vrai succès pour le lidar VEGA.

Fin 2019, j'ai piloté une seconde campagne de mesure du lidar VEGA sur le terrain de Lacq, pour tester les capacités de détection du prototype sur de plus faibles débits de fuites, et dans des conditions plus difficiles. Grâce à plusieurs améliorations apportées au système, nous avons pu à cette occasion démontrer le potentiel du lidar VEGA pour la mesure autonome de débits de fuite (en fusionnant pour la première fois les données vent et gaz) et pour la détection et quantification

¹⁸ S. Le Méhauté, « Etude et réalisation d'un Lidar DIAL cohérent fibré pour la mesure simultanée de la vitesse du vent et de la concentration de méthane », Thèse de doctorat de l'Université du Littoral Côte d'Opale, soutenue le 19 Juin 2020.

¹⁹ S. Le Méhauté, P. Benoit, **N. Cézard**, D. Goular, C. Planchat, M. Valla, A. Dolfi-Bouteyre, X. Watremez, and H. Delbarre "All-fibered coherent-differential absorption lidar at 1.645 μm for simultaneous methane and wind-speed measurements", Proc. SPIE 10791, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XIV, 1079103 (2018)

d'émissions fugitives de faibles niveaux²⁰. J'ai également effectué en 2020 une étude spécifique afin de qualifier les performances du lidar VEGA pour la mesure du méthane ambiant, en modes IP-DIAL et RR-DIAL, en fonction du temps de mesure²¹. Cette étude permet aujourd'hui d'envisager l'utilisation de VEGA pour d'autres applications que celle initialement proposée par Total. En 2020, le développement et l'exploitation du lidar VEGA se poursuivent dans le cadre du PRF TELEMAR (Télé-détection par Mesures Actives, 2020-2023, Projet de Recherche Fédérateur Onera).

Le projet NAOMI et le lidar VEGA ont représenté pour moi une nouvelle étape marquante de mon parcours. D'abord parce que ce projet a permis de faire la synthèse entre l'expérience que j'avais progressivement acquise en matière de lidars DIAL, d'une part, et l'expérience collective de mon unité de recherche en matière de lidars Doppler cohérents et d'amplificateurs fibrés, d'autre part. Ensuite parce que ce fut une expérience de chef de projet extrêmement enrichissante et formatrice. Au cours des 6 années de développement de VEGA, le projet a mobilisé les compétences de 8 ingénieurs et 2 doctorants, et c'est cette mise en commun des savoir-faire qui a permis, assurément, de développer avec succès le prototype dans le temps imparti. Enfin parce que la réussite finale a été à la hauteur des risques pris au départ. Chacune des deux thèses réalisées avaient des chances de rencontrer des obstacles rédhibitoires, mais finalement, et même si des limites techniques ont bien été rencontrées sur certains points, il a été possible de développer un prototype robuste, performant, et très innovant. In fine, avoir été responsable de ce projet a été pour moi un grand plaisir, et l'amener à sa réussite collective, une grande fierté.

En 2019, j'ai également lancé l'étude et développement d'un second lidar DIAL/Doppler fibré, à 2 μm , pour la télé-détection du CO_2 . Le système, nommé HELENA (Hybrid Emitter Lidar Experiment for Environmental Applications), est développé dans le cadre de la thèse de **Julien Lahyani** (2019-2021, directeur de thèse Jean-Michel Hartmann, LMD), que je co-encadre avec Julien Le Gouët à l'Onera et Fabien Gibert au LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique, Palaiseau). Le lidar HELENA présente un intérêt à la fois en tant que système au sol, pour envisager de futures mesures de flux de CO_2 au niveau de points sources industriels ou à plus large échelle, et en tant que brique technologique pour un futur lidar spatial (cf. section suivante). Tous les moyens de modélisation et de traitement de signal développés pour le lidar VEGA servent aujourd'hui de base pour évaluer les performances prévisionnelles et traiter les mesures effectuées par le lidar HELENA.

6. Lidars pour la détection de gaz depuis l'espace

Quantifier depuis l'espace la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, est un enjeu qui revêt aujourd'hui une importance majeure dans le contexte de réchauffement climatique que nous connaissons à l'échelle du globe. Plusieurs agences spatiales (NASA, JAXA, ESA, CNES...) ont relevé l'intérêt, dans ce domaine, de développer des sondeurs actifs de type lidar. La distance entre le satellite et l'atmosphère est néanmoins si grande (400-500 km) qu'il est très difficile de proposer des concepts réalistes permettant une observation résolue de l'atmosphère (RR-DIAL ou Raman). Aussi, la quasi-totalité des concepts lidar étudiés pour la détection de gaz depuis l'espace ont jusqu'à présent porté sur des lidars IP-DIAL/télé-mètres, mesurant simultanément la quantité intégrée de gaz

²⁰ **N. Cézard**, J. Le Gouët, M. Valla, A. Dolfi-Bouteyre, C. Juery, O. Duclaux, "VEGA: A CH₄/Wind Coherent Fiber Lidar at 1645 nm for Methane Remote Sensing with Industrial and Environmental Applications", in Proceedings of the European Lidar Conference – ELC (2020)

²¹ **N. Cézard**, S. Le Méhauté, J. Le Gouët, M. Valla, D. Goular, D. Fleury, C. Planchat and A. Dolfi-Bouteyre, "Performance assessment of a coherent DIAL-Doppler fiber lidar at 1645 nm for remote sensing of methane and wind," *Opt. Expr.* 28, no. 15, pp. 22345-22357 (2020).

entre le satellite et la surface terrestre (ou maritime), et la distance de la surface diffusante (souvent notée SSE pour *Scattering Surface Elevation*). Mais même pour des systèmes IP-DIAL, concevoir un lidar spatial est une tâche de si haute complexité qu'aucun n'a encore été placé en orbite. Le premier devrait être le satellite européen MERLIN pour la mesure du CH₄, dont le lancement est prévu à l'horizon 2027. Mes recherches en matière de lidar spatial pour la détection de gaz ont ainsi visé, et visent encore, à contribuer à l'effort mondial pour résoudre les difficultés opposées par ce véritable défi technologique, ou pour proposer et tester des concepts de mesure alternatifs pour de futures générations de satellites.

C'est à travers le projet ESA HEPILAS (2010-2013) que j'ai d'abord été confronté à cette thématique. Ce projet visait à développer un amplificateur laser fibré à 1579 nm pour la détection du CO₂ depuis l'espace. Je n'ai pas pris part directement à ce projet, qui concernait davantage le Pôle Laser, néanmoins le cahier des charges était si contraint, et si difficile à tenir, que j'ai été chargé en parallèle de l'analyser en détails, afin de formuler d'éventuelles propositions pour le dé-contraindre.

Pour ce faire j'ai développé un code de modélisation de lidar spatial IP-DIAL/SSE, afin de bien comprendre les tenants et aboutissants de cette double mesure. Reprenant en partie les éléments de LIDIASOL, l'outil développé, nommé **LIDIASAT**, intègre entre autres la structuration verticale de l'atmosphère et les variations afférentes de pression, température, et concentration des gaz. Il permet ainsi, pour un lidar spatial paramétrable, d'établir les précisions d'estimation prévisionnelles des produits IP-DIAL et SSE recherchés. Ce code a été validé par comparaison avec des résultats de modélisation publiés dans la littérature. Dès 2012, il est également ressorti de cette analyse un concept d'émission original, visant à lever certaines contraintes du cahier des charges et à faciliter la réalisation d'un futur lidar fibré pour l'observation du CO₂ depuis l'espace. Ce concept a « patienté » quelques années, avant de finalement pouvoir faire l'objet d'études en RT CNES à partir de 2018 (dépôt de brevet en cours).

J'ai également effectué, suite au projet Hepilas, un travail de fond sur les techniques de **stabilisation spectrale** d'émetteur laser, une exigence cruciale sur les systèmes IP-DIAL/SSE pour atteindre la précision d'observation requise (surtout pour le CO₂). Cela m'a permis d'assurer la coordination scientifique de la proposition ESA **AFRODIT** (All-fiber Frequency Reference for DIAL Testbed, 2012), qui visait à atteindre de hautes performances de stabilité spectrale d'un laser à 2 μm, à l'aide de fibres creuses et de techniques de modulation électro-optique de fréquence. La proposition n'a pas été retenue (en dépit d'une excellente note technique), mais ce travail conséquent a été extrêmement formateur. Il m'a notamment permis de me former aux techniques de modulation électro-optique de la lumière, puis de développer, et plus tard de transmettre, la compétence requise pour stabiliser en fréquence les lidars VEGA et HELENA.

En 2019, j'ai mis en place, comme exposé dans la section précédente, la thèse de **Julien Lahyani** en collaboration avec le laboratoire LMD de Polytechnique et le CNES. Cette thèse vise au développement d'une source laser dite « hybride » à 2 μm et d'un démonstrateur lidar pour la télédétection du CO₂. Il est connu en effet que depuis l'espace, la bande 2 μm est la plus adaptée pour maximiser la précision de mesure du CO₂ dans la troposphère, où ont lieu tous les échanges avec la surface continentale ou océanique (puits et sources). L'idée de ce lidar à source hybride, nommé **HELENA** (Hybrid Emitter Lidar Experiment for Environmental Applications), est de tenter de joindre les avantages des lasers fibrés (souplesse des formes temporelles et spectrales, robustesse, efficacité électrique) et de l'amplification cristalline (puissance optique), afin de réaliser une source laser qui offre un meilleur compromis « puissance x robustesse » que les sources « tout solide »

(manque de robustesse) ou « tout fibré » (manque de puissance). Ce type d'architecture pourrait être une clé pour les lidars spatiaux de demain. La première phase de développement du lidar HELENA (partie tout fibrée) est aujourd'hui terminée²², et vient de donner lieu à des premiers essais de mesure simultanée de CO₂ et de vent par détection cohérente (à l'instar du lidar VEGA). Cette phase sera suivie par les travaux d'amplification cristalline en 2021.

Une autre piste d'innovation, développée au DOTA/Toulouse par Xavier Orlik et François Lemaitre, exploite également des techniques de modulation électro-optique pour sculpter spectralement des impulsions laser en « **mini-peignes** » de fréquences. Appliqué à la spectroscopie, ce concept permet de réaliser simultanément la mesure IP-DIAL du gaz cible en différents points spectraux, et ainsi éviter les biais de déplacement du satellite et les difficultés de stabilisation spectrale. Ce concept a fait l'objet de plusieurs R&T CNES depuis le début des années 2010, auxquelles je n'ai contribué qu'à partir de 2018. Cette année-là, j'ai co-breveté avec François Lemaitre et Philippe Hébert (CNES) une technique de dé-bruitage originale applicable à la spectroscopie à mini-peignes²³. En 2019, le CNES a initié suite à cela une étude en phase 0 nommée SCALE (Short-Comb Atmospheric Lidar Experiment) afin d'explorer plus avant le potentiel de cette technique pour le sondage atmosphérique depuis l'espace, et a conclu que la solution co-brevetée était prometteuse. Le sujet est ainsi amené à poursuivre son développement au CNES et à l'Onera dans les prochaines années. En particulier, j'ai lancé sur ce sujet la thèse de **William Patino**, laquelle a démarré en Novembre 2020 au DOTA/Toulouse (que j'ai rejoint), et pour laquelle j'assume pour la première fois le rôle de Directeur de thèse (par voie de dérogation temporaire de l'Ecole Doctorale).

Enfin, depuis 2018 et à l'invitation du CNES, j'ai rejoint le « Working Group » qui accompagne le développement du satellite MERLIN. Ce satellite devrait être lancé en 2025 et sera le premier lidar en orbite pour la détection de gaz atmosphérique. Il est dédié à l'observation du méthane à 1.64µm par la technique IP-DIAL/SSE, et sur la base d'une source laser paramétrique de type OPO issue des travaux du DLR allemand. Cette prouesse technique constituera une première mondiale, et est très attendue par la communauté scientifique. En 2020, en représentant l'ONERA pour la **CDR (Critical Design Review) du lidar MERLIN**, j'ai également pu apporter une contribution supplémentaire à cet effort européen de premier plan. Avec le lancement de MERLIN, toutes les recherches exposées ci-dessus ne deviennent pas vaines ni caduques pour autant, bien au contraire. D'une part, la durée de vie programmée du satellite est limitée à 3 ans (pour 15 ans de développement), ce qui illustre bien la complexité des technologies actuelles et la nécessité de rechercher des solutions nouvelles pour « l'après-MERLIN ». D'autre part MERLIN reste dédié uniquement à l'observation du méthane, tandis que pour le dioxyde de carbone, plus difficile à caractériser depuis l'espace, la bonne solution technique reste à identifier. Tous les travaux menés sur les lidars spatiaux pour la détection des gaz à effet de serre s'inscrivent donc dans une perspective de long terme, et les recherches menées à l'Onera dans ce domaine y trouvent naturellement leur place.

²² J. Lahyani, J. Le Gouët, F. Gibert, and **N. Cézard**, "2.05-µm all-fiber laser source designed for CO₂ and wind coherent lidar measurements", submitted to Applied Optics (Déc. 2020)

²³ P.Hébert, F.Lemaitre, **N. Cézard**, « Lidar for heterodyne detection by a local oscillator and a dual probing beam, at one or several frequency(ies), and lidar detection method by dual heterodyning detection », US20190383940A1, (pending patent)

7. Et maintenant à Toulouse...

Fin 2019, j'ai rejoint, pour des motifs familiaux, la région Occitanie, et demandé mon transfert au DOTA/Toulouse. J'ai ainsi rejoint l'équipe IODI (Interaction Ondes-matières et systèmes laser pour la Détection directe et l'Imagerie), laquelle développe également plusieurs types de systèmes lidars et d'optique active : lidars aérosols, bathymétriques, imageurs actifs à supercontinuum, télémètres 3D, et mini-peignes de fréquence pour la spectroscopie des gaz atmosphériques.

Depuis 2020, a démarré pour moi une phase de transition, qui se manifeste par un désengagement progressif sur certaines actions de recherche (par exemple le projet CALISTO-2, désormais confié à de nouveaux collègues de Palaiseau, et que j'accompagne d'un peu plus loin) et à une montée en puissance sur de nouveaux sujets, au premier rang desquels les lidars gaz à mini-peigne de fréquence, sujet en parfaite adéquation avec mes expériences passées. Je demeure également fortement engagé dans le pilotage général des activités de développements des lidars gaz au DOTA, (par exemple dans le cadre du PRF TELEMAT déjà mentionné plus haut), ainsi que dans les activités d'exploitation des lidars VEGA et HELENA, très prometteurs pour l'avenir (en particulier en ce qui concerne la fusion des données vent et gaz pour obtenir de nouveaux produits de mesure). Mes recherches sur les futurs lidars spatiaux pour la détection des gaz à effet de serre, ainsi que l'analyse de leur complémentarité avec les nouvelles technologies de sondeurs passifs, sont aussi amenées à se développer davantage, la proximité avec le CNES pouvant également faciliter et enrichir de futurs travaux dans ce domaine. Tout ceci n'exclut pas, bien entendu, de futures évolutions ou participations à des recherches sur des sujets plus endogènes dans ma nouvelle unité, sur les lidars aérosols par exemple, pour lesquels je dispose déjà de bases consistantes. Mes perspectives et projets de recherche pour le futur seront développés dans le 5^{ème} et dernier chapitre de ce mémoire.

Chapitre 3 – Outils et Méthodes

Dans ce chapitre, je reviens maintenant sur les trois principaux domaines scientifiques et techniques (les trois « fils rouges » présentés en introduction) qu'il m'a été nécessaire de cultiver particulièrement, pour mener à bien mes travaux de recherche. Ne pouvant toutefois pas, dans le cadre de ce mémoire, aborder chacun de ces domaines de manière exhaustive, j'ai choisi de sélectionner pour chacun d'entre eux un nombre restreint de sujets qui ont été plus particulièrement au cœur de mes activités.

Le premier domaine est celui de la physique et de l'optique atmosphérique, qui se trouve bien entendu au cœur de mes travaux. Dans ce mémoire, je reviendrai en particulier sur les propriétés de diffusion et d'absorption des molécules de gaz atmosphériques et des aérosols. Diffusion et absorption sont en effet les deux principaux processus qui permettent de recueillir des informations physico-chimiques sur l'atmosphère par lidar. Sans m'étendre sur les théories bien connues qui décrivent ces phénomènes (j'en rappellerai simplement les éléments clés), je mettrai davantage l'accent sur les différents outils numériques que j'ai développé, ou co-développé, afin d'anticiper les propriétés de l'atmosphère en diffusion (Rayleigh, Mie, Raman) et en absorption, dans une vaste gamme de scénarios d'observation.

Le second domaine est celui des technologies optroniques, vaste domaine au sein duquel je développerai plus particulièrement le sujet des sources laser infrarouges (sources fibrées et sources à cristaux non linéaires), qui ont été des éléments clés de mes travaux en spectroscopie d'absorption. En tant qu'émetteur, la source laser est naturellement l'un des sous-systèmes les plus critiques dans un système lidar. C'est d'autant plus vrai dans le domaine de la spectroscopie d'absorption infrarouge, qui exige de la source qu'elle corresponde en longueur d'onde avec les transitions observées. La source laser devient alors souvent, en soi, un objet de recherche, et donc aussi d'innovation. Ayant eu la chance de travailler au quotidien aux côtés de spécialistes des sources laser, j'ai pu bénéficier d'outils particulièrement innovants pour la réalisation de nouveaux systèmes lidars à absorption différentielle. Je reviendrai donc sur les principes, les avantages et aussi sur les limites de ces technologies.

Le troisième domaine ouvrira les portes de la théorie du signal et l'information, dont j'ai utilisés plusieurs outils particulièrement intéressants au cours de mes travaux, pour des problématiques d'estimation de paramètres atmosphériques, mais aussi de détection et d'identification de molécules de gaz. Ces outils m'ont permis à la fois de calculer les performances prévisionnelles d'une grande variété de systèmes lidars, chargés de différentes missions de mesures, mais également de mettre en œuvre des techniques performantes de traitement des signaux expérimentaux. Je présenterai en particulier les méthodes liées à l'utilisation de la fonction de vraisemblance du signal, utile tant pour le calcul des performances prévisionnelles d'un système lidar que pour des opérations d'estimation, de détection, ou d'identification.

NB : Sauf mention contraire mentionnée dans leurs légendes, les figures présentées dans la suite de ce mémoire sont des créations personnelles.

NB : Les références indiquées en bleu sont regroupées par section.

1. Outils de modélisation des propriétés de diffusion et absorption atmosphérique

L'absorption et la diffusion de la lumière, par les molécules et aérosols atmosphériques, sont les deux principaux types d'interactions lumière-matière qui sont à l'œuvre dans un système lidar. Ils peuvent donner accès, par des méthodes de mesure variées, à de nombreuses propriétés atmosphériques. Dans cette section, je reviendrai sur les principes physiques de la diffusion Rayleigh-Cabannes, de la diffusion de Mie, de la diffusion Raman, et de la spectroscopie d'absorption des molécules. Tous ces phénomènes étant toutefois bien connus, et parfaitement décrits dans un grand nombre d'ouvrages, je m'efforcerai surtout d'illustrer ici les capacités des différents outils numériques que nous avons développés, pour pouvoir calculer les coefficients d'absorption et de rétrodiffusion de l'atmosphère, dans un grand nombre de situations d'observation.

a. Diffusion de Rayleigh (Cabannes) par les molécules

Le phénomène de diffusion moléculaire résulte de la mise en oscillation, par le champ laser incident, des dipôles électriques que constituent les molécules, leurs centres de charge positifs et négatifs répondant en sens contraire au champ électrique incident. Or un dipôle oscillant agit comme une antenne, et devient source d'énergie électromagnétique : c'est ce qu'on appelle la diffusion.

La diffusion de la lumière par les molécules atmosphériques est connue sous le nom de **diffusion Rayleigh**. Historiquement, cette appellation recouvrait toutefois deux sous-phénomènes :

- la diffusion Rayleigh-Cabannes, qui est un phénomène de diffusion élastique (i.e. sans changement de fréquence hors effet Doppler) lié à l'interaction de la lumière avec la polarisabilité statique des molécules atmosphériques ;
- la diffusion Raman, qui est un phénomène de diffusion inélastique (i.e. avec changement de fréquence) lié à l'interaction de la lumière avec la composante dynamique de la polarisabilité des molécules au cours de leurs mouvements propres de vibrations et de rotations.

Néanmoins, on distingue couramment aujourd'hui la diffusion Raman comme un phénomène distinct de la diffusion Rayleigh, de sorte que cette dernière ne désigne souvent plus, dans la littérature, que la diffusion Rayleigh-Cabannes. Nous ferons de même dans ce mémoire, et emploierons volontiers le raccourci répandu de diffusion Rayleigh pour désigner la composante élastique seulement.

La diffusion Rayleigh (Cabannes) est un phénomène d'intensité proportionnelle à λ^{-4} , ce qui implique qu'elle est beaucoup plus facilement exploitable dans le domaine UV que dans le domaine IR. En tant que processus élastique, elle ne peut fournir aucune information sur la nature chimique des molécules atmosphériques. En revanche, elle peut être exploitée pour fournir des informations sur l'état thermodynamique de l'atmosphère. En effet, elle reflète, par effet Doppler, la statistique de vitesse de la collection de molécules (dipôles) se trouvant dans le volume d'air éclairé par le laser. La vitesse moyenne de cette collection est égale à celle du vent, tandis que sa statistique reflète à la fois les mouvements individuels désordonnés des molécules (régime thermique) et les mouvements collectifs cohérents et spontanés, permis par la viscosité de l'air, qui sont des ondes acoustiques. La diffusion Rayleigh (Cabannes) est souvent modélisée au 1^{er} ordre en tenant compte uniquement du régime thermique, ce qui se traduit par un spectre de diffusion purement gaussien. Dans ce cadre simplifié, on peut envisager de déduire la vitesse du vent, la température, et la densité de l'air à partir de mesures du barycentre, de la largeur, et de l'intégrale du spectre de diffusion Rayleigh. Ce

principe est illustré en Figure 12, et est à l'origine de mes travaux sur la mesure des « paramètres air » par lidar Rayleigh (cf. chapitre 4.1).

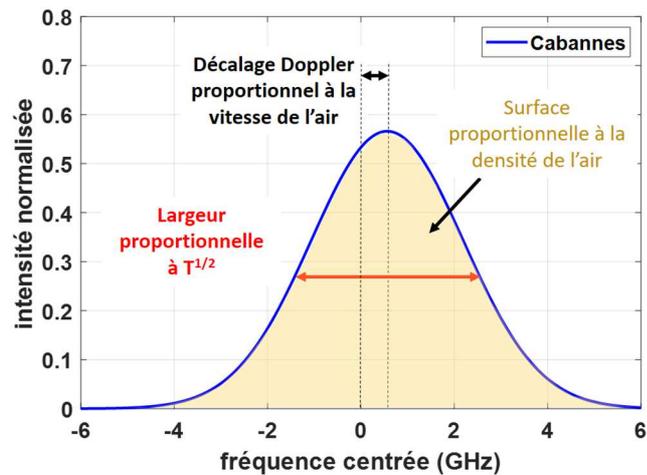


Figure 12 – Spectre de diffusion Rayleigh (Cabannes) pour une excitation laser à 355 nm ramenée ici à l'origine de l'axe des fréquences. Le décalage Doppler n'étant que de 5.6 MHz par m/s, il est ici représenté pour 100 m/s de vent. La largeur à 1/e est de 4.6 GHz à 296 K (soit l'équivalent de 817 m/s !), et est proportionnelle à la racine carrée de la température. L'intégrale du spectre de diffusion est proportionnelle à la concentration de molécules diffusantes et donc à la densité de l'air.

En réalité, le modèle gaussien du spectre de diffusion Rayleigh n'est qu'une représentation idéale du spectre de diffusion élastique renvoyé par l'atmosphère. Il est important, pour concevoir un lidar Rayleigh de prendre en compte deux sources potentielles de perturbations.

La première correspond à la diffusion de Mie, qui s'opère à partir des aérosols contenus dans l'atmosphère. Certes, il ne s'agit plus de diffusion Rayleigh, mais comme le spectre de diffusion Mie se superpose au spectre de diffusion Rayleigh, il constitue pour ce dernier une source de perturbation spectrale très significative. La Figure 13 illustre la perturbation typique apportée par la composante de Mie (sur laquelle on reviendra plus loin) au spectre de diffusion élastique, que l'on nomme dans ce cas spectre de diffusion *Rayleigh-Mie*. On appelle rapport de diffusion la quantité sans unité $\alpha=1+\beta_{\text{Mie}}/\beta_{\text{Rayleigh}}$. De par la variabilité naturelle des aérosols, c'est une quantité difficile à anticiper dans un scénario observationnel, mais elle peut avoir un impact spectral important, même pour des valeurs proches de l'unité (cas d'une diffusion purement moléculaire). Sur la Figure 13 par exemple, le rapport de diffusion n'est que de 1.1.

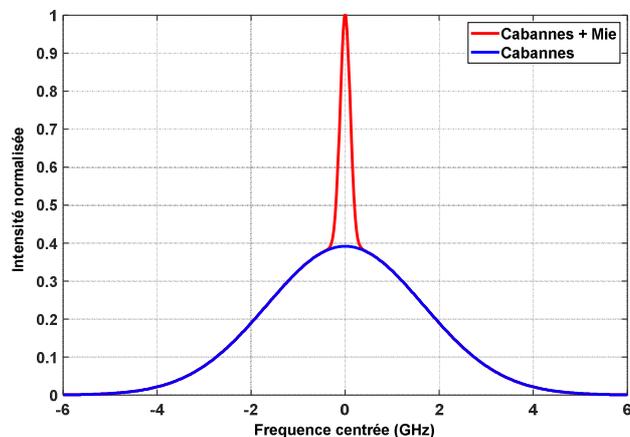


Figure 13 - Spectre de diffusion Rayleigh-Mie en régime thermique, pour une excitation laser à 355 nm, en l'absence (bleu, $\alpha=1$) et en présence (rouge, $\alpha=1.1$) d'une composante de diffusion Mie. Le spectre est représenté centré en fréquence.

La seconde source de perturbation spectrale correspond à la diffusion Brillouin spontanée, issue des ondes acoustiques se développant dans le milieu atmosphérique, par le biais de sa viscosité. On parle alors de diffusion *Rayleigh-Brillouin*. A la différence de la perturbation liée à la diffusion Mie, d'amplitude hautement variable mais spectralement facile à modéliser, l'effet Rayleigh-Brillouin est d'amplitude très répétable, mais spectralement très complexe à modéliser. Il a d'ailleurs constitué un domaine de recherche actif au début des années 2010 (Witschas et al. 2010), notamment dans le cadre de la modélisation du lidar spatial Aeolus (lidar Rayleigh mesurant les vents troposphériques depuis l'espace). Pour modéliser le spectre de diffusion Rayleigh-Brillouin, j'ai pour ma part utilisé le modèle dit « Tenti-S6 » (Tenti et al. 1974), qui était en 2005 reconnu comme étant le plus précis en la matière (code de modélisation aimablement transmis par A. Dabas (CNRM), d'après un code original développé à la NASA par R. Seasholtz). La Figure 14 montre plusieurs exemples de spectres Rayleigh-Brillouin, en fonction du « paramètre Y » défini par $Y=\lambda/(4\pi d)$, où λ est la longueur d'onde du laser, et d le libre parcours moyen des molécules dans l'air. Un lidar opérant dans les conditions normales de température et pression présente par exemple un coefficient $Y=0.4$ à 355 nm. Bien que la perturbation apportée au modèle gaussien semble faible, les travaux que j'ai menés ont montré qu'elle était suffisante pour biaiser significativement des mesures de température (cf. chapitre 4.1).

L'un des enjeux importants de mes travaux sur les lidars Rayleigh a ainsi été de proposer une méthode de mesure des paramètres de vitesse, température, et densité, mais en cherchant à évaluer (et minimiser) l'impact potentiellement délétère, sur les mesures, de composantes de diffusion Mie et Brillouin qui seraient insuffisamment bien anticipées ou modélisées.

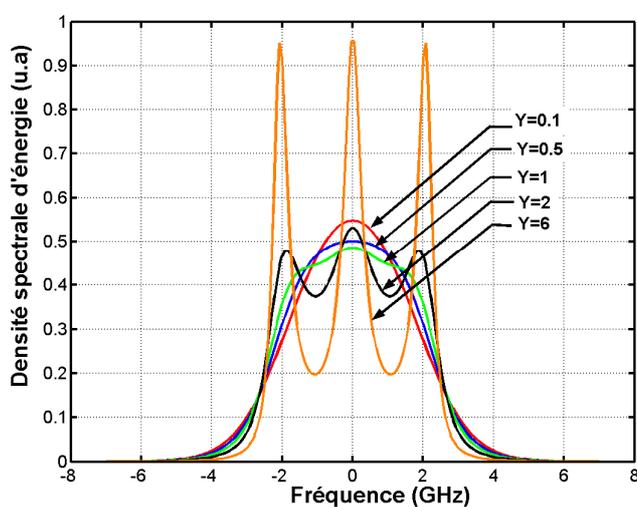


Figure 14 - Modélisation par le modèle « Tenti S6 » de spectres Rayleigh-Brillouin, en fonction du paramètre de diffusion « Y », lequel est quasiment proportionnel à $\lambda \cdot P/T$. Un lidar opérant dans les conditions normales de température et pression présente un coefficient $Y=0.4$ à 355 nm (perturbation faible), et $Y=1.7$ à 1.55 μm (perturbation significative). (Source : Cézard 2008)

b. Diffusion de Mie par les aérosols

La diffusion de Mie n'est pas seulement une source de perturbation pour les lidars Rayleigh (ou Raman, dont on parlera plus loin). Dans d'autres circonstances, elle devient extrêmement utile,

notamment pour toutes les applications lidars dans l'infrarouge. La diffusion Rayleigh est en effet négligeable dans l'IR (à cause de sa dépendance en λ^{-4}), de sorte que dans ce domaine spectral, seuls les aérosols sont à même de fournir le signal permettant des mesures lidar spatialement résolues. Il est donc très important, pour dimensionner un système lidar, d'estimer réalistement la valeur attendue du coefficient de diffusion des aérosols.

La théorie de la diffusion Mie s'applique en toute rigueur pour les particules sphériques. Bien entendu cette forme sphérique est peu répandue dans la nature (à l'exception des gouttes d'eau), mais néanmoins, elle constitue souvent une bonne approximation des aérosols réels (avec des exceptions, comme par exemple les suies ou les particules minérales, qui exigent des modèles spécifiques). C'est donc une théorie très largement utilisée. Le calcul de la diffusion Mie fait appel à un formalisme certes complexe, mais bien connu, et il existe plusieurs bibliothèques de fonctions dédiées au sujet. J'ai pour ma part utilisé celle développée par Christian Mätzler, de l'Université de Berne (Mätzler, 2002), basée sur le formalisme de Bohren & Hufmann 1983.

La diffusion de Mie est élastique (elle conserve la fréquence d'excitation, hors considération de l'effet Doppler) et, lorsque les particules sont sphériques, elle conserve également la polarisation en rétrodiffusion. Les modèles de diffusion Mie font intervenir essentiellement deux paramètres fondamentaux :

- l'indice de réfraction complexe m de la particule,
- le rapport $x=2\pi r/\lambda$, où r est le rayon de la particule et λ la longueur d'onde du laser incident.

A paramètre m donné, les fonctions développées par Mätzler permettent de calculer les sections efficaces d'extinction $\sigma_{\text{ext}}(r)$, en m^2 , et de rétrodiffusion $\sigma_{\pi}(r)$, en $\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$. Un exemple de ces courbes est donné en Figure 15 à la longueur d'onde de 355 nm et pour une particule d'indice $m=1,33$ (goutte d'eau). Les nombreux rebonds, visibles surtout en rétrodiffusion, illustrent les effets d'interférences constructives et destructives caractéristiques de la diffusion Mie.

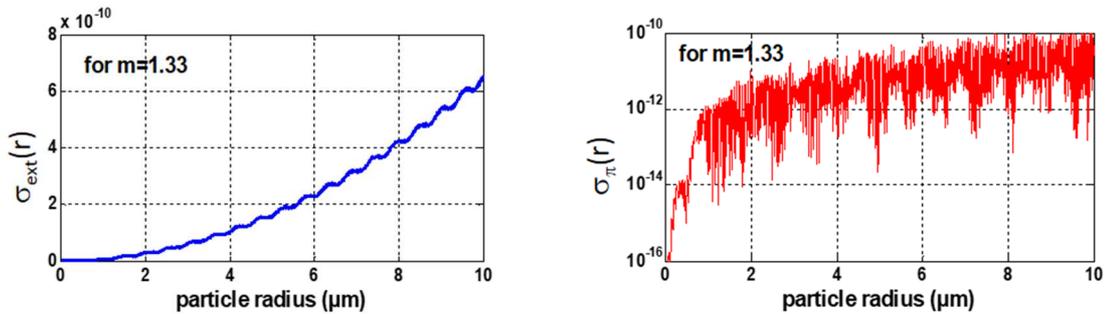


Figure 15 : Section efficace de rétrodiffusion à 355 nm en fonction du rayon des particules

Pour calculer les coefficients d'extinction et de rétrodiffusion de l'atmosphère, il suffit alors de multiplier les courbes de sections efficaces par la granulométrie des particules considérées, et d'intégrer sur le rayon des particules. S'il y a P classes d'aérosols, chacune étant de concentration N_i (particules/ cm^3), d'indice complexe m_i , et de granulométrie $f_i(r)$ (fonction normalisée à 1 particule/ cm^3), alors on obtient par exemple, pour le coefficient de rétrodiffusion du mélange :

$$\beta_{\pi} = \sum_{i=1}^P N_i \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sigma_{\pi}(m_i, r) \cdot f_i(r) dr \quad (3)$$

Pour décrire les classes d'aérosols, j'ai choisi d'utiliser la base de données OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds, Hess, 1998), développée par le laboratoire de météorologie de l'Université de Munich. Cette base en libre accès définit 6 classes d'aérosols (insoluble, soluble, suie, sel marin, minéral, et sulfate), et contient pour chaque classe les fonctions tabulées de répartition granulométrique et les indices complexes de réfraction, qui peuvent également dépendre du degré d'humidité relative (pour les aérosols hygroscopiques). A partir de ces 6 classes d'aérosols, la base OPAC suggère également différentes mixtures de ces classes, correspondant à diverses situations géographiques/climatiques. Dix modèles environnementaux sont ainsi définis, pour lesquels les mixtures proposées comptent au maximum 4 classes d'aérosols. Par exemple, le modèle « Continental pollué » contient, en répartition massique, 66% d'aérosols de la classe soluble, 30 % insoluble, et le reste de suie.

En combinant toutes ces données, j'ai réalisé un code permettant le calcul du coefficient de rétrodiffusion et d'extinction des aérosols pour les dix modèles environnementaux définis par la base, en fonction de la longueur d'onde du laser, de l'humidité relative du milieu atmosphérique, et de la concentration massique en particules. La Figure 16 montre par exemple l'évolution spectrale de β et α , pour 4 des 10 modèles environnementaux. On voit que ces coefficients présentent des disparités significatives d'un modèle à l'autre, d'où l'intérêt de les anticiper. Même si bien entendu, il ne s'agit ici que de modélisations, ces données se révèlent utiles pour dimensionner les performances de systèmes lidars dans différentes conditions opérationnelles à travers le globe. Si l'on connaît notamment la charge massique en aérosol (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) localement, on peut multiplier les courbes de la Figure 16 par la valeur de la charge pour estimer les propriétés radiatives des aérosols. La visualisation de la dépendance spectrale des coefficients d'absorption et de rétrodiffusion est un autre aspect intéressant de ces calculs. Elle montre l'existence dans les bandes MWIR (autour de $3 \mu\text{m}$) et LWIR (8-12 μm) de bandes de résonance, d'allure dispersive, dont on ne trouve pas d'analogie dans les domaines spectraux les plus usuels en lidar, allant de 0.35 à $2 \mu\text{m}$.

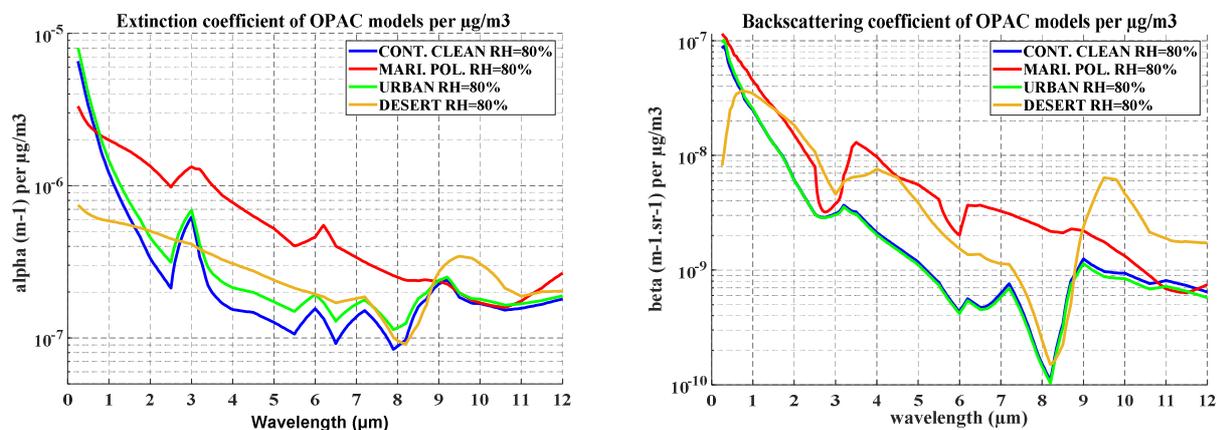


Figure 16 – Evolution spectrale des coefficients d'extinction et de rétrodiffusion pour différents modèles d'environnement de la base OPAC, pour une charge massique ramenée à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$

La base de données OPAC renferme également plusieurs modèles de nuages d'eau, qui peuvent être vus également comme des collections d'aérosols sphériques (ce qui n'est pas le cas des nuages de glace ou des cirrus), vérifiant différents types de fonctions granulométriques en fonction de la nature du nuage. J'ai donc pu calculer des courbes similaires à celles présentées en Figure 16, mais pour différents types de nuages. J'ai fait de même pour évaluer le coefficient de rétrodiffusion (Figure 17) et d'absorption de la pluie, en fonction du débit de pluie (en mm/hr), en intégrant notamment le modèle dit de Marshall-Palmer (Marshall & Palmer 1948). Anticiper les coefficients de

diffusion des nuages et de la pluie est notamment utile pour pré-évaluer le fonctionnement d'un système lidar dans des conditions météorologiques dégradées, comme cela peut nous l'être régulièrement demandé pour des applications aéronautiques ou de défense par exemple.

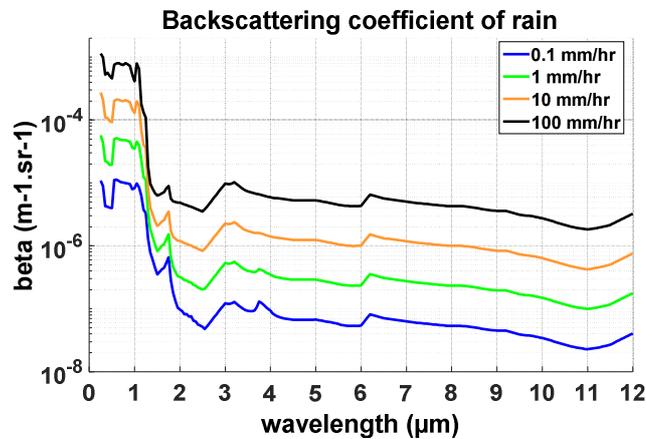


Figure 17 – Coefficients de rétrodiffusion pour différents modèles de pluie (modèles de Marshall-Palmer)

c. Diffusion Raman moléculaire

La diffusion Raman résulte de l'interaction de la lumière avec les molécules, via les variations de polarisabilité (d'ordre deux) que peut présenter une molécule animée d'un mouvement de vibration ou de rotation. Ces mouvements peuvent en effet induire de légères déformations périodiques du nuage électronique (par exemple au cours d'un mouvement de compression-étirement pour une molécule diatomique vibrante comme N_2). Le moment dipolaire développé présente alors des termes de couplage entre la fréquence du laser et celles de vibration et rotation des molécules. Le signal diffusé contient dans ce cas, en plus du terme de diffusion Rayleigh, deux composantes de diffusion inélastiques nommées Raman Stokes et Anti-Stokes (couplages soustractif ou additif en fréquence). Ces signaux Raman Stokes et Anti-Stokes sont diffusés à des fréquences différentes de celle d'excitation laser, avec un décalage de fréquence qui dépend des propriétés de rotation et vibration de chaque type de molécule. Une analyse spectrale du signal Raman diffusé peut donc permettre d'identifier la nature chimique des molécules qui en sont la source (cf Figure 9), et de les quantifier. C'est la base de la spectroscopie moléculaire Raman, qui peut être mise à profit dans des systèmes lidar, comme on l'illustrera au chapitre 4.2 avec le lidar CALISTO.

Il faut faire appel au cadre de pensée offert par la mécanique quantique pour décrire correctement les mécanismes de la diffusion Raman (de même que les phénomènes d'absorption moléculaire, qui seront décrit plus loin). Dans ce cadre, les molécules sont décrites par des fonctions d'ondes, respectant l'équation aux valeurs propres de Schrödinger. L'approximation de Born-Oppenheimer permet de séparer en sous-systèmes indépendants le nuage électronique moléculaire d'une part, et la chaîne de noyaux atomiques d'autre part. Chaque sous-système est alors représentable par une fonction d'onde qui peut prendre différents états quantiques (vecteurs propres), aux énergies quantifiées (valeurs propres). Les phénomènes de diffusion et d'absorption s'interprètent alors comme des transitions radiatives entre différents états quantiques, libérant ou absorbant des photons d'énergie correspondante à la différence d'énergie des états impliqués.

On n'évoquera pas, dans ce mémoire, les transitions mettant en jeu des changements d'énergie électronique. D'énergies élevées, elles impliquent le plus souvent des photons de longueurs d'ondes courtes dans l'UV lointain, domaine impropre à la télédétection lidar car subissant rapidement, en quelques cm de propagation, une très forte absorption atmosphérique. Dans ce cadre simplifié, l'état énergétique d'une molécule diatomique se détermine par deux nombres quantiques essentiels : le nombre quantique de vibration, noté n ($n=1,2,3\dots$), et le nombre quantique de rotation, noté J ($J=1,2,3\dots$). L'état quantique d'une molécule peut alors être représenté par le ket $|n,J\rangle$, et son énergie, dite ro-vibrationnelle, est quantifiée par les nombres n et J selon l'équation (valable au 1^{er} ordre) :

$$E = B_{vib} \left(n + \frac{1}{2} \right) + B_{rot} J(J+1) \quad (4)$$

Où B_{vib} et B_{rot} sont les constantes d'énergie vibrationnelle et rotationnelle (souvent données en cm^{-1}) dont les valeurs sont propres à chaque molécule (et vérifient généralement la condition $B_{vib} \gg B_{rot}$)

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous en tiendrons à cette description sommaire des niveaux d'énergie ro-vibrationnels, mais en réalité, même pour une simple molécule diatomique, des termes correctifs d'ordre 2 interviennent dans leur description (effets d'anharmonicité de potentiel dans lesquels se trouvent les molécules, effets de force centrifuge pour les niveaux J élevés, couplages vibrations-rotations...). Par ailleurs, la réalité est également plus complexe pour les molécules poly-atomiques. Pour ces dernières, il existe en général plusieurs modes de vibration selon les symétries existantes dans la molécule. En première approche, on peut voir une molécule poly-atomique comme un système à M modes de vibrations diatomiques indépendants les uns des autres.

La diffusion Rayleigh et la diffusion Raman s'interprètent alors comme des processus de transitions indirectes et instantanées entre deux états ro-vibrationnels, notés $|n,J\rangle$ et $|n',J'\rangle$, via un niveau d'énergie transitoire qualifié de « virtuel ». Des règles de sélection quantiques doivent être respectées. Pour les molécules diatomiques, par exemple, elles sont au nombre de deux :

$$\Delta n = 0, \pm 1 \quad \text{et} \quad \Delta J = 0, \pm 2 \quad (5)$$

En dépit de ces règles, la diversité des transitions possibles reste riche. La Figure 18 illustre schématiquement plusieurs d'entre elles, ainsi que le spectre de diffusion qui en résulte.

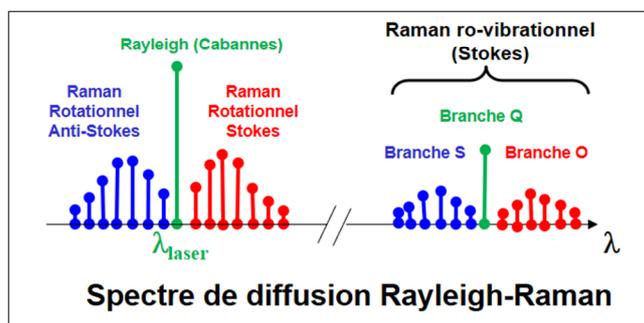
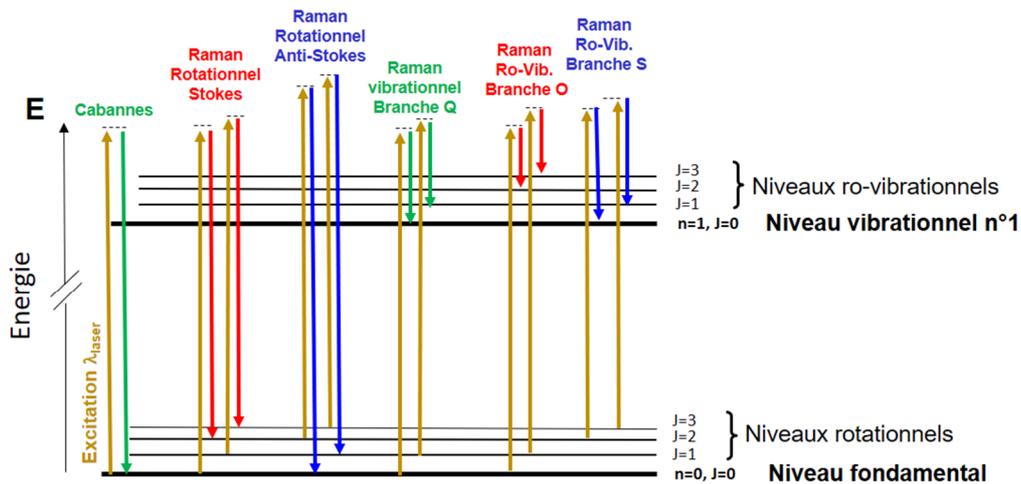


Figure 18 : Illustration des transitions Rayleigh, Raman rotationnelles, Raman ro-vibrationnelles, et représentation schématique du spectre de diffusion associé.

On a notamment distingué sur cette figure :

- la diffusion Cabannes : transition du niveau fondamental $|0,0\rangle$ vers lui-même
- La diffusion Raman rotationnelle Stokes : transitions de $|0,J\rangle$ vers $|0,J+2\rangle$
- La diffusion Raman rotationnelle Anti-Stokes : transitions de $|0,J+2\rangle$ à $|0,J\rangle$
- La diffusion Raman ro-vibrationnelle Stokes (transitions de $|0,J\rangle$ à $|1,J'\rangle$) avec trois branches distinctes, nommées Q ($J=J'$), O ($\Delta J=-2$) et S ($\Delta J=+2$).

Il existe également des transitions Raman de très faible intensité non représentées sur ce schéma. Par exemple, les transitions des états $|0,J\rangle$ vers eux-mêmes, sans changement de fréquence, produisent une contribution spectrale (de type branche Q) qui se superpose à la raie Cabannes, mais de très faible intensité par rapport à cette dernière (moins de 1%). Elle est donc le plus souvent négligeable et négligée. Egalement, il existe des transitions vibrationnelles Anti-Stokes (de $|1,J\rangle$ vers $|0,J'\rangle$), mais d'intensité beaucoup plus faible que leurs homologues Stokes.

L'intensité du signal diffusé dans chacune des raies Raman suit quelques règles phénoménologiques qui ont un impact fort pour le dimensionnement de systèmes lidars. Tout d'abord l'intensité des raies de diffusion Raman sont elles aussi proportionnelles à λ^{-4} , et sont donc beaucoup plus faciles à observer dans l'UV que dans l'IR. Ensuite l'intensité d'une raie de diffusion Raman est proportionnelle au niveau de population (nombre de molécules) se trouvant dans l'état initial de la transition. En situation d'équilibre thermodynamique, la population d'un niveau, suivant la loi de Boltzmann, est proportionnelle à $\exp(-E/kT)$. Les transitions Stokes, partant d'un niveau très peuplé, sont donc plus intenses que les transitions Anti-Stokes qui partent d'un niveau plus élevé, et

donc moins peuplé. C'est ce qui explique par exemple pourquoi la diffusion Raman anti-Stokes vibrationnelle est d'intensité négligeable (l'énergie vibrationnelle B_{vib} étant typiquement de plusieurs milliers de cm^{-1} , tandis que le nombre d'onde correspondant à kT à 296 K est de 205 cm^{-1}).

Ces remarques ne suffisent néanmoins pas à expliciter tous les facteurs dont dépend l'intensité des raies Raman diffusées. Dans le cas le plus simple des molécules diatomiques, leur calcul détaillé nécessite la prise en compte additionnelle de nombreux autres facteurs, comme le facteur de dégénérescence moléculaire, le spin, la fonction de partition, et les coefficients de Placzek-Teller. Tous ces coefficients, ainsi que ceux permettant de calculer précisément les niveaux d'énergie ro-vibrationnels (i.e. prenant en compte les effets correctifs listés plus haut), peuvent être trouvés facilement dans la littérature pour certaines molécules comme N_2 et O_2 (Wandinger 2005). Mais pour les autres molécules, cela relève du cas par cas, nécessitant un travail conséquent de bibliographie et d'harmonisation des notations. Pour réunir tous les paramètres nécessaires au calcul du spectre de diffusion Raman de la molécule de dihydrogène H_2 (cf. chap. 4.2 sur le lidar CALISTO), la Figure 19 montre que nous avons eu recours à pas moins de 5 références bibliographiques, utilisant des notations et des unités variées.

	unité	N_2	O_2	H_2	
$\tilde{\nu}_{vib}$	cm^{-1}	2330,7	1556,4	4161,2	[Mea84]
\tilde{B}_0	cm^{-1}	1,99	1,44	59,3	
\tilde{B}_1	cm^{-1}	1,97	1,42	56,3	
\tilde{D}	cm^{-1}	$5,76 \times 10^{-6}$	$4,85 \times 10^{-6}$	$4,65 \times 10^{-2}$	
I_{sp}		1	0	1/2	[Lon02]
g_J impair pair		3 6	1 0	3 1	
α^2	m^6	$3,17 \times 10^{-60}$	$2,66 \times 10^{-60}$	$0,6 \times 10^{-60}$	[Tho81]
γ^2	m^6	$0,52 \times 10^{-60}$	$1,26 \times 10^{-60}$	$8,6 \times 10^{-62}$	[Flo87]
α'^2	m^4/kg	$2,62 \times 10^{-14}$	$1,63 \times 10^{-14}$	$1,81 \times 10^{-13}$	[Mur69]
γ'^2	m^4/kg	$4,23 \times 10^{-14}$	$6,46 \times 10^{-14}$	$1,03 \times 10^{-13}$	
		[Wan05]			

Figure 19 – Constantes moléculaires pour le calcul des énergies et des sections efficaces des transitions Raman des molécules N_2 , O_2 et H_2 . (Source : Limery 2018)

Pour les molécules poly-atomiques la situation est encore plus complexe. Pour la vapeur d'eau, par exemple, les données nécessaires au calcul des intensités de raies Raman sont tabulées dans la littérature pour chaque transition (Avila 2004). De plus, tous les modes de vibrations des molécules poly-atomiques ne donnent pas forcément lieu à un spectre de diffusion Raman. La condition nécessaire à l'existence d'un mode de diffusion Raman vibrationnel est en effet que la polarisabilité de la molécule soit variable au cours de la vibration considérée. On qualifie d'actifs (ou d'inactifs) les modes de vibrations moléculaires vérifiant (ou ne vérifiant pas) cette condition.

Ce fut donc un travail de fond, mené avec mon doctorant Anasthase Liméry, que de réunir toutes les données nécessaires au calcul des spectres de sections efficaces de rétrodiffusion Raman des molécules d'intérêt dont nous avons eu besoin (N_2 , O_2 , H_2 , H_2O). Ces données, aujourd'hui

rassemblées en un code de calcul unique, font partie des outils indispensables dont nous nous sommes munis pour le dimensionnement de systèmes lidars à diffusion Raman.

La Figure 20 montre les spectres Raman des molécules N_2 , O_2 , H_2 , et H_2O , que nous pouvons par exemple calculer, en coefficient de rétrodiffusion β (dans une atmosphère à pression et température standard et pour les rapports de mélanges moléculaires indiqués en légende), pour une excitation laser à $\lambda_L=355$ nm. Cette figure, dans laquelle nous avons aussi représenté la diffusion Rayleigh, permet aussi de souligner la grande différence entre les coefficients de rétrodiffusion Rayleigh et Raman, séparés de 4 ordres de grandeurs au minimum. On comprend dès lors pourquoi les lidars Raman exigent à la fois d'importantes puissances laser, et de très performantes chaînes de détection. Nous reviendrons sur l'exemple de lidar Raman CALISTO au chapitre 4.2 de ce mémoire.

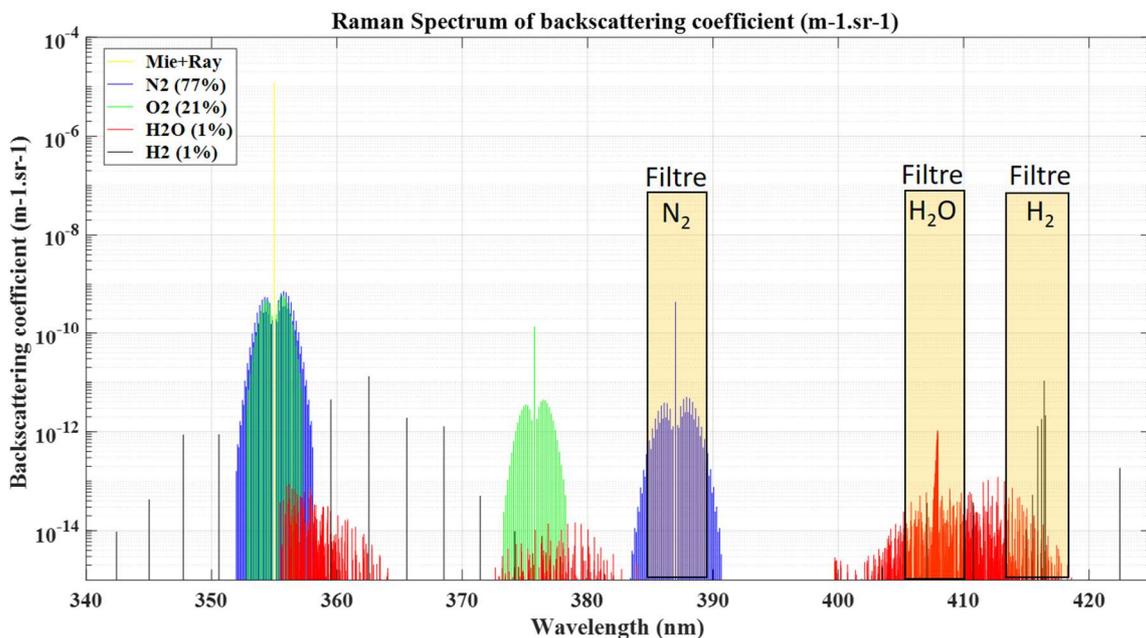


Figure 20 – Spectre du coefficient de rétrodiffusion Rayleigh-Mie et Raman, pour une atmosphère représentative à 1 bar et composée de 77% N_2 , 21% O_2 , 1% H_2O , et 1% H_2 , pour un laser à 355 nm (supposé infiniment fin spectralement). Le spectre Raman de la molécule H_2O présente trois modes de vibration actifs en diffusion Raman (dont deux se recouvrent partiellement). La partie Anti-Stokes rotationnelle de H_2O (quasi symétrique de la partie Stokes) n'est pas représentée ici.

d. Absorption moléculaire infrarouge

La description du phénomène d'absorption moléculaire s'appuie également sur la représentation quantique de la matière et des interactions lumière-molécule. A la différence de la diffusion Raman, qui met en jeu des transitions indirectes entre les niveaux quantiques ro-vibrationnels, le phénomène d'absorption met en jeu des transitions directes. Les règles de sélection des transitions s'appliquant au phénomène d'absorption sont également différentes, et s'écrivent au 1^{er} ordre :

$$\Delta n = 0, \pm 1 \quad \text{et} \quad \Delta J = 0, \pm 1 \quad (6)$$

- Le cas $\Delta n=0$ correspond à des transitions entre niveaux d'énergie rotationnelle uniquement. Les énergies impliquées sont alors faibles (car B_{rot} est petit) et correspondent dans le spectre électromagnétique à de grandes longueurs d'ondes, généralement au-delà de 12 μm et donc

peu exploitables pour des systèmes lidar en raison d'une faible transparence atmosphérique ;

- Le cas $\Delta n = -1$ correspond à des transitions vibrationnelles d'émission spontanée ou stimulée. Les probabilités d'occurrence de ces transitions, qui partent d'un niveau élevé et donc peu peuplé, sont très faibles et peuvent être négligées ici ;
- Le cas $\Delta n = +1$, correspond à l'absorption vibrationnelle, et les niveaux d'énergie associés correspondent le plus souvent au domaine infra-rouge du spectre électromagnétique. C'est donc cette composante vibrationnelle qui est la plus régulièrement exploitée dans les lidars à absorption différentielle (IP-DIAL ou RR-DIAL). Elle se décline en deux branches notées P ($\Delta J = -1$) et R ($\Delta J = +1$). Pour certaines molécules, il peut s'y ajouter une branche Q ($\Delta J = 0$).

De plus, un mode de vibration moléculaire n'est « actif » en absorption que s'il y a variation du moment dipolaire de la molécule pendant le mode de vibration envisagée. Une implication importante de cette règle est que les modes de vibration des molécules diatomiques homonucléaires comme N_2 , O_2 , etc., ne sont pas « actifs » en spectroscopie d'absorption vibrationnelle. En effet, pour ces molécules, le centre de charge reste inchangé (et centré) pendant la vibration moléculaire en étirement-contraction (en réalité, certaines molécules conservent un moment quadrupolaire résiduel, actif en spectroscopie d'absorption, mais bien trop faible pour être utilisé en lidar).

Enfin, un dernier point capital est que contrairement à la diffusion Raman, il n'est possible de susciter une transition d'absorption que si l'énergie apportée par un photon incident du rayonnement laser, de fréquence ν_L , correspond exactement à la différence d'énergie d'une transition active de la molécule visée : $\Delta E = h\nu_L$. Ceci fixe donc une condition stricte à respecter dans le choix de la longueur d'onde du laser. Toutefois, le temps de vie des molécules dans un état de vibration excité étant limité par différents processus (notamment les collisions intermoléculaires), la section efficace d'absorption d'une molécule pour une transition donnée se présente comme une raie élargie, de quelques GHz typiquement à pression atmosphérique, et non comme un Dirac. Ceci relâche légèrement le caractère strict de la condition ci-dessus.

Contrairement à la diffusion Raman, pour laquelle les paramètres permettant de calculer les spectres de diffusion doivent être rassemblés à partir de sources parfois disparates, les paramètres de calcul des spectres d'absorption sont répertoriés avec une abondance extraordinaire au sein de diverses bases de données spectroscopiques en libre accès. La plus connue est HITRAN (Rothman, 2009), qui rassemble pour plus de 40 molécules atmosphériques un très grand nombre de fréquences et intensités d'absorption. Elle renferme aussi tous les paramètres nécessaires au calcul de la forme spectrale de chaque raie d'absorption en fonction de la pression, de la température, du rapport de mélange considéré, ainsi que la fonction de partition de ces molécules. A partir des données de HITRAN, j'ai réalisé un code de calcul dit « raie-par-raie », permettant de calculer le coefficient d'absorption d'un mélange arbitraire de molécules de la base HITRAN dans des conditions de pression, température, et rapport de mélanges variables, entre 300 nm et 20 μm . La Figure 21 montre un exemple de sortie de ce code de calcul, permettant ici de visualiser d'un coup d'œil les principales bandes d'absorption du CO_2 , et de les mettre en regard avec le spectre de transparence atmosphérique. J'ai calculé ce type de graphique pour de nombreuses molécules d'intérêt, ce qui permet (sachant qu'il est possible de zoomer) de bien évaluer quelles sont les longueurs d'ondes les plus adaptées à la télédétection des molécules.

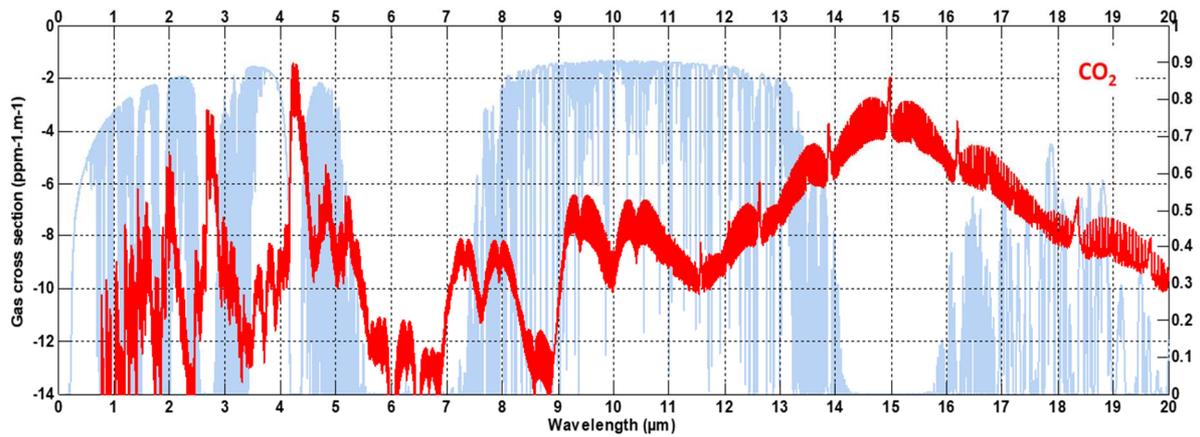


Figure 21 : Spectre de section efficace d'absorption du CO₂ calculé en unité de ppm⁻¹.m⁻¹ à pression et température standard (cela signifie qu'on a simplement multiplié par P/k_BT les sections efficaces en m²). L'axe de droite est en échelle log₁₀. La courbe bleue en arrière-plan montre le spectre de transmission atmosphérique pour 1 km de propagation (axe de droite).

Néanmoins, ce code raie-par-raie, fidèle en cela aux recommandations de la documentation HITRAN, somme en chaque point de fréquence les contributions des raies d'absorption dans un rayon limité de $\pm 25 \text{ cm}^{-1}$ autour du point de calcul. Ce rayon de troncature permet de limiter le temps de calcul, mais néglige les contributions des raies au-delà de 25 cm^{-1} . Or, ces contributions « far-wing » peuvent être significatives dans certains cas. C'est pourquoi il existe des modèles nommés « continuum d'absorption » chargés de modéliser l'absorption résiduelle issue de ces contributions. J'ai ainsi intégré dans mon outil de calcul les spectres de continuum issus des modèles CKD-1997 et MT-CKD (Mlawer 2012), qui font référence dans ce domaine. La Figure 22 montre que le continuum le plus important à prendre en compte est celui de la vapeur d'eau, qui peut être très significatif (y compris en dehors des principales bandes d'absorption de la molécule), tandis que les continua apportés par les autres molécules sont quasi-négligeables (sauf à considérer de très longs chemins atmosphériques).

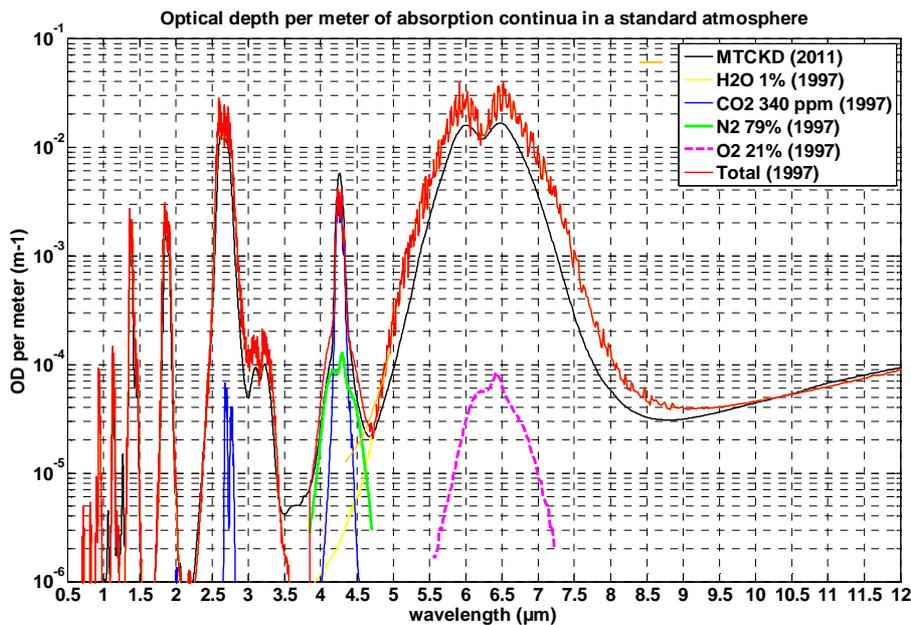


Figure 22 : Comparaison des modèles de continuum CKD 1997 et MT-CKD (2010)

La base HITRAN ne contient pas non plus tous les gaz atmosphériques auxquels j'ai pu être amené à m'intéresser. Pour certains composés particuliers, j'ai eu recours à d'autres bases de données notamment la base du PNNL (Pacific Northwest National Laboratory, [Sharpe 2004](#)), qui contient les spectres de sections efficaces infrarouges de nombreux composés organiques qui ne sont pas répertoriés dans Hitran (propane, butane, benzène...). Pour certains gaz très particuliers, comme les gaz toxiques qui seront évoqués avec le lidar MICLID au chapitre 4, j'ai également utilisé des données spectrales directement issues de la littérature, ou bien issues de mesures effectuées par des partenaires.

e. Quels enjeux pour la spectroscopie d'absorption dans les bandes SWIR, MWIR et LWIR ?

Les différentes bases de données que j'ai prises en compte, et les outils de modélisation que j'ai développés, permettent à présent de bien illustrer quels sont les principaux enjeux de télédétection par lidar à absorption différentielle dans les différentes bandes de l'infrarouge.

Dans le SWIR, certaines espèces chimiques, et des plus importantes, présentent des raies d'absorption parfaitement exploitables pour la télédétection lidar : c'est le cas notamment des trois principaux gaz à effet de serre atmosphériques que sont la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), et le méthane (CH_4). Les sections efficaces d'absorption sont assez faibles pour ne pas absorber trop vite le faisceau laser, et en même temps assez fortes pour générer un niveau d'absorption mesurable après une propagation sur des distances kilométriques. Les lidars SWIR sont donc bien placés pour traiter du suivi des gaz à effet de serre, enjeu de société devenu majeur dans le contexte de réchauffement climatique que l'on connaît. Ils peuvent également répondre à des besoins de caractérisation de rejets industriels de CO_2 ou CH_4 (pour lesquels les rejets sont ponctuels mais plus concentrés) ou encore de sécurité industrielle (le méthane notamment est un gaz explosif). La Figure 23 montre les spectres des sections efficaces d'absorption (issus de la base HITRAN) des molécules H_2O , CO_2 et CH_4 , dans le SWIR entre $1 \mu m$ et $2.5 \mu m$, et signale les bandes spectrales des lidars SWIR (tous fibrés) que nous avons réalisés (ils seront commentés au chapitre 4). A l'exception du système « SHADOAS SWIR », testé à courte portée et dans des conditions de laboratoire (mesure de H_2O et CH_4), les lidars VEGA (CH_4 +vent), HELENA (CO_2 +vent), et Mini-peigne (H_2O , CO_2) ont tous réalisé des mesures de gaz en extérieur sur des portées allant de plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres.

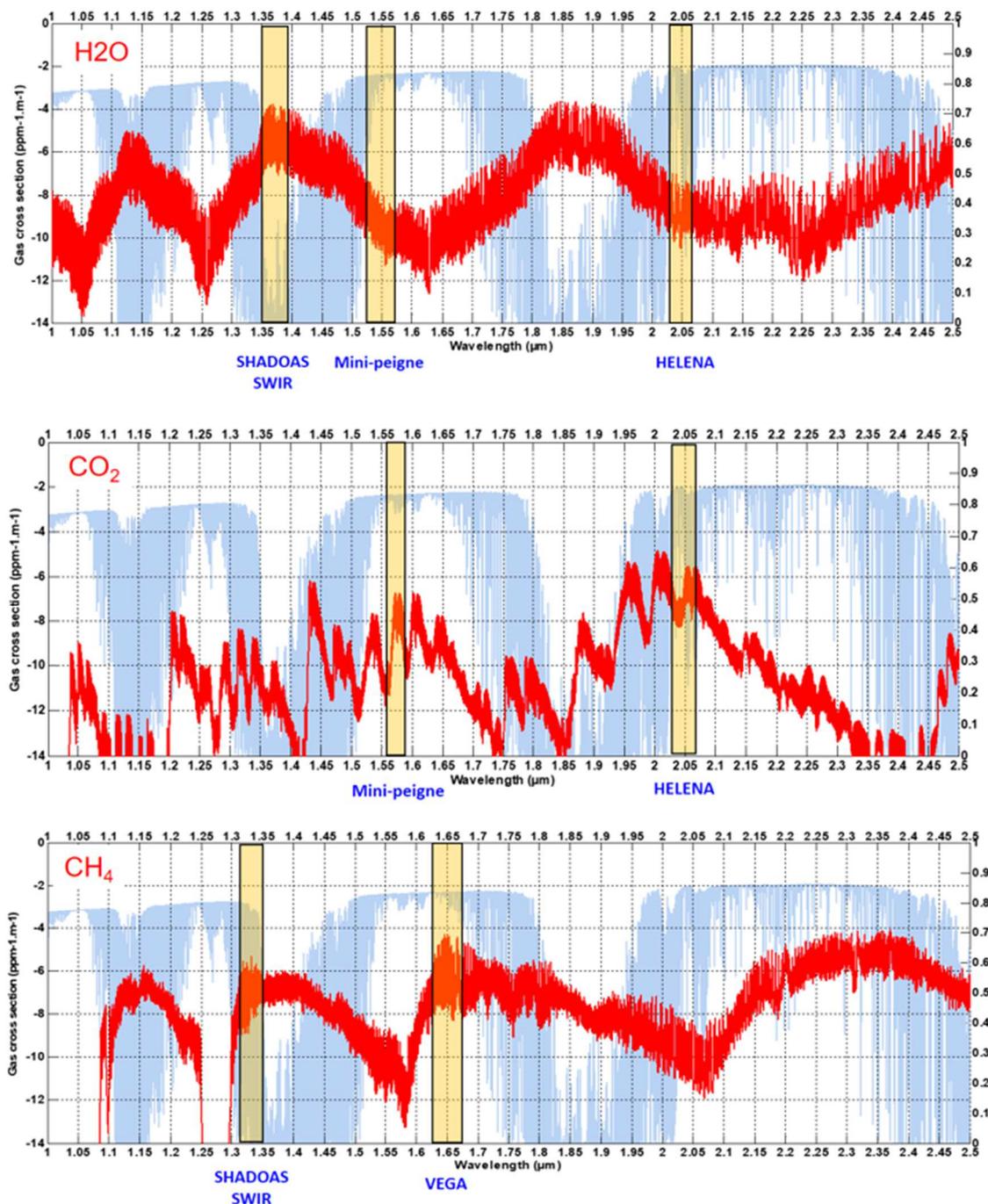


Figure 23 - Spectres de sections efficace de H₂O, CO₂ et CH₄ dans le SWIR, calculés en unité de ppm⁻¹.m⁻¹ à pression et température standard. L'axe de droite est en échelle log₁₀. Les courbes bleues en arrière-plan montrent le spectre de transmission atmosphérique typique pour 1 km de propagation (axe de droite).

La bande MWIR, avec en particulier la sous-bande 3-4 µm, revêt une importance particulière en spectroscopie, car elle correspond entre autres à la bande d'absorption fondamentale de la liaison vibrationnelle carbone-hydrogène. Elle contient donc des signatures spectrales fortes pour de nombreux gaz d'intérêt de la grande famille des Composés Organiques Volatils (COV), incluant notamment les alcanes, alcènes, alcynes, aldéhydes, et aromatiques. Le méthane est un gaz particulièrement important, aux multiple enjeux comme on l'a dit plus haut (écologique, sécurité industrielle, financier). Parmi les autres COV, on peut distinguer également le benzène, gaz cancérigène aux émissions industrielles particulièrement surveillées. La bande 3-4 µm comprend

également des signatures plus faibles d'autres gaz d'intérêt tels que l'ammoniac NH_3 (agriculture, élevage). Enfin, la bande MWIR peut également présenter un intérêt pour la détection de gaz toxiques, explosifs, ou de combats, bien que dans ce domaine, la bande LWIR demeure plus pertinente lorsqu'on y a accès (cf. infra). Il faut aussi noter que les sections efficaces en bande MWIR sont souvent plus élevées qu'en bande SWIR. Pour le CH_4 , elle l'est par exemple de plus d'une décade. Un lidar CH_4 dans le MWIR sera donc plus adapté à des mesures de courte portée, mais en contrepartie, de plus grande précision. La Figure 24 illustre les spectres de sections efficaces de nombreux gaz d'intérêt dans la bande 3-4 μm (issus de la base PNNL), et indique les bandes spectrales de fonctionnement de différentes technologies laser (nous parlerons plus bas des supercontinuum et des NesCOPO)

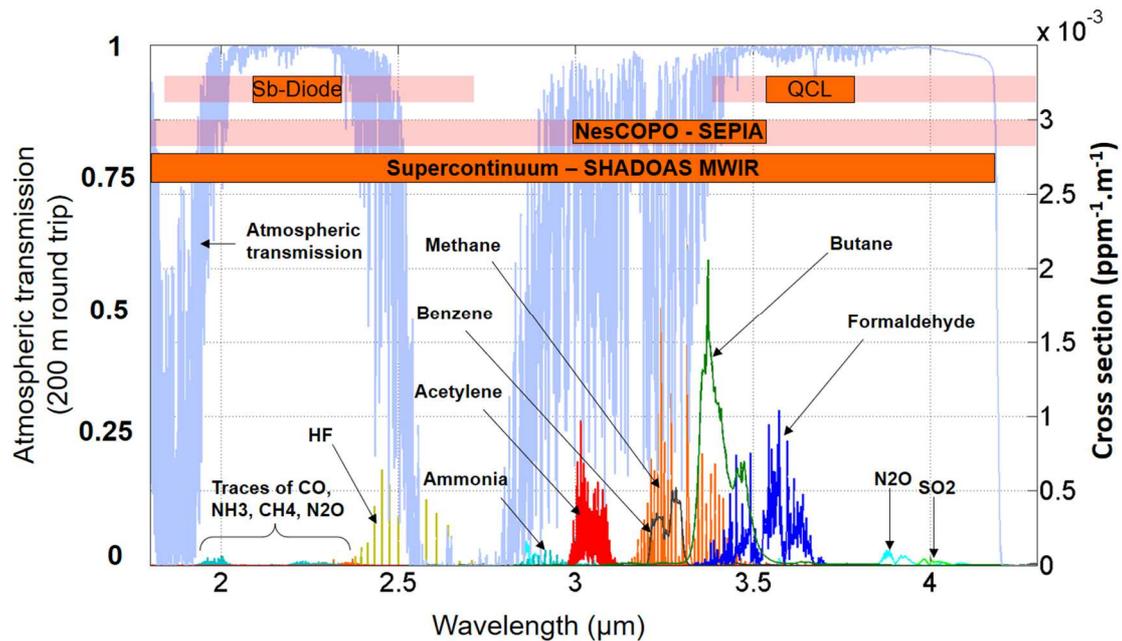


Figure 24 – Spectres de sections efficaces de composés organiques volatils et d'autres gaz traces dans le MWIR. Ces bandes spectrales sont accessibles pour des applications de spectroscopie d'absorption via différentes technologies laser commerciales (diodes antimoine, lasers à cascades quantiques) ou issues des laboratoires de l'Onera (sources fibrées à supercontinuum, sources à cristaux non linéaires de type NesCOPO). Je reviendrai sur ces dernières un peu plus loin.

La bande LWIR comporte également des signatures spectrales importantes pour une grande variété de molécules (zone spectrale appelée « *fingerprint* »). Néanmoins, nous y avons été confrontés par le prisme applicatif particulier qui est celui de la détection de gaz toxiques et de combat. Je ne commenterai donc ici l'intérêt de la bande LWIR en télédétection que vis-à-vis de cet enjeu particulier. La Figure 25 montre que de nombreux gaz toxiques, qui sont des molécules chimiquement très complexes, sont particulièrement absorbants dans la bande LWIR. Ils conservent un pouvoir d'absorption non négligeable dans le MWIR, lié toujours aux vibrations de la liaison C-H, mais dans cette bande leurs signatures non seulement sont moins fortes, mais elles sont également toutes plus ou moins confondues autour de 3.3 μm (vibration fondamentale C-H). Pour détecter un gaz toxique, comme pour l'identifier et le quantifier, l'usage de la bande LWIR est donc préférable, bien qu'elle soit plus difficile d'accès du point de vue des technologies laser. La Figure 26 détaille les spectres de transmission de 4 gaz toxiques qui ont fait l'objet d'une étude particulière avec le lidar MICLID (cf. Chapitre 4).

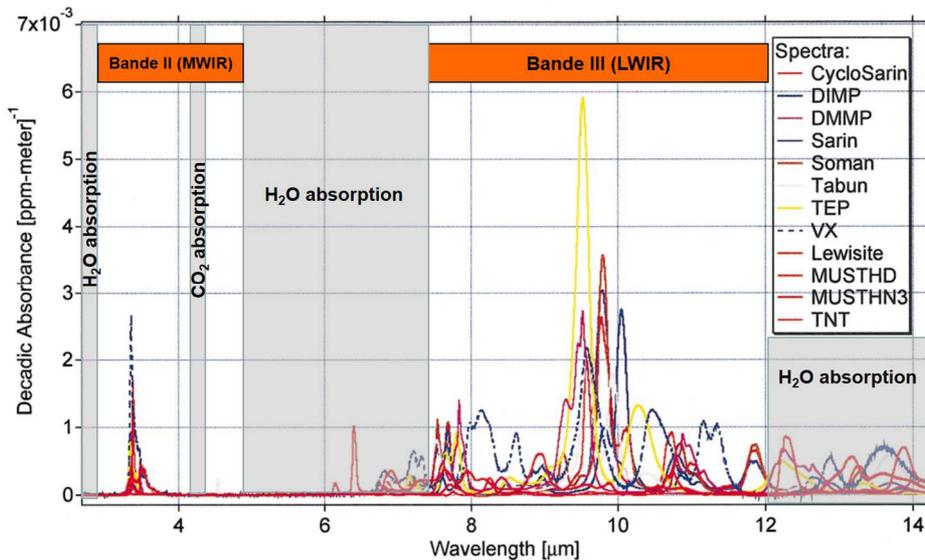


Figure 25 – Spectres de sections efficaces de gaz explosifs et toxiques dans les bandes MWIR et LWIR. D’après Webber et al. 2005

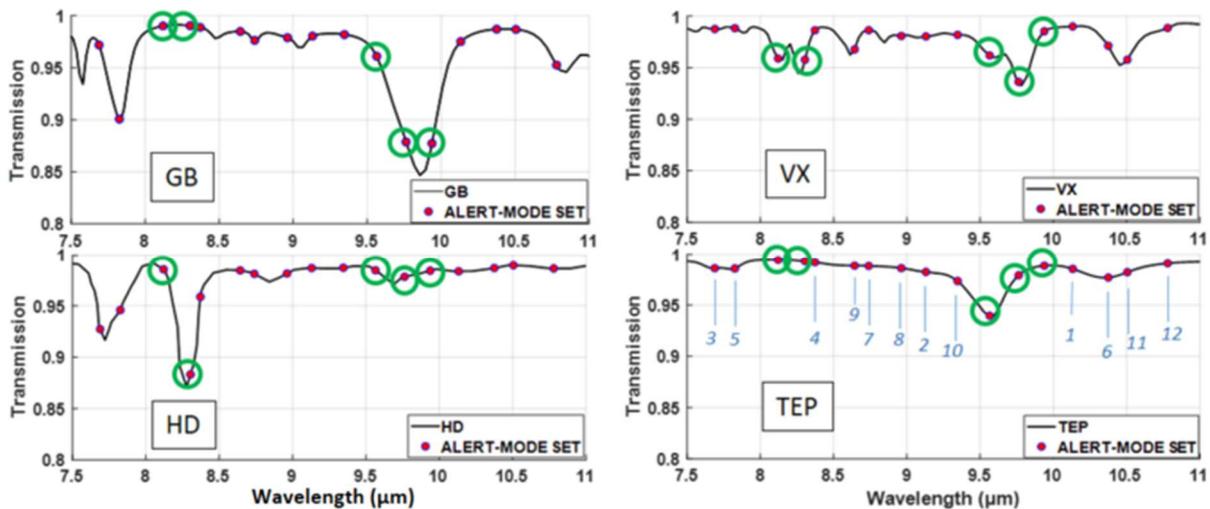


Figure 26 – Spectres de transmission de gaz de combat comme le Sarin (GB), le gaz moutarde (HD), l’agent V neurotoxique (VX), et le triethylphosphate (TEP, simulant). Les données spectrales sont issues de la littérature. Les points rouges indiquent les longueurs d’ondes pouvant être émises par la source laser (de type NesCOPO), les cercles verts indiquent les longueurs d’ondes sélectionnées après application d’un algorithme d’optimisation des performances. On reviendra au chap.4 sur le lidar MICLID. (Source : Cézard & Melkonian, 2020)

f. Conclusion

Grâce à l’ensemble des travaux mentionnés dans cette section, de bibliographie, de collection de base de données, et de calcul scientifique, il a été possible de développer, une palette d’outils de modélisation des propriétés de rétrodiffusion et d’extinction de la lumière dans l’atmosphère. Nous avons notamment réuni les moyens de calculer les sections efficaces :

- d’absorption moléculaire (bases HITRAN et PNNL),
- d’absorption par les continuum (modèle CKD/MT_CKD),
- de rétrodiffusion Raman (base de données « maison »),
- de rétrodiffusion et d’extinction de Mie par les aérosols, nuages et pluies (base OPAC),
- de rétrodiffusion Rayleigh-Brillouin (modèle Tenti-S6).

A cette liste s'ajoutent les profils verticaux de température, pression et rapports de mélanges des molécules atmosphériques standard, issus de la base AFGL (Air Force Geophysical Laboratory), que j'ai également pris en compte. Ce travail de fond m'a permis de construire un code générique calculant les propriétés de rétrodiffusion et d'extinction d'un rayonnement laser, tout au long de sa propagation, dans une atmosphère spécifiable de façon très souple. Ce code a ensuite été intégré progressivement au sein de l'outil de conception lidar qu'est le code LIDIASOL, qui sera décrit plus en détail au chapitre 4.

g. Références

- **Avila G.**, Fernández J.M, Tejada G., Montero S., "The Raman spectra and cross-sections of H₂O, D₂O, and HDO in the OH/OD stretching regions," *Journal of Molecular Spectroscopy*, Vol. 228, p. 38–65 (2004)
- **Bohren C.** and D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (Wiley, 1983)
- **Cézard N.**, « Etude de faisabilité d'un lidar Rayleigh-Mie pour la mesure à courte distance de la vitesse de l'air, de sa température, et de sa densité », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique (2008)
- **Cézard N.** and J-M. Melkonian, "Long-wave infrared multi-wavelength IPDA lidar for standoff detection of chemical warfare agents: theoretical study," *Appl. Opt.* 59, 11167-11179 (2020)
- **Hess M.**, Koepke P., Schult I., "Optical properties of Aerosols and Clouds: the software package OPAC", *Bul. Am. Soc. Met.*, Vol.79 n°5, 831-844 (1998)
- **Liméry A.**, « Étude et réalisation d'un lidar Raman pour la détection d'hydrogène et de vapeur d'eau dans une alvéole de stockage de colis radioactifs », Thèse de doctorat de l'université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, soutenue le 27 mars 2018
- **Marshall, J. S.** and Palmer, W. M.: The distribution of raindrop with size, *J. Meteor.*, 5, 165–166, 1948
- **Mätzler C.** "MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption Version 2", Research Report No. 2002-11 (2002)
- **Mlawer, E. J.**, Payne V. H., Moncet, J., Delamere, J. S., Alvarado, M. J., and Tobin, D.C.: Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption, *Philos. T. R. Soc. A*, 370, 2520–2556, <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0295>, 2012.
- **Rothman L.**, I. Gordon, A. Barbe, D. Benner, P. Bernath, M. Birk, V. Boudon, L. Brown, A. Campargue, J. Champion, K. Chance, L. Coudert, V. Dana, V. Devi, S. Fally, J. Flaud, R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, I. Kleiner, N. Lacome, W. Lafferty, J. Mandin, S. Massie, S. Mikhailenko, C. Miller, N. Moazzen-Ahmadi, O. Naumenko, A. Nikitin, J. Orphal, V. Perevalov, A. Perrin, A. Predoi-Cross, C. Rinsland, M. Rotger, M. Simeckova, M. Smith, K. Sung, S. Tashkun, J. Tennyson, R. Toth, A. Vandaele, and J. Auwer, "The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 110 (9-10), 533–572 (2009).
- **Sharpe S.W.**, Johnson T.J, Sams R.L, Chu P.M, Rhoderick G.C, Johnson P.A, "Gas-Phase Databases for Quantitative Infrared Spectroscopy", *Appl. Spectr.* 58, pp1452-1461 (2004)
- **Tenti G.**, C. Boley, R. Desai, « On the kinetic model description of Rayleigh-Brillouin scattering from molecular gases », *Can. J. Phys.* 52, 285 (1974)
- **Wandinger U.**, "Raman lidar" in *Lidar: Range Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, C. Weitkamp, ed., Springer Series in Optical Sciences, Vol. 102, p. 241–271 (Springer, 2005)
- **Webber M.E.**, M. Pushkarsky, C. Kumar, N. Patel, "Optical detection of chemical warfare agents and toxic industrial chemicals, Simulation", *Journal of Appl. Phys.* 97, pp. 113101 (2005)
- **Witschas, B.**, M.O. Vieitez, E-J. van Duijn, O. Reitebuch, W. van de Water, and W. Ubachs, "Spontaneous Rayleigh–Brillouin scattering of ultraviolet light in nitrogen, dry air, and moist air," *Appl. Opt.* 49, 4217-4227 (2010)

2. Outils technologiques : zoom sur les sources lasers infrarouges

a. Introduction

Un lidar est composé d'un ensemble de sous-systèmes faisant appel à des technologies très variées (cf. Tableau 1), selon l'objectif de mesure, la longueur d'onde du système, sa portée etc. Il serait donc difficile de présenter ici chacune des technologies auxquelles nous avons eu recours, en émission, en détection, ou « entre les deux » (pour la réalisation de fonctions de modulation d'amplitude, modulation de phase, circulation, polarisation, analyse spectrale...). Par conséquent, j'ai choisi de focaliser le propos, dans cette section, sur les sources lasers, et en particulier sur les sources lasers innovantes que nous avons employées pour les applications de lidars à absorption différentielle dans l'infrarouge. En effet, bien que choisir un détecteur (ou un autre composant) soit un acte de conception tout à fait important, nous nous sommes presque toujours appuyés, en dehors des sources laser, sur des technologies commerciales (avec quelques exceptions qui seront signalées au chapitre 4). En matière de sources laser, en revanche, deux cas de figure se sont présentés.

Pour les lidars à diffusion moléculaire (Rayleigh et Raman), nous avons pu nous appuyer également sur des technologies commerciales. La raison tient au fait que la diffusion Rayleigh et Raman mettent en jeu un état d'énergie virtuel qui n'est pas prédéterminé (Figure 18). Il est donc possible de susciter ces phénomènes à partir de sources laser de fréquence presque quelconque. Pour un lidar Raman, le niveau d'énergie apporté par le laser doit tout de même être supérieur à la différence d'énergie de la transition nette visée. Mais la contrainte apportée par cette condition sur la longueur d'onde du laser reste faible (par exemple un lidar Raman H₂ vibrationnel, pour lequel l'énergie de transition est de 4160 cm⁻¹, doit simplement vérifier $\lambda_L < 2.4\mu\text{m}$). Cette liberté sur le choix de la longueur d'onde est très avantageuse, et permet notamment de choisir une source laser UV pour maximiser les signaux de diffusion (proportionnels à λ^{-4}). Pour les lidars Rayleigh et Raman qui seront présentés au chap.4, nous avons donc employé des sources commerciales impulsives dans l'UV. Ce sont des sources à cristal de Nd:YAG en cavité, délivrant des impulsions de hautes énergies à 1064 nm, converties ensuite à 355 nm dans des cristaux non linéaires.

A l'inverse, les sources lasers dédiées à la spectroscopie d'absorption doivent impérativement être adaptées aux transitions vibrationnelles visées, en vertu de la règle de sélection $\Delta E = h\nu$. Ceci nécessite le développement de sources laser originales, capables de délivrer suffisamment de puissance aux longueurs d'ondes d'intérêt. Par ailleurs, dans l'optique de réaliser des systèmes de terrain, la robustesse mécanique des sources lasers est toujours un enjeu majeur. Or ces trois contraintes (longueur d'onde, puissance, robustesse) sont particulièrement ardues à réunir lors du développement de nouvelles sources laser en général. Si la source est dévolue à un système lidar, d'autres contraintes s'ajoutent. Par exemple, pour faire des mesures résolues spatialement, la source laser doit être impulsive. Pour utiliser une détection cohérente, elle doit être suffisamment cohérente elle-même, à la fois temporellement (finesse spectrale) et spatialement (bonne qualité de faisceau). Pour les systèmes lidars en absorption différentielle, concevoir et développer des sources lasers adaptées est donc un défi à la fois scientifique et technique.

J'ai eu la chance de travailler à l'Onera aux côtés de spécialistes dans le développement de nouvelles sources laser infrarouges. Leurs travaux ont permis de véritables innovations techniques, que j'ai eu l'opportunité et le plaisir de chercher à valoriser avec eux dans de nouveaux systèmes de télédétection. En plusieurs occasions, nous avons aussi procédé en sens inverse, c'est-à-dire que

motivé par le développement d'un nouveau système lidar, mon travail a parfois conduit à spécifier et susciter le développement de nouvelles sources laser. Dans cette section, je me propose donc de projeter un éclairage particulier sur trois familles de sources laser infrarouges, dont on retrouvera différents représentants au chapitre 4 :

- les lasers fibrés cohérents
- les lasers fibrés à supercontinuum
- les lasers à cristaux de type NesCOPO (Nested Cavities Optical Parametric Oscillators).

Néanmoins, n'étant pas moi-même un spécialiste du métier, je me limiterai à une description « en surface » de ces technologies, le but étant avant tout de donner un aperçu de la « boîte à outils », en termes de sources laser, dont mes travaux ont pu bénéficier.

b. Sources laser fibrées dans l'infrarouge

J'ai présenté au second chapitre mon environnement de recherche, et indiqué l'existence d'un Pôle Laser au sein de mon unité. L'une des spécialités de ce Pôle a été de développer, depuis environ 2005, plusieurs générations de sources laser fibrées cohérentes infrarouges à $1.55\mu\text{m}$, adaptées à la réalisation de lidars Doppler fibrés pour des applications d'anémométrie et vélocimétrie. A partir de 2010, les activités du Pôle se sont ouvertes à de nouvelles applications, en particulier la détection des gaz atmosphériques, domaine sur lequel précisément je m'étais tourné à la même époque. J'ai eu dès lors (et depuis) de très riches échanges avec mes « collègues laseristes », afin de mieux exploiter les ressources offertes par la technologie fibrée pour la détection de gaz atmosphériques.

L'une des principales limites de la technologie fibrée pour la spectroscopie infrarouge, est que les fibres en silice, qui sont de loin les plus répandues et les plus performantes sur bon nombre d'aspects, ne sont transparentes que dans le SWIR. Au-delà de $2.2\ \mu\text{m}$, les pertes optiques en transmission des fibres deviennent trop élevées pour réaliser des systèmes efficaces. Cette limite amoindrit considérablement le potentiel de la technologie fibrée pour la détection de gaz, puisque de nombreuses espèces chimiques ne présentent de fortes signatures en absorption vibrationnelles qu'au-delà de $2.2\ \mu\text{m}$, dans les bandes MWIR et LWIR.

Néanmoins, comme on l'a vu plus haut (Figure 23), certaines espèces chimiques, et des plus importantes, présentent des raies d'absorption parfaitement exploitables dans le SWIR : c'est le cas notamment des trois principaux gaz à effet de serre que sont la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), et le méthane (CH_4). La technologie fibrée est donc bien placée pour tenter d'apporter des réponses aux problèmes liés à la mesure de ces gaz d'intérêt majeur. Pour ces applications, le développement de nouvelles sources fibrées cohérentes basées sur des architectures de type MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) ont permis de réaliser des systèmes lidars très innovants (cf. chap. 4.5 et 4.6 pour les lidars VEGA (CH_4), HELENA (CO_2), et peigne de fréquence (H_2O)).

Pour aller au-delà et dépasser la limite de transparence imposée par la silice, il est possible d'utiliser des fibres composées d'autres matériaux vitreux. La Figure 27 montre les domaines de transparences des principaux verres dont on parvient aujourd'hui à faire des fibres optiques. Les verres fluorés et les oxydes sont transparents jusqu'à plus de $5\ \mu\text{m}$, permettant ainsi d'envisager de couvrir des applications spectroscopiques en bande MWIR. Mieux encore, les verres de chalcogénures sont relativement transparents jusqu'à plus de $10\ \mu\text{m}$, ce qui permet d'envisager une couverture spectrale de la bande LWIR.

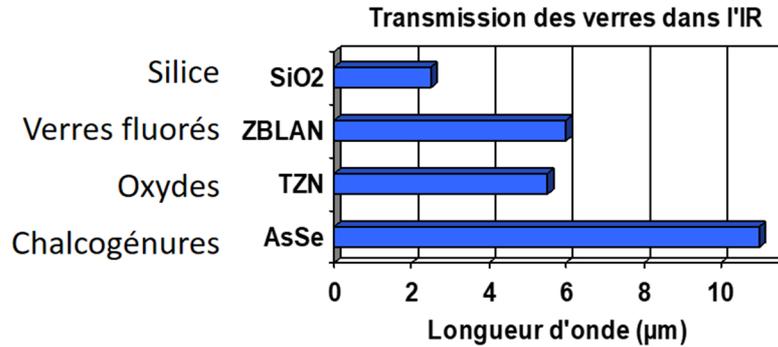


Figure 27 – Transparence des principales familles de matériaux qu’il est possible d’utiliser pour réaliser des fibres optiques. (source : M. Duhant, Onera)

Pour exploiter les propriétés très attractives de ces verres non siliceux, des travaux ont été menés au sein du Pôle Laser, en particulier dans le cadre de recherches visant à développer des sources fibrées d’un type particulier, dites à « supercontinuum ». C’est ainsi que grâce à une fibre en verre fluoré, et par le procédé de génération de supercontinuum sur lequel je reviendrai un peu plus loin, nous avons pu mener des travaux de spectroscopie par lidar fibré dans la bande MWIR, entre 3 et 4 µm (cf. chap.4.3 et le lidar SHADOAS). Par contre, les essais de génération supercontinuum menés au laboratoire dans des fibres en chalcogénures n’ont pas été suffisamment concluants (extrême fragilité des fibres testées), pour que nous puissions atteindre la bande LWIR.

c. Sources laser fibrées cohérentes : l’architecture MOPA

Bien qu’il existe des manières alternatives de procéder, la plupart des sources laser fibrées cohérentes développées au sein du Pôle Laser de mon unité de recherche sont conçues selon une architecture dite MOPA, pour Master Oscillator Power Amplifier (Amplification de puissance d’un oscillateur maître). Cette architecture est schématiquement représentée en Figure 28.

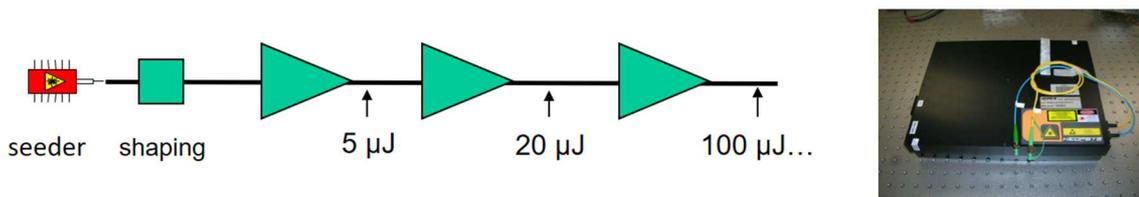


Figure 28 – Architecture et photo d’une source fibrée de type MOPA (source : C. Besson, Onera)

Le principe est d’utiliser un laser maître commercial, miniature, fibré, émettant en régime continu une faible puissance (typiquement quelques dizaines de mW), mais possédant en revanche un certain nombre des vertus requises par le système final, au premier rang desquelles sa longueur d’onde, mais aussi sa finesse spectrale, sa polarisation etc. Ensuite le signal de ce laser maître, également appelé « injecteur », est injecté vers des amplificateurs de puissance, eux aussi fibrés, éventuellement précédés d’un dispositif de mise en forme des impulsions (*pulse shaping*). L’amplification peut être répartie au sein de différents étages, chaque étage étant conçu avec une technologie adaptée pour augmenter progressivement la puissance émise, sans perdre les propriétés vertueuses du laser maître.

Généralement, les injecteurs utilisés dans nos architectures sont des diodes laser à rétroaction distribuée (DFB pour Distributed FeedBack, ou DBR pour Distributed Bragg Reflector). Ces diodes lasers sont de très petites dimensions (quelques cm²), robustes, et directement connectées à des fibres optiques monomodes et à maintien de polarisation. Pour les applications spectroscopiques, l'une de leurs qualités est aussi d'être accordable facilement sur plusieurs dizaines de GHz, avec une résolution de quelques dizaines de MHz, en jouant sur leur courant d'alimentation. Si cette plage d'accordabilité demeure insuffisante pour sonder plusieurs espèces de gaz répondant dans des domaines spectraux disjoints, elle permet toutefois de scanner une ou plusieurs raies d'absorption d'une même espèce chimique, ou parfois deux espèces si elles présentent des raies d'absorption très proches l'une de l'autre.

La technologie fibrée offre de nombreux degrés de liberté, non seulement pour diriger la lumière (coupleurs, interrupteurs optiques, isolateurs, circulateurs...) mais aussi pour la moduler en amplitude ou en phase (modulateurs acousto-optiques ou électro-optiques). L'existence sous forme fibrée de tous ces composants permet ainsi de réaliser des architectures aux fonctions très souples et très diverses, sans avoir à effectuer le moindre alignement optique, comme le montre par exemple la photo de la Figure 29.

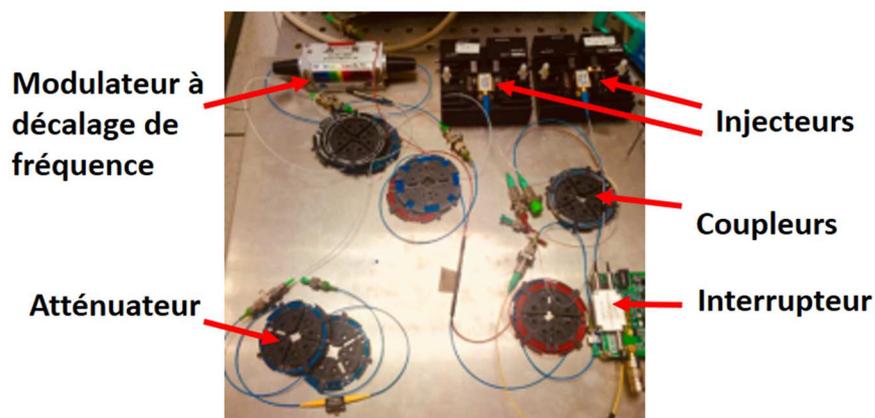


Figure 29 – Source laser pour lidar DIAL en optique fibrée (avant amplification). On distingue sur cette photo les injecteurs semi-conducteurs (diodes laser DFB) réglés aux fréquences ON et OFF du lidar DIAL, ainsi que différents composants fibrés permettant de réaliser des fonctions diverses : interrupteur bi-stable sélectionnant alternativement les injecteurs ON et OFF, couplage, atténuation, décalage de fréquence pour détection hétérodyne... La technologie fibrée permet de réaliser des montages tout à la fois robustes, stables, auto-alignés, et aux fonctions très variées.

En modulant en amplitude le signal continu de l'injecteur, il est possible d'obtenir des impulsions de durée, forme, et cadence de répétition contrôlables par les paramètres du modulateur. C'est un degré de liberté précieux, et qui n'est pas facilement accessible avec d'autres technologies. On peut également mettre en œuvre relativement aisément différentes techniques de spectroscopie modulée comme la FMS (Frequency Modulation Spectroscopy, Bjorklund 1980), la WMS (Wavelength Modulation Spectroscopy, Supplee et al. 1994), ou encore la CLADS (Chirped Laser Dispersion Spectroscopy, Wysocki et al. 2010). Je reviendrai sur ces techniques au chapitre 4.6.

Toutes ces possibilités de modulation permettent ainsi de proposer des schémas d'émission et de détection innovants. Au chapitre 4, on présentera ainsi une technique de spectroscopie par émission d'un mini-peigne de fréquence, exploitant un procédé de modulation de phase particulier associée à une détection cohérente. On voit ainsi que la simple association d'une diode laser et de composants fibrés de modulation permet de proposer des configurations de mesure extrêmement souples pour des applications de spectroscopie.

Le plus gros problème en technologie fibrée demeure toutefois l'amplification. Tout d'abord, amplifier un signal au sein d'un amplificateur lui-même fibré n'est possible que si l'amplificateur présente du gain à la longueur d'onde délivrée par l'injecteur. Il doit pour cela intégrer une fibre dite « active », c'est-à-dire présentant des éléments dopants (le plus souvent, de la famille des terres rares) capables d'amplifier le rayonnement incident par émission stimulée (sous pompage, donc). Or le gain permis par ces dopants est très variable selon la longueur d'onde. La Figure 30 illustre la bande de gain des trois principaux dopants employés dans les lasers fibrés : l'ytterbium (Yb) autour de $1\mu\text{m}$, l'erbium-ytterbium (Er,Yb) dans la bande telecom (1530-1570 nm), et le thulium (utilisé surtout au-delà de $2\mu\text{m}$ en lidar, l'atmosphère étant peu transparente en-deçà). Incidemment, cette figure montre également qu'il existe une très large différence de sécurité oculaire (Maximum Permitted Energy) entre la bande $1\mu\text{m}$ et les bande $1.5\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$. C'est l'une des raisons pour laquelle ces dernières sont privilégiées pour réaliser des systèmes lidars fibrés. En outre, on trouve dans ces bandes spectrales (cf. Figure 23) des transitions vibrationnelles exploitables pour la télédétection du CO_2 ($1.57\mu\text{m}$, $2.05\mu\text{m}$) et de H_2O ($1.53\mu\text{m}$, $2.05\mu\text{m}$).

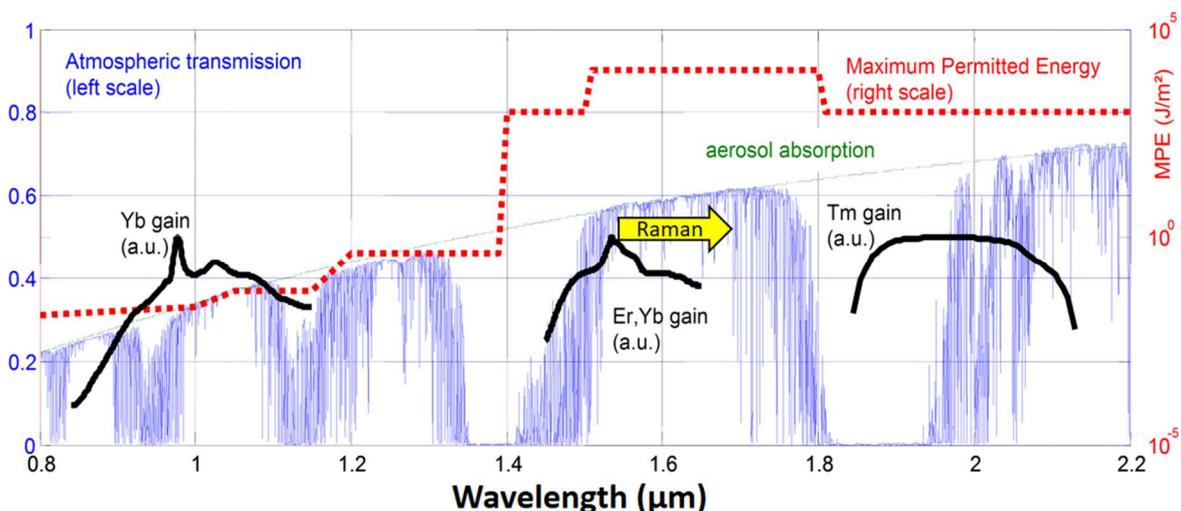


Figure 30 – Juxtaposition, dans la bande SWIR, de trois propriétés critiques pour la conception d'un lidar fibré : la transparence atmosphérique (courbe bleue), la sécurité oculaire (courbe rouge), et la bande de gain de différents dopants pour fibre en silice. (Source : Onera)

Pour aller « chercher » la bande d'absorption vibrationnelle du CH_4 à $1.65\mu\text{m}$ (cf. Figure 23), qui n'est couverte par aucun des ions dopants usuels dans les fibres silice, mes collègues du Pôle Laser ont ingénieusement mis à profit l'effet Raman. En effet, la diffusion Raman n'existe pas que dans l'atmosphère, mais aussi dans les matériaux. Or le décalage Raman Stokes dans la silice se situe autour de 13 THz par rapport à la longueur d'onde d'excitation. Il s'est ainsi révélé possible de susciter de l'émission stimulée Raman à $1.65\mu\text{m}$ (et donc d'amplifier le signal d'un injecteur à $1.65\mu\text{m}$), en pompant fortement à $1.54\mu\text{m}$ (soit 13 THz plus haut) une fibre silice bien choisie pour exalter l'effet Raman. La réalisation de cette source a fait l'objet du travail de thèse de P.Benoit (Benoit 2017), auquel le lecteur pourra se référer pour plus de détails.

La seconde grande difficulté pour amplifier fortement le signal injecteur dans un amplificateur fibré, sans perdre les propriétés de cohérence temporelle de l'injecteur, est liée à la diffusion Brillouin stimulée ou SBS (Stimulated Brillouin Scattering), qui survient dans les fibres optiques au-delà d'une certaine puissance crête. Ce phénomène, schématisé en Figure 31, résulte de l'interaction de l'onde optique incidente avec le réseau d'ondes acoustiques qui circule dans la fibre, issu des

fluctuation de densité de la silice à température ambiante. Ce réseau crée un miroir de Bragg mobile qui rétrodiffuse une onde Stokes, décalée de 11 GHz, et contra-propagative à l'onde laser. Cette onde Stokes interfère avec l'onde laser et donne lieu à des franges d'interférence, lesquelles suscitent à leur tour des ondes acoustiques par effet d'électrostriction de la fibre. C'est donc un effet auto-entretenu. Au-delà d'un certain seuil de puissance crête laser, nommé seuil Brillouin, la SBS prédomine et seule l'onde Stokes contra-propagative finit par être amplifiée, au détriment de l'onde laser. En outre, l'onde Stokes peut alors causer de graves dommages aux éléments optiques situés en amont de la fibre amplificatrice, qui ne sont normalement pas conçus pour recevoir un signal de haute puissance. La SBS est donc un effet à éviter absolument pour les applications lidar.

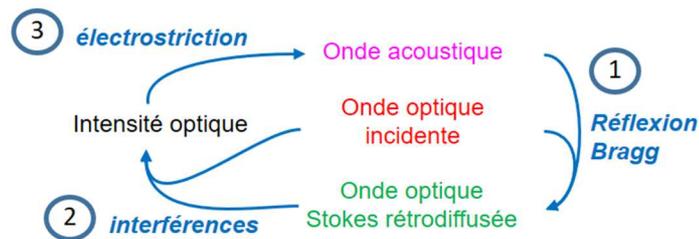


Figure 31 – Schéma résumant les interactions donnant lieu à l'effet Brillouin Stimulé (SBS) (Source : P. Benoit, Onera)

Le seuil Brillouin dans une fibre, et pour une onde laser cohérente (c'est-à-dire de faible largeur spectrale en regard de la largeur de cohérence Brillouin qui est de 40 MHz) est typiquement donné par la formule suivante :

$$P_{\max} \approx 21 \frac{A_{\text{eff}}}{g_B L_{\text{eff}}} \quad (7)$$

Où A_{eff} est l'aire effective de la fibre (m^2), g_B la valeur du gain Brillouin (m/W) et L_{eff} la longueur effective de la fibre. Dans une fibre standard à 1550 nm (monomode et à maintien de polarisation) l'aire effective est de $85\mu\text{m}^2$ et le gain Brillouin de $2 \cdot 10^{-11} \text{ m/W}$. Le seuil de puissance crête Brillouin est alors de $P_{\max}=90 \text{ W}$ dans un mètre de fibre, et de 9W pour une fibre de 10 m. Comme le gain d'une fibre amplificatrice est aussi croissant avec la longueur de fibre, il y a toujours un compromis à trouver entre la longueur de fibre et le seuil d'apparition de l'effet Brillouin.

En règle générale, pour favoriser le gain, on a toujours envie de repousser le seuil Brillouin le plus loin possible. La formule précédente montre que l'on peut pour cela :

- augmenter l'aire effective, c'est-à-dire le diamètre des fibres. Des fibres dites LMA (Large Mode Area) sont ainsi parfois employées. Toutefois, au-delà d'un certain diamètre, ces fibres à larges cœurs deviennent multimodes et le faisceau délivré perd de sa cohérence spatiale, ce qui peut être dommageable en particulier pour les lidars cohérents ;
- diminuer la valeur du gain Brillouin. Cette valeur dépendant en partie des propriétés du matériau, des fibres spéciales ont été progressivement développées avec des laboratoires et entreprises partenaires, qui présentent un gain Brillouin plus faible que les fibres standard. Une autre voie possible est d'appliquer un gradient de contrainte mécanique tout au long de la fibre, afin d'étaler spectralement la largeur du gain Brillouin (autrement dit « casser » sa cohérence temporelle) et par là même en réduire la valeur au pic. Cette technique, dont une méthode d'implémentation a été brevetée par mes collègues (Canat et al. 2012) est représentée en Figure 32 à droite. Elle à l'œuvre dans plusieurs des systèmes lidars qui seront détaillés au chapitre 4.

Grâce à ces différents dispositifs, des sources lasers fibrées cohérentes de grande puissance crête ont pu être développées avec succès, dépassant souvent plusieurs centaines de Watt crête. C'est le cas notamment de la source fibrée à 2051 nm (MOPA à amplificateur dopé Thulium) réalisée au cours du travail de thèse d'Erik Lucas (Lucas 2014, Figure 32 à gauche), puis remaniée au cours de la thèse de Julien Lahyani (Lahyani et al. 2020), qui sert de source au lidar HELENA CO₂/vent, et dont la puissance crête dépasse 600W. Pour le lidar VEGA CH₄/vent, la puissance crête de la source à 1645 nm (MOPA à amplificateur Raman) développée au cours de la thèse de Philippe Benoit (Benoit 2017), est quant à elle limitée à 50W. Mais la fibre amplificatrice est de cœur bien plus petit ($A_{\text{eff}}=17\mu\text{m}^2$) afin d'exalter l'effet Raman, ce qui abaisse également le seuil Brillouin. Sans recours à une technique d'élargissement Brillouin, la puissance crête de la source n'aurait pas excédé 10 W.



Figure 32 – Gauche : amplificateur fibré dopé Thulium à 2.05 μm , réalisé et intégré sous forme de rack au laboratoire (Source : E. Lucas, Onera) ; Droite : Fibre enroulée à laquelle on applique une contrainte mécanique distribuée longitudinalement, dans le but de diminuer le gain Brillouin et ainsi augmenter la puissance crête tolérée dans la fibre optique (Source : G. Canat, Onera).

d. Sources laser fibrées à supercontinuum

Peu avant 2010, des recherches ont été engagées, au sein de mon unité, sur une autre piste pour innover dans le domaine des sources lasers fibrées : celle des lasers à supercontinuum. Une source à supercontinuum est un laser qui émet de manière directive un rayonnement de très faible cohérence temporelle, et donc à l'inverse de très grande étendue spectrale (jusqu'à plusieurs μm).

Le processus de génération de supercontinuum dans un matériau met en jeu de nombreux effets non linéaires (effet Kerr, effet Raman, mélange à quatre ondes...). Les fibres optiques, qui permettent de confiner le champ électromagnétique lumineux dans une très faible surface de cœur, et sur de longues distances, sont donc des milieux particulièrement favorables à l'exaltation de ces effets non linéaires. Schématiquement, on peut représenter un laser fibré à supercontinuum par la Figure 33. Le rayonnement en sortie étant issu d'une fibre optique, la directivité du faisceau permet une forte concentration lumineuse sur une grande distance de propagation. Une telle source produit ainsi une luminance (en $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{nm}$) bien plus élevée que les sources à large bande plus classiques (lampes UV, corps noirs IR). Les développements de sources fibrées à supercontinuum dans mon unité se sont essentiellement tournés vers le domaine infrarouge, permettant d'envisager des applications civile (spectroscopie large bande) et de défense (illumination laser).



Figure 33 – Représentation très simplifiée d'une source fibrée à supercontinuum

Néanmoins, malgré le schéma simpliste de la Figure 33, il ne suffit pas d'envoyer beaucoup de puissance laser dans une fibre pour générer à sa sortie un supercontinuum de lumière dans l'infrarouge. Il a été montré (Dudley et al. 2006) que pour générer un supercontinuum s'étendant le plus loin possible dans l'infrarouge, il est nécessaire de pomper les fibres en régime de dispersion dit « anormal », c'est-à-dire à une longueur d'onde située au-delà de leur « zéro de dispersion » (Zero-Dispersion Wavelength, ou ZDW). Cela permet la création dans la fibre d'ondes particulières nommées « solitons », lesquelles font ensuite l'expérience, progressivement au cours de leur propagation, d'un auto-décalage fréquentiel vers l'infrarouge par effet Raman. Dans les fibres en silice standard, la ZDW est aux alentours de 1.3 μm , mais grâce à des techniques de microstructuration des fibres, il est possible d'abaisser cette valeur jusque vers 0.7-0.8 μm . On peut alors pomper la fibre en régime anormal de dispersion avec des lasers de pompe à 1 μm , où les puissances laser disponibles sont plus importantes. Vers 2010, plusieurs constructeurs maîtrisaient déjà cette technique, et nous avons pu nous procurer auprès de la société Koheras (aujourd'hui NKT Photonics) une source fibrée à supercontinuum émettant le spectre SWIR de la Figure 34.

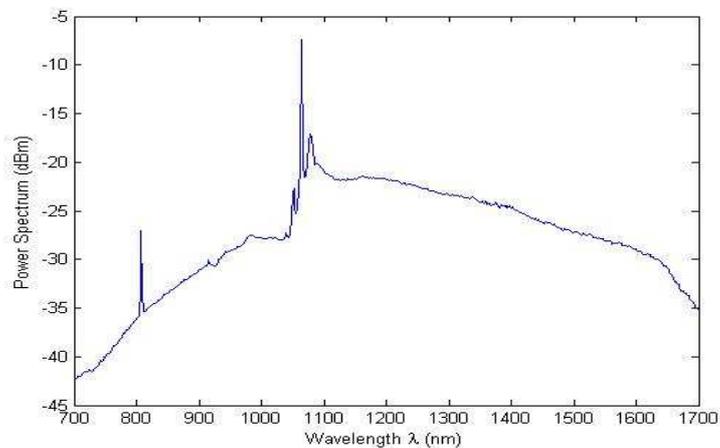


Figure 34 – Spectre de la source supercontinuum SWIR de Koheras (mesuré en 2010 au laboratoire). Le pic à 1064 nm correspond à la longueur d'onde du laser de pompe.

Cette source nous a abondamment servi comme source « d'entraînement », afin de réaliser des premières expériences lidar de spectroscopie large bande dans le SWIR, et surtout afin de développer des outils numériques génériques pour le traitement de signal et la prévision de performances de tels systèmes. Nous y reviendrons au chapitre 3.3 et 4.3.

Dans le but de développer une source fibrée à supercontinuum dans le MWIR, les recherches du laboratoire se sont orientées d'une part sur la simulation numérique du processus de génération de supercontinuum, et d'autre part sur l'utilisation de fibres non pas constituées de silice, mais de verres fluorés, de verres d'oxydes lourds, ou de verres de chalcogénures (cf. Figure 27). Je ne mentionnerai ici que les travaux sur les fibres en verres fluorés, qui ont été les plus fructueux, mais les résultats obtenus avec d'autres matériaux peuvent être consultés dans le mémoire de thèse de Matthieu Duhant (Duhant 2012). Les fibres en verres fluorés (plus précisément, en ZBLAN) qui ont été testées présentaient une ZDW à 1.6 μm . Plutôt que d'opter pour une démarche de microstructuration de ces fibres (déjà délicates) en vue d'abaisser la ZDW, il a été développé une source laser fibrée de haute puissance crête à 2 μm , afin de pomper directement les fibres en ZBLAN dans leur régime de dispersion anormal. La réalisation de cette source de pompage fut le fruit du travail de thèse de William Renard (Renard 2011). En utilisant cette source de pompe, Matthieu Duhant a pu réaliser une source supercontinuum entièrement fibrée, représentée en Figure 35.

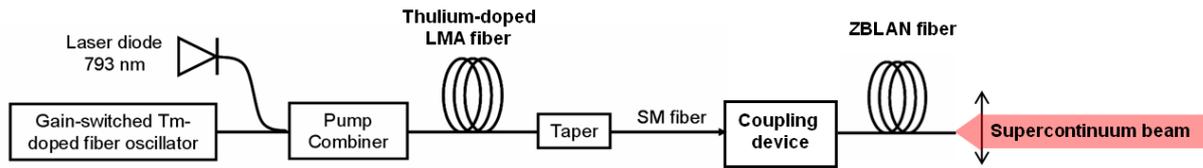


Figure 35 – Architecture de la source supercontinuum MWIR réalisée au laboratoire (Source Cézard et al. 2011)

Le spectre émis par cette source, présenté en Figure 36 (à gauche), s’étendait dans le MWIR jusqu’à plus de 4 μm , avec une puissance disponible d’environ 0.3 mW/nm à 3 μm , et 70% de la puissance totale (400 mW) convertie au-delà de 2.5 μm . En terme de luminance, cela représente à 3 μm environ 25 000 fois la luminance d’un corps noir idéal porté à une température de 10 000 K ! La Figure 36 (à droite) montre quant à elle une simulation montrant comment le supercontinuum se développe au fur et à mesure de la propagation dans la fibre en verre fluoré. J’ai moi-même effectué cette simulation, après un travail de « rationalisation » des codes de calcul développés par M. Duhant pendant sa thèse. Ce graphique montre bien le phénomène d’extension progressive du spectre vers l’infrarouge, lié à l’auto-décalage Raman subi par les solitons au cours de leur propagation.

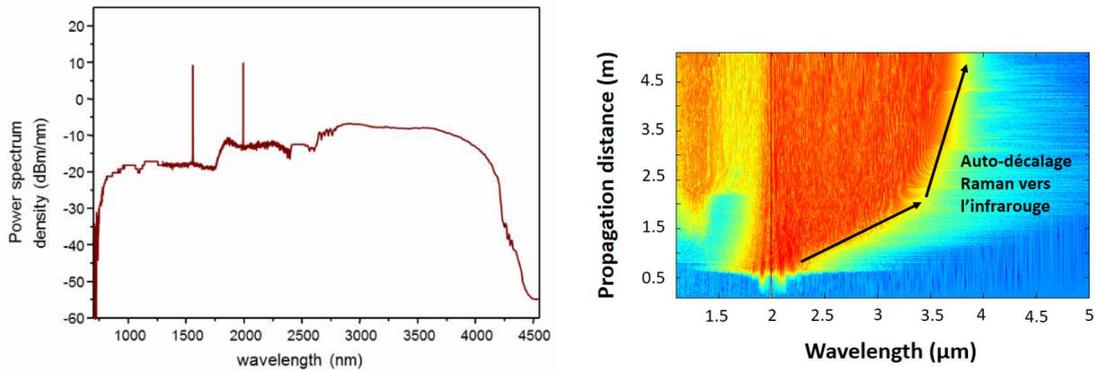


Figure 36 – (Gauche) Spectre d’émission de la source supercontinuum MWIR (Source : M.Duhant, Onera) (Droite) Simulation de la génération d’un supercontinuum au sein d’une fibre en verre fluoré

Cette source supercontinuum, capable d’accéder à la bande MWIR, était bien sûr très attractive pour des applications de spectroscopie d’absorption différentielle à large bande. Elle fut donc un outil privilégié au cours des travaux que j’ai menés sur cette thématique, de même que pour mon premier doctorant, Alexandre Dobroc, avec qui nous avons exploré le potentiel de ce type de source pour des applications lidars. Je reviendrai sur ces travaux au chapitre 4.3.

e. Sources laser à cristaux de type NesCOPO (Nested Cavities OPO)

Les sources laser NesCOPO (Nested Cavities Optical Parametric Oscillators) sont des sources cristallines basées sur le principe de la conversion de fréquence par des cristaux non linéaires. Un cristal non linéaire est un milieu qui développe une composante de polarisation non linéaire sous l’effet d’un champ laser incident intense. Comme le schématise la Figure 37, le cristal permet alors de générer deux ondes, appelées signal et complémentaire, de fréquences ω_s et ω_c , à partir d’une onde de fréquence pompe ω_p . Ces trois ondes sont liées par la relation de conservation de l’énergie $\omega_p = \omega_s + \omega_c$.

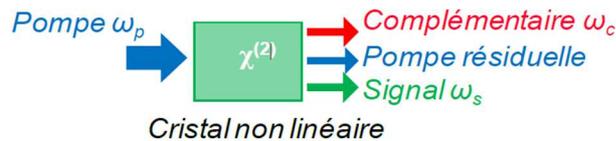


Figure 37 – Principe de la conversion paramétrique optique dans un cristal non linéaire. (Source : Barrientos Barria 2014)

L'efficacité de génération des ondes signal et complémentaire dépend de divers facteurs, dont le plus important est l'accord de phase : les deux ondes doivent rester en phase avec l'onde de pompe au cours de leurs propagations dans le milieu cristallin. Cette relation de phase peut être vérifiée au sein de matériaux biréfringents particuliers (par exemple le KTP – titanyl phosphate de potassium), mais la condition d'accord de phase fixe alors des contraintes importantes sur le choix du matériau, ainsi que sur la polarisation et la direction de propagation des trois ondes.

Afin de bénéficier de matériaux présentant des propriétés non linéaires plus favorables et moins contraignantes, on peut se satisfaire d'un accord de phase non parfait (quasi accord de phase) à condition de moduler périodiquement les domaines cristallins du matériau, de manière à ce que la puissance des ondes signal et complémentaires générées continue d'augmenter au fur et à mesure de leur propagation dans le cristal, au lieu de se reconvertir en onde de pompe. Un cristal fréquemment employé en quasi-accord de phase est le PPLN (Periodically Poled Lithium Niobate).

En insérant un cristal de PPLN dans une cavité optique, il est possible de réaliser un Oscillateur Optique Paramétrique (OPO). En imbriquant deux cavités l'une dans l'autre (Nested Cavities), chacune faisant entrer en résonance l'une des deux ondes générées, la cavité devient « doublement résonante ». Avec une telle architecture, et à condition que l'onde de pompe incidente soit elle-même spectralement monomode, il devient possible de générer en sortie deux ondes également monomodes, mais aussi de faire varier finement (sur quelques nm) la fréquence des ondes générées en jouant sur la position des miroirs de cavité, selon un effet « Vernier » (Mussio et al. 2010). En jouant sur la température du cristal, une accordabilité plus large est accessible (typ. 100 nm). Enfin, en jouant sur la position transverse du cristal de PPLN dans la cavité (découpé en plusieurs « pistes » de pas différents, et dont l'un des plans de coupe est prismatique pour maintenir une bonne relation de phase des ondes sur une large gamme de longueurs d'onde) il est également possible de bénéficier d'une accordabilité encore plus large, pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de nm en longueur d'onde. La conjugaison de ces différents dispositifs constitue ce qui a été nommé architecture NesCOPO (Nested Cavities OPO) (Hardy et al. 2011). Illustrée en Figure 38, cette architecture très innovante découle de travaux sur les OPO à double cavité résonante initiés au département DPHY de l'Onera dès la fin des années 90. Cette architecture a fait également l'objet d'un brevet (Raybaut et al. 2011), et d'un transfert de technologie en 2012 vers la PME Blue Industry and Science.

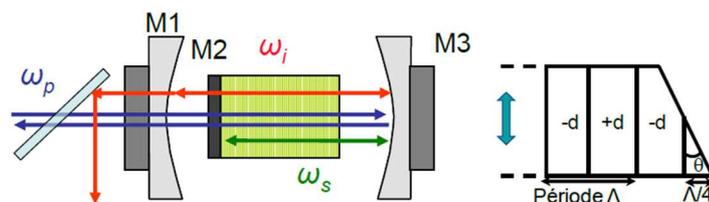


Figure 38 – Architecture d'un NesCOPO, ou Nested Cavities OPO (Source : Barrientos Barria 2014)

L'architecture NesCOPO a été par la suite intégrée au sein de différents dispositifs optiques, de puissances croissantes au fil du temps, et déclinée dans différents domaines de longueurs d'onde. Au

cours de mes travaux, j'ai eu principalement l'occasion de travailler, avec mon doctorant Alexandre Dobroc, sur des expériences de lidar IP-DIAL à partir d'un NesCOPO amplifié en bande MWIR (3.3-3.7 μm) mis au point par Jessica Barrientos Barria ([Barrientos Barria 2014](#)). Le dispositif est représenté en Figure 39. J'ai également travaillé plus tard à l'étude des performances d'un lidar nommé MICLID, également basé sur un NesCOPO, mais au sein d'une architecture plus complexe permettant d'accéder à la bande LWIR ([Melkonian 2020](#)). Nous reviendrons sur ces deux systèmes dans le chapitre 4.4. D'autres développements de cette technologie ont également eu lieu autour de 2 μm ([Cadiou 2017](#)).

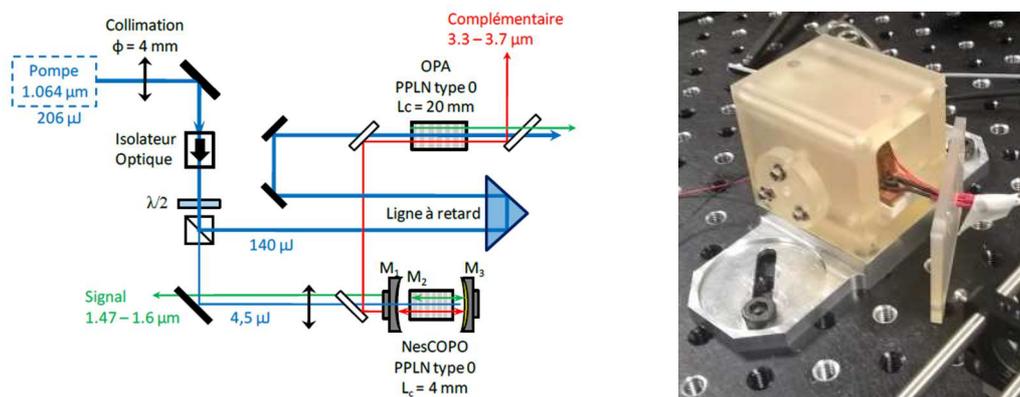


Figure 39 – Gauche : Architecture d'ensemble de l'émetteur NesCOPO amplifié (par un second cristal de PPLN) utilisé en bande MWIR (Source : [Barrientos Barria 2014](#)), Droite : photo d'un NesCOPO miniaturisé à 2 μm (Source : M. Raybaut, Onera)

Ces architectures sont naturellement très intéressantes pour des systèmes lidars. Elles permettent une émission impulsionnelle, monomode, de forte puissance crête, et largement accordable. Les NesCOPO sont donc bien placés pour répondre à des besoins de mesure à longue distance, exigeant une forte puissance impulsionnelle, ou bien pour des systèmes multi-espèces exigeant une grande accordabilité spectrale. En revanche, les NesCOPO sont directement impulsionnels, et à la différence des architectures fibrées de type MOPA, il n'est pas aisé de jouer sur les profils temporels et spectraux des impulsions émises. Ils ne donnent pas accès non plus à un signal injecteur continu qui puisse servir d'oscillateur local pour réaliser des systèmes à détection cohérente. Leur capacité à atteindre de fortes puissances crêtes incite d'ailleurs à les utiliser plutôt dans un régime de basse cadence de répétition (souvent inférieure à 100 Hz), ce qui n'est pas non plus favorable à la détection cohérente (laquelle requiert de fortes cadences de répétition afin de moyenniser le phénomène de speckle atmosphérique). Pour ces deux raisons, les émetteurs cristallins à NesCOPO sont, en règle générale, plus adaptés aux dispositifs à détection directe, alors que les émetteurs fibrés de type MOPA s'accordent particulièrement bien avec la détection cohérente.

Une problématique significative des NesCOPO, que l'on ne retrouve pas de manière aussi aigüe avec les émetteurs fibrés, concerne leur stabilité thermo-mécanique. En effet ces architectures comportent deux cavités laser imbriquées, contenant des éléments motorisés (via des platines piezo-électriques) et thermalisés (via des fours de chauffage), et nécessitant une grande précision d'alignement pour permettre l'oscillation laser. En outre, il peut être nécessaire, comme le montre la Figure 39 (gauche), de retarder l'onde de pompe au moyen d'une ligne à retard si l'on désire utiliser une seule et même pompe pour l'oscillateur et pour le ou les étages d'amplifications. Les sources lasers basées sur des émetteurs NesCOPO comportent donc en règle générale un assez grand nombre d'éléments optiques répartis sur un banc, dont il faut assurer la stabilité thermique et

mécanique. Bien évidemment, des efforts et des améliorations considérables ont été réalisés au fil du temps. La Figure 39 (droite) montre par exemple une photo de cavité NesCOPO miniaturisée.

f. Conclusion

Cette section a permis de présenter, je l'espère avec clarté, les principales technologies laser dont j'ai pu bénéficier au cours de mes travaux en spectroscopie infrarouge. Grâce aux efforts et à l'inventivité des équipes de l'Onera spécialisées dans les sources laser, ces technologies innovantes m'ont permis à mon tour de proposer, de développer et de tester de nouveaux systèmes lidars, sur lesquels on reviendra au chapitre 4.

On me demande souvent quelle est la technologie la plus prometteuse, la plus performante, entre les sources fibrées et les sources cristallines de type NesCOPO. Ne comptez pas sur moi pour arbitrer le match ! Y-a-t-il seulement un match ? Je ne le crois pas. Probablement, pour certaines applications précises, l'avenir permettra-t-il de sélectionner une technologie plus adaptée que l'autre. Mais vu d'un peu plus loin, il m'apparaît clair que les technologies fibrées et NesCOPO disposent chacune d'avantages (que l'on cherche à exploiter) et d'inconvénients (que l'on cherche à circonvier), qui ne les mettent pas systématiquement en concurrence. On constate clairement une tendance à l'amélioration continue de la robustesse thermo-mécanique des systèmes à NesCOPO, de même qu'une augmentation continue du seuil Brillouin dans les sources fibrées, permettant d'en extraire de plus en plus de puissance crête. Ces deux technologies offrent ainsi des perspectives particulièrement enthousiasmantes pour de futures applications lidar, et je suis convaincu que ces deux technologies trouveront leurs places, tant l'espace des possibles est grand.

g. Références

- **Barrientos-Barria J.**, « Développement de deux instruments LIDAR multi-longueurs d'onde et multi-espèces à base de sources paramétriques », Thèse de Doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, soutenue le 1^{er} décembre 2014
- **Benoit P.** « Conception et réalisation d'un amplificateur Raman fibré mono-fréquence à 1645 nm pour la mesure de méthane par LIDAR », Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1, soutenue le 12 mai 2017
- **Bjorklund**, "Frequency modulation spectroscopy : a new method for measuring weak absorption and dispersion" Optics Letters, Vol.5 no.1, 1980
- **Cadiou E.**, "Lidar DIAL multi-espèces à base de sources paramétriques optiques pour la détection des gaz à effet de serre depuis l'espace", Thèse de Doctorat de l'Université Paris-Saclay, soutenue le 20 décembre 2017.
- **Canat G.**, Lombard L., Le Gouët J., Fleury D. « Optic fiber amplifier having a high brillouin threshold and method for making such an amplifier », EP2878043B1 (2012) (active patent)
- **Canat G.**, Renard W., Lombard L., Fleury D. « Device comprising an optical fiber having a high brillouin threshold and method for manufacturing such a device », (2014) US9653875B2 (active patent)
- **Cézard N.**, A. Dobroc, G. Canat, M. Duhant, W. Renard, C. Alhenc-Gelas, S. Lefebvre, and J. Fade "Supercontinuum laser absorption spectroscopy in the mid-infrared range for identification and concentration estimation of a multi-component atmospheric gas mixture", Proc. SPIE 8182, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VII, 81820V (2011).
- **Dudley J.**, G. Genty, and S. Coen, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," Rev. Mod. Phys., vol. 78, pp. 1135–1184, Oct 2006.
- **Duhant M.**, « Etude des sources supercontinuum à fibres transparentes dans le moyen infrarouge », Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne, soutenue le 12 octobre 2012.

- **Hardy B.**, A. Berrou, S. Guilbaud, M. Raybaut, A. Godard et M. Lefebvre. (2011) « Compact, single-frequency, doubly resonant optical parametric oscillator pumped in an achromatic phase-adapted double-pass geometry. », *Optics letters*, vol. 36, no 5, p. 678-680.
- **Lahyani J.**, J. Le Gouët, F. Gibert, and **N. Cézard**, “2.05- μm all-fiber laser source designed for CO₂ and wind coherent lidar measurements”, *submitted to Applied Optics* (Dec. 2020)
- **Lucas E.**, « Développement d’une source laser à fibre dopée thulium pour la génération d’impulsions cohérentes, linéairement polarisée et de forte puissance à 2050 nm », Thèse de Doctorat de Télécom ParisTech, soutenue le 02 décembre 2014.
- **Mussio L.**, B. Hardy, M. Raybaut, A. Godard, A. K. Mohamed, and M. Lefebvre, “Vernier frequency sampling – a new approach for broadband high-resolution spectroscopy,” in *Conference on Lasers and Electro-Optics 2010*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CWH4.
- **Raybaut M.**, B. Hardy, A. Godard, M. Lefebvre, “Oscillateur paramétrique optique à cavités imbriquées pour le balayage rapide en fréquence”, EP250387B1 (2011) (active patent)
- **Renard W.** « Etude et réalisation de sources laser fibrées impulsionnelles de forte puissance autour de 2 μm », Thèse de Doctorat de l’Ecole doctorale de l’Ecole Polytechnique, (2012)
- **Suplee**, Whittaker, Lenth, “Theoretical description of frequency modulation and wavelength modulation spectroscopy” *Applied Optics* vol.33 no.27, 1994
- **Wysocki G.** and D. Weidmann, “Molecular dispersion spectroscopy for chemical sensing using chirped mid-infrared quantum cascade laser,” *Opt. Express* 18, 26123-26140 (2010)

3. Outils et méthodes de traitement de signal et de prévision de performance

a. Introduction

Avant de construire un prototype lidar, l’anticipation de ses performances attendues est indispensable pour se convaincre qu’il va répondre au besoin de mesure. Après l’avoir construit, il est tout aussi indispensable de traiter les signaux avec des méthodes performantes afin d’en extraire les mesures atmosphériques souhaitées avec le maximum de précision possible. Idéalement, la précision des mesures réalisées devrait d’ailleurs concorder avec celle prévue par le modèle de performance. Pour atteindre ce but (qui n’est pas une utopie !), il est nécessaire d’une part que le modèle instrumental soit suffisamment fidèle à la réalité, c’est-à-dire que les données anticipées soient réalistes, ou pour mieux dire *vraisemblables*. D’autre part, les méthodes de traitement de signal doivent être judicieusement choisies et testées, car toutes ne sont pas de performances équivalentes.

Dans cette partie, nous allons détailler les outils que nous avons utilisé en matière de prévision de performance et de traitement de signal, pour les trois principaux sujets de télédétection que sont :

- L’estimation, parfois aussi appelée quantification : il s’agit d’estimer la valeur numérique du ou des paramètres d’intérêt rendus mesurables par le signal lidar : la vitesse du vent, la température de l’air, la concentration d’une ou plusieurs espèces de gaz... ;
- La détection : il s’agit de prendre une décision à choix limités par rapport à une question posée. Nous parlerons ici du cas le plus simple, à savoir la prise d’une décision binaire entre deux hypothèses, permettant par exemple de décider si oui ou non, le lidar a détecté tel gaz dangereux dans la ligne de visée ;
- L’identification : il s’agit de choisir, parmi une liste de candidats potentiellement présents, quels sont ceux présents dans le signal. Dans le cas de la détection de gaz, par exemple, il s’agit de trouver quelles sont les espèces chimiques présentes dans la ligne de visée lidar.

La notion mathématique et statistique de vraisemblance du signal sera au cœur du sujet, et nous verrons comment elle intervient à la fois dans le domaine de la prévision de performances et du traitement des signaux lidar.

b. Estimation (ou quantification)

Le but de l'estimation est de produire les valeurs estimées des paramètres atmosphériques recherchés, à partir des signaux lidar observés. C'est donc une action de quantification. Appelons θ le vecteur colonne contenant les M paramètres inconnus que l'on recherche. Nous verrons par exemple au chapitre 4.1 le cas d'un système lidar mesurant la vitesse radiale u_r de l'air, sa température T, sa densité ρ , et le rapport de diffusion Mie/Rayleigh α : dans ce cas $\theta = [u_r, T, \rho, \alpha]^T$. Ou encore, au chapitre 4.3, nous parlerons de lidar mesurant le produit concentration-distance CL (en ppm.m) de diverses espèces de gaz, auquel cas $\theta = [CL_1, CL_2, \dots, CL_M]^T$.

Supposons que l'on observe un signal muni de N valeurs observables (N pixels d'une caméra, N échantillons d'un signal temporel ou spectral etc.), et dépendant globalement du vecteur θ . Il est alors utile d'établir la fonction de vraisemblance du signal. Cette fonction de vraisemblance, notée Λ , décrit à quel point le signal que l'on observe est statistiquement vraisemblable si l'on suppose une certaine valeur du vecteur paramètre θ . Mathématiquement, il s'agit simplement de la probabilité d'observer les N signaux mesurés sachant θ . On peut l'écrire :

$$\Lambda(\theta_1, \dots, \theta_M) = P_{S_1, \dots, S_N}(s_1, \dots, s_N | \theta_1, \dots, \theta_M) \quad (8)$$

Où S_1, \dots, S_N sont les variables aléatoires associés aux N signaux disponibles.

Cette fonction de vraisemblance est extrêmement utile pour deux raisons. Tout d'abord, elle forme la base de l'estimateur paramétrique dit « au maximum de vraisemblance » du vecteur paramètre θ . En effet, il paraît sensé d'estimer comme étant le bon vecteur θ celui qui maximise la probabilité d'obtenir le signal effectivement observé. La valeur estimée du vecteur paramètre θ , au maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Estimator ou MLE), est alors simplement :

$$\hat{\theta}_{MLE} = \arg(\max \Lambda(\theta)) \quad (9)$$

D'une manière équivalente, et souvent plus utilisée, l'estimateur MLE est aussi celui qui minimise la fonction $\psi = -2 \ln \Lambda(\theta)$ (log-vraisemblance négative) :

$$\hat{\theta}_{MLE} = \arg(\min \psi(\theta)) \quad (10)$$

Dès lors que l'on parvient à formuler la fonction de vraisemblance, de multiples techniques de minimisation de fonction peuvent ensuite être employées pour identifier le vecteur paramètre $\hat{\theta}_{MLE}$ (méthode des gradients, méthode hessienne de Newton...).

Le deuxième intérêt de cette fonction de vraisemblance est qu'elle forme la base du calcul de la matrice d'information de Fisher (Fisher Information Matrix - FIM) et subséquemment, des bornes de Cramer-Rao du système lidar modélisé (Cramer-Rao Bounds - CRBs), données par :

$$FIM_{ij} = -E \left[\frac{d^2 \ln \Lambda}{d\theta_i d\theta_j} \right] \text{ où } E \text{ est l'opérateur d'espérance mathématique} \quad (11)$$

$$CRB_{\theta_i} = \left[(FIM^{-1})_{ii} \right]^{1/2} \quad (12)$$

Le calcul des bornes de Cramer-Rao (que l'on trouve donc dans la diagonale de la matrice de Fisher inverse) représente un excellent outil pour anticiper les performances prévisionnelles d'un système lidar. Ces bornes représentent en effet l'écart-type minimal de mesure pouvant être atteint par un estimateur (non-biaisé) quel qu'il soit. En les calculant, on peut donc évaluer la limite théorique à la précision d'une mesure, dans des conditions données, mais sans nécessairement se soucier de l'estimateur que l'on va utiliser (ce qui permet aussi de dissocier le travail qui consiste à prévoir les performances d'un système de celui qui consiste à traiter les signaux expérimentaux).

Bien sûr, on souhaitera idéalement que l'estimateur mis au point soit non biaisé, et que son écart-type s'approche le plus possible de celui donné par les bornes de Cramer-Rao. D'ailleurs, on peut justement montrer (Van Trees 1997) que l'estimateur au maximum de vraisemblance (MLE) est « asymptotiquement » non-biaisé et « efficace » au sens statistique. C'est-à-dire que si l'on dispose d'une infinité d'échantillons de signal (c'est le sens du mot asymptotique), alors l'absence de biais de sur l'estimation MLE du vecteur θ est garantie, de même que le fait d'atteindre en écart-type les CRB pour chaque paramètre de θ . Les propriétés de l'estimateur MLE sont donc très attractives, même si dans la pratique, puisque l'on ne dispose jamais d'une infinité de données, il convient tout de même d'en vérifier les performances par des tests statistiques (de type Monte-Carlo).

La fonction de vraisemblance, l'estimation au maximum de vraisemblance, l'information de Fisher, et les Bornes de Cramer-Rao, sont ainsi des notions fondamentalement intriquées. Je dois dire que ces notions de statistiques, « découvertes » au cours de ma thèse (en suivant le sillage ouvert devant moi par la thèse de Matthieu Valla sur les lidars Doppler cohérents - Valla 2005), ont beaucoup attisé ma curiosité et mon intérêt, et que je m'en suis par la suite abondamment servi au cours de mes travaux.

Par exemple, pour le lidar à diffusion de Rayleigh détaillé au chapitre 4.1, j'ai calculé les CRB d'un lidar pour l'estimation conjointe de 4 paramètres atmosphériques (vent, température, densité, rapport de diffusion), dans le cas d'une collection de signaux Poissoniens (pixels d'une caméra), dépendants non-linéairement du vecteur paramètre θ recherché. J'ai par ailleurs utilisé un estimateur MLE pour estimer θ à partir des signaux caméra enregistrés.

Pour les lidars à absorption différentielle en bande large (lidars supercontinuum ou à NesCOPO accordables), détaillés au chapitre 4.3, nous avons, avec mes collaborateurs, calculé les CRB pour l'estimation de la concentration de multiples espèces de gaz, dans le cas de signaux de statistiques gaussiennes mais avec des conditions de filtrage particulières. De même, plusieurs estimateurs ont été développés et testés (estimateurs linéaires au moindre carrés, moindre carrés pondérés, estimateur non-linéaire au maximum de vraisemblance...).

Pour les lidars cohérents DIAL-Doppler présentés aux chapitres 4.5 et 4.6 (VEGA et HELENA), le calcul des CRB a là aussi été mené, à partir d'une collection d'échantillons spectraux de puissance,

munis de statistiques exponentielles négatives (en raison du phénomène de speckle atmosphérique). Cette méthode nous a ainsi permis d'évaluer, par une méthode unifiée, les performances théoriques optimales d'un lidar pour la mesure simultanément du vent, et de la concentration d'un gaz.

c. Détection

Il est parfois attendu d'un système métrologique qu'il délivre en priorité non pas la mesure quantifiée d'un ou de paramètres physiques, mais qu'il délivre une décision binaire, de type « oui ou non », sur une question posée. Par exemple, pour un lidar de détection de gaz, la question typique peut être simplement « Détecte-t-on, oui ou non, la présence de ce gaz sur la ligne de visée laser ? », afin de prendre des dispositions le cas échéant. Par exemple, nous verrons en section 4.4 le cas du lidar MICLID pour la détection de gaz de combat, qui peuvent être mortels. Dans ce type de scénario, on attend d'un lidar qu'il donne l'alarme si une substance dangereuse est détectée au-delà d'un certain seuil de sécurité. On est alors confronté au dilemme classique, qui consiste à minimiser la probabilité de fausse alarme (éviter les faux positifs), tout en maximisant la probabilité de bonne détection (détecter les vrais positifs).

L'une des fonctions les plus utilisées, pour tester la véracité ou non d'une hypothèse binaire, est basée sur le rapport des fonctions de vraisemblance du signal sous l'une ou l'autre des éventualités envisagées. Par exemple, si la question posée est « Ce gaz-cible est-il détecté ? », on note H_0 l'hypothèse « Non », et H_1 l'hypothèse « Oui ». Le test du rapport de vraisemblance (Likelihood Ratio Test – LRT) s'écrit alors :

$$T(\mathbf{S}) = \ln \left(\frac{P(\mathbf{S} | H_1)}{P(\mathbf{S} | H_0)} \right) \text{ où } \mathbf{S} \text{ est la collection des données observables } S_1 \dots S_N \quad (13)$$

Cette fonction est positive si la vraisemblance selon H_1 est supérieure à celle selon H_0 , et négative sinon. On pourrait simplement se servir du signe de cette fonction, et déclarer que l'hypothèse H_1 est vraie si elle est positive, et que H_0 est vraie si elle est négative. D'un autre côté, il n'est pas certain que ce choix de seuil du test (à zéro dans ce cas) permette d'atteindre la probabilité de fausse alarme ou de bonne détection souhaitée. Pour respecter ces exigences, il est nécessaire de fixer soigneusement le seuil auquel comparer la fonction LRT. Le test dit de Neyman-Pearson ([Van Trees 1997](#)) vise ainsi à maximiser la probabilité de détection (notée P_D), en comparant la fonction LRT à un seuil λ , lequel est positionné de manière à vérifier une spécification de probabilité de fausse alarme (notée P_{FA}). Il s'écrit :

$$T(\mathbf{S}) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \lambda(P_{FA}) \quad (14)$$

En établissant les densités de probabilités du test T selon H_1 et selon H_0 , notées $P(T|H_1)$ et $p(T|H_0)$, il est alors possible de placer le seuil du test vérifiant le taux de fausse alarme désiré. La Figure 40 illustre ce procédé dans le cas simple où les densités de probabilités du test sont gaussiennes. Les deux statistiques sont séparées par une distance d , qui va dépendre des valeurs du vecteur paramètre θ . Plus ce dernier induit de différence de vraisemblance entre les deux hypothèses, plus cette distance est grande, et la décision aisée. La probabilité de Fausse Alarme (PFA) représente alors l'intégrale de $P(T|H_0)$ au-dessus d'un certain seuil. On peut donc positionner le

seuil pour respecter une valeur donnée de PFA. La probabilité de détection (PD) peut ensuite être obtenue en calculant l'intégrale de $P(T|H_1)$ au-delà du seuil obtenu. On peut bien sûr procéder dans l'autre sens si l'on s'est fixé prioritairement une spécification en probabilité de détection.

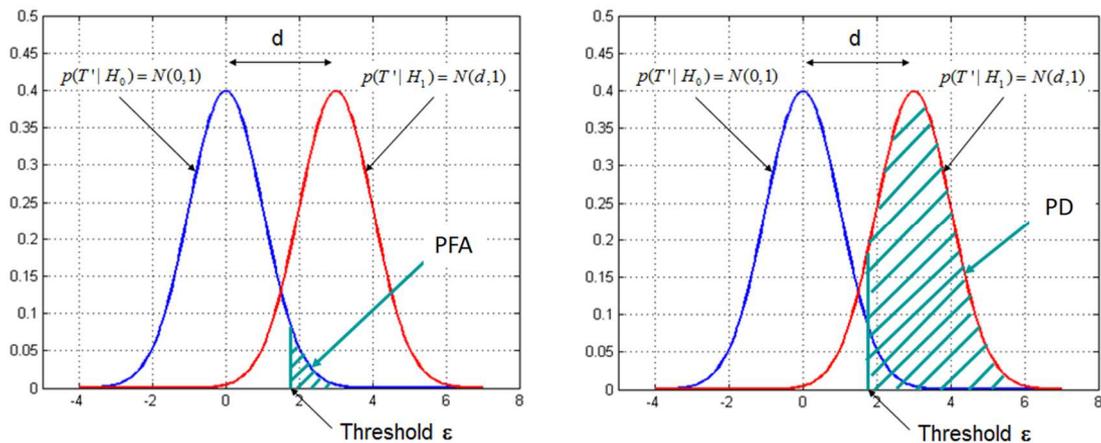


Figure 40 – Illustration des probabilités conditionnelles $P(T'|H_0)$ et $P(T'|H_1)$, où T' est une expression normalisée du test T , permettant de ramener les densités de probabilités gaussiennes à des lois normales standard.

Ces courbes montrent bien qu'il n'est pas possible d'avoir en même temps une très faible probabilité de fausse alarme, et une très grande probabilité de détection...sauf si la distance entre les deux statistiques du rapport de vraisemblance est élevée. On appelle Caractéristique Opérationnelle du Récepteur, plus souvent nommée courbe ROC (Receiver Operational Characteristic) la courbe permettant de calculer PD en fonction de PFA. Cette courbe ROC permet d'afficher simplement les performances escomptées du système, en matière de détection binaire. Par exemple, toujours pour des statistiques gaussiennes, les courbes ROC d'un système de détection, en fonction de la distance d qui les sépare, sont données par la Figure 41.

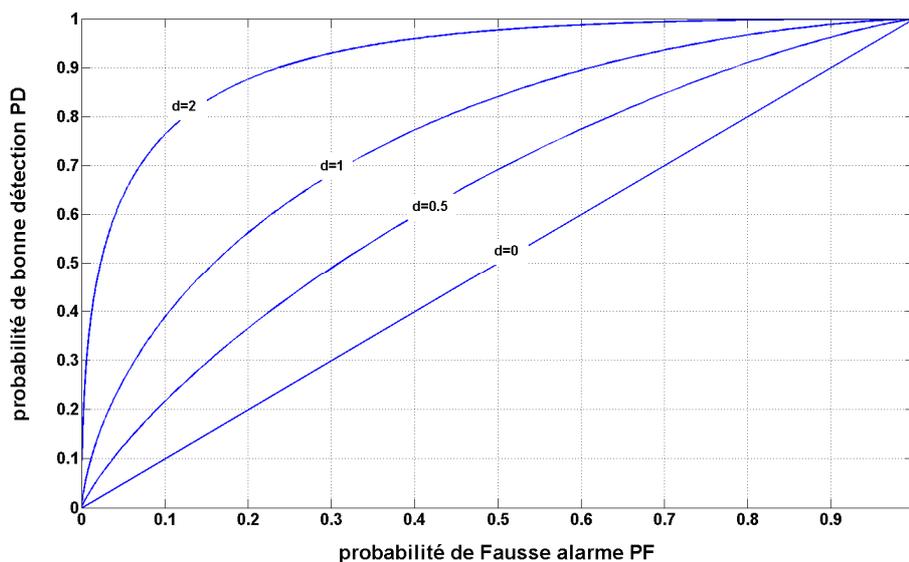


Figure 41 – Courbes ROC d'un système de détection binaire présentant des statistiques gaussienne du test LRT selon H_1 ou H_0 . Si la distance est nulle, la PFA et la PD sont égales, et le système est totalement indécis. Plus la distance d augmente, plus il est facile d'obtenir de faibles valeurs de PFA et de hautes valeurs de PD. Pour un système de détection de gaz, la distance d est typiquement proportionnelle à la concentration du gaz testé, et inversement proportionnelle à l'écart-type des mesures.

Au chapitre 4.4, nous illustrerons les histogrammes de test et les courbes ROC prévisionnelles que nous avons calculées pour le lidar MICLID, en comparant le cas d'une détection de gaz dans des conditions de test contrôlées et dans des conditions de test en aveugle (*blind test*).

d. Identification

La troisième grande catégorie d'opération que l'on peut souhaiter réaliser à l'aide d'un système de télédétection est d'identifier la signature, dans le signal reçu, de certains « marqueurs » et/ou l'absence d'autres. Dans certains scénarios de sondage atmosphérique par lidar, par exemple le contrôle d'une installation non coopérative, ou fonctionnant dans des conditions exploratoires, les espèces gazeuses en présence ne sont pas forcément connues à l'avance, ni dans leur nature, ni dans leur quantité. Il est donc nécessaire de procéder d'abord à une phase d'identification des composés en présence, avant de pouvoir réaliser l'estimation de leurs concentrations respectives.

Dans le domaine de l'identification, les différents « marqueurs » recherchés (pour nous, les espèces de gaz potentiellement présentes) sont souvent appelés des « régresseurs », en référence au processus de régression du signal qui sous-tend l'opération d'identification. Il existe de nombreuses techniques d'identification des régresseurs d'un signal (choisis parmi une base), notamment l'analyse en composantes principales (ACP). Celle-ci implique néanmoins souvent de fixer un seuil en deçà duquel les régresseurs ne seront pas retenus, ce qui implique une forme de « supervision », c'est-à-dire le choix d'un seuil par un opérateur, duquel va dépendre le résultat de l'identification.

Sans prétendre avoir exploré en détail le potentiel des méthodes ACP (dont il existe certainement des variantes non supervisées), nous nous sommes intéressés à une autre technique d'identification, qui est celle de la régression à complexité pénalisée. Le principe en est simple, et part du constat que si l'on utilise tous les régresseurs d'une base exhaustive disponible, le « fit » du signal est forcément excellent, et produit un résidu RSS (Residual Sum of Squares) très faible. Mais une telle opération conduit à un sur-ajustement des données par les régresseurs, qui s'ajustent exagérément aux pics de bruit (*noise over-fitting*). Le modèle de régression présente alors une très grande fidélité aux données (RSS très faible, notons d'ailleurs que minimiser le RSS revient à maximiser la fonction de vraisemblance pour des signaux gaussiens), mais une faible plausibilité : le nombre de régresseurs est trop élevé, débouchant sur un modèle explicatif du signal trop *complexe*.

Dès lors, on peut chercher à pénaliser les modèles trop complexes, en appliquant au RSS une pénalité à chaque ajout de régresseur : c'est le principe de l'identification par régression à complexité pénalisée. L'implémentation de ce type de technique est relativement simple. Elle passe par un processus itératif au cours duquel à chaque itération K , un nouveau régresseur (une nouvelle espèce de gaz) est identifié parmi la base disponible, parce qu'il minimise un critère noté $\Delta(K)$ qui s'exprime par :

$$\Delta(K) = \ln(RSS(K)) + f(K) \tag{15}$$

Où $RSS(K)$ est le résidu du signal après régression par les K régresseurs choisis (c'est donc une fonction décroissante de K), et $f(K)$ est la fonction pénalisant les modèles trop complexes (c'est donc une fonction croissante de K). Ce processus itératif de sélection est illustré sur la Figure 42. Il s'arrête dès lors que la chute de RSS permise par un nouveau régresseur ne suffit plus à compenser la pénalité croissante appliquée.

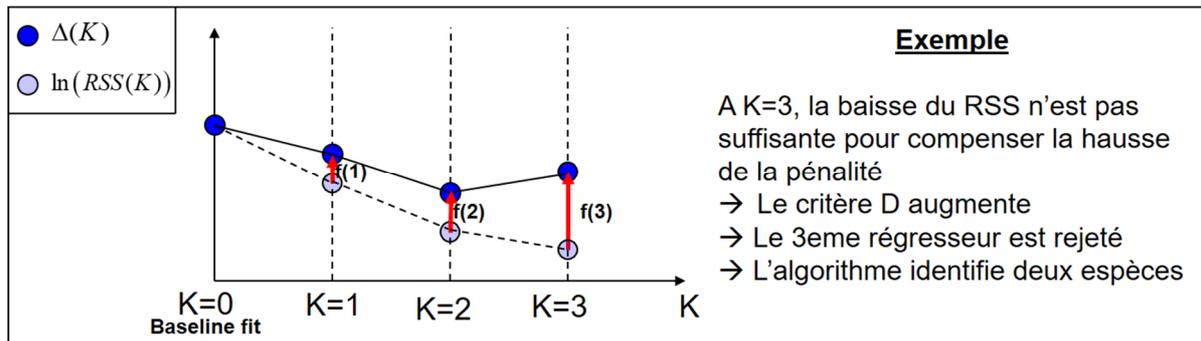


Figure 42 – Illustration du principe d'un algorithme d'identification pas à pas de régresseurs, par pénalisation des modèles complexes.

Il peut y avoir plusieurs manières de pénaliser les modèles complexes : critère d'Akaike (AIC – Akaike Information Criterion), critère de Bayes (BIC – Bayes Information Criterion)... Le critère de Bayes, par exemple, ajoute simplement au critère à minimiser une pénalité proportionnelle au nombre de régresseurs.

$$\Delta_{BIC} = \ln(RSS) + \alpha K \quad (16)$$

avec $\alpha = (\ln N) / N$ où N est le nombre d'échantillons du signal

En 2010, dans le cadre d'un post-doctorat que j'ai encadré sur la spectroscopie d'absorption par source supercontinuum, d'autres critères de pénalité particulièrement performants, variant autour du principe nommé MDL (Minimum Description Length) ont été développés par Julien Fade (Fade et al. 2011). Ces critères, développés initialement par Rissanen sous différentes variantes (Rissanen 1989), n'avaient encore jamais été appliqués à la spectroscopie. Ils reposent sur l'idée que le meilleur modèle de régression doit correspondre à celui qui minimise la longueur du code binaire nécessaire à la description des données expérimentales d'une part, et du modèle lui-même d'autre part, ce qui pénalise les modèles trop complexes (trop « longs » à encoder). Les fonctions de pénalisation associées aux critères MDL sont plus compliquées que celles du critère BIC, mais elles restent explicites, ce qui permet toujours de « non-superviser » la régression.

Il est bien sûr possible, et à vrai dire souhaitable, de tester statistiquement les performances de ces différents critères de pénalisation, et c'est ce que nous avons fait à travers différents cas de simulation (Fade et al. 2011 ; Cézard et al. 2011). La Figure 43 montre par exemple, en haut, un signal simulé de spectroscopie d'absorption à supercontinuum, pour un mélange de 4 gaz différents (H₂O, CH₄, C₂H₆, C₂H₂), et en bas les histogrammes d'identification statistiques (pour 2000 réalisations de bruits différentes) obtenus après avoir appliqué les différents critères de pénalisation. Ces histogrammes montrent que les critères basés sur un MDL, notamment le « normalized MDL » (nMDL), offrent des performances supérieures, en terme de taux de bonne identification, par rapport à d'autres critères (AIC, BIC). Nous montrerons au chapitre 4.3 un exemple d'application, à des signaux expérimentaux, de cette méthode de régression à complexité pénalisée par critère MDL.

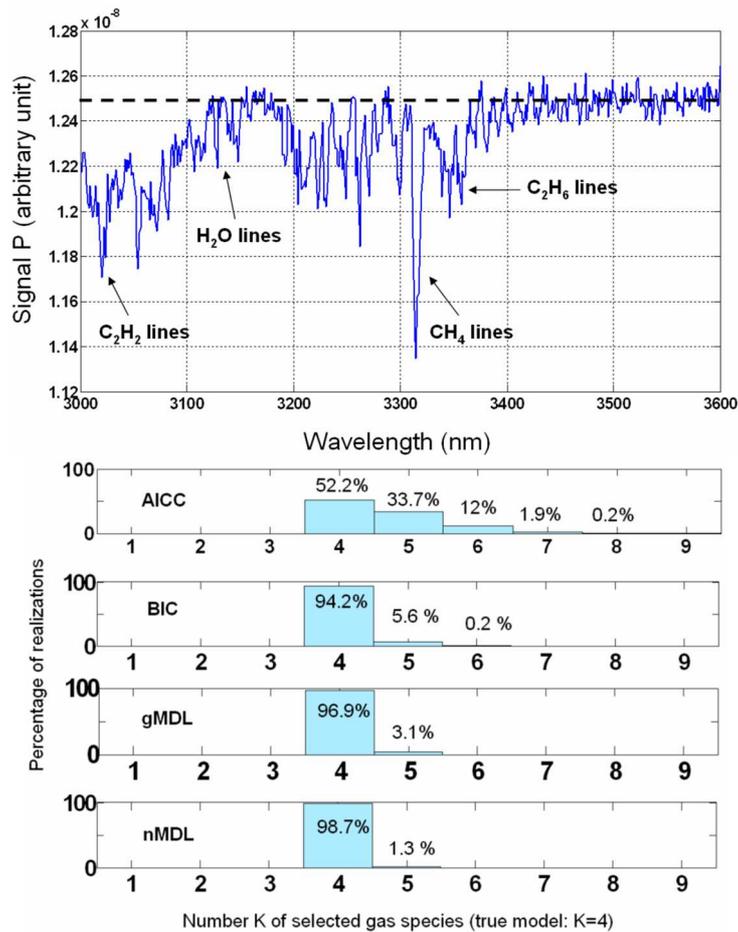


Figure 43 – Haut : Signal simulé de spectroscopie d’absorption à supercontinuum en bande MWIR, pour un mélange de 4 espèces de gaz (vapeur d’eau, méthane, éthane, acétylène). Bas : Histogrammes du nombre d’espèces gazeuses identifiées, parmi une liste de 14 candidats (tous interférant spectralement), par différents critères de pénalisation. A chaque fois que 4 espèces sont trouvées, il s’agit des bonnes. Toutes les espèces trouvées en excès sont absentes du mélange spécifié en entrée de simulation. (Source : Cézard et al. 2011)

e. Conclusion

L’apprentissage des notions de statistique et de traitement de l’information qui viennent d’être développées, ainsi que celui du formalisme algébrique qui les accompagne, ne coule pas nécessairement de source au sein d’une équipe dédiée à la conception de nouveaux prototypes expérimentaux. Pourtant, je n’ai pas regretté cet effort. Bien au contraire, j’ai été étonné, au fur et à mesure que j’acquerrais ce bagage supplémentaire, de constater son utilité et son importance pour l’exercice de mon métier, jusqu’à regretter que ces domaines n’aient pas davantage été mis en avant au cours de ma formation scolaire et universitaire (pourtant longue). La question de la prévision des performances de systèmes lidar, tout comme celle du traitement de signal appliqué aux données de mesures, sont des questions centrales qui reviennent en permanence, dans tous les systèmes, et à plus forte raison pour des prototypes exploratoires où tout est à découvrir. L’utilisation des outils qui viennent d’être exposés m’ont ainsi permis à maintes reprises de planifier des développements, de convaincre des partenaires de la faisabilité (ou pas !) de telle ou telle mesure lidar, mais aussi d’exploiter judicieusement les données de mesures pour en tirer le maximum d’information. Au chapitre 4, je détaillerai de quelle manière, dans quels contextes, et avec quels résultats j’ai pu appliquer ces outils pour mes travaux de recherche.

f. Références

- [Cézard N.](#), A. Dobroc, G. Canat, M. Duhant, W. Renard, C. Alhenc-Gelas, S. Lefebvre, and J. Fade "Supercontinuum laser absorption spectroscopy in the mid-infrared range for identification and concentration estimation of a multi-component atmospheric gas mixture", Proc. SPIE 8182, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VII, 81820V (2011)
- **Valla, M.** « Etude d'un lidar doppler impulsif à laser Erbium fibré pour des mesures de champ de vent dans la couche limite de l'atmosphère », Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, soutenue le 20 Juin 2005.
- **Fade J.**, S. Lefebvre, and [N. Cézard](#), "Minimum Description Length approach for unsupervised spectral unmixing of multiple interfering gas species," Opt. Express **19**, 13862-13872 (2011)
- **Rissanen J.**, *Stochastic Complexity in Statistical Inquiry, Series in Computer Science* (World Scientific, 1989), Vol. 15.
- **Van Trees H. L.**, *Detection, Estimation, and Modulation Theory* (Wiley, 1997)

Chapitre 4 – Résultats de recherches

Ce chapitre va permettre de revenir en détails sur chacun des systèmes lidars qui ont fait l'objet de mes travaux de recherche, et qui sont rappelés dans le Tableau 2 ci-dessous (copie du Tableau 1 présenté en introduction de ce mémoire). Je mentionnerai également plusieurs travaux qui n'ont pas nécessairement débouché sur un prototype, mais qui ont accompagné une thématique particulière (par exemple celle des lidars pour la détection de gaz depuis l'espace, en section 4.6). Pour chaque section, je présenterai d'abord le contexte de mes travaux, les défis spécifiques qui y sont associés, ainsi qu'un bref état de l'art des recherches qui leurs sont antérieures. Après quoi les principaux résultats de mes recherches seront exposés, ainsi que les perspectives qui en découlent.

	Longueur d'onde	Instrument	Principe de mesure	Paramètres mesurés (*) à venir	Famille de lidar	Technologie laser	Type de détection	Technologie détecteur
UV	0,35 μm	PADL	Diffusion Rayleigh	Vent Température Densité	Localisé	Cristal Nd :YAG à 1064 nm triplé à 355 nm	Directe	Caméra CCD Silicium
		MMEDTAC		Densité	Profileur			Tube Photomultiplicateur (PMT)
	0,35-0,42 μm	CALISTO	Diffusion Raman	H ₂ , H ₂ O, N ₂ (O ₂ , Temp.)*	Profileur			Photomultiplicateur Silicium (SiPM)
SWIR	1.3-1.5 μm	SHADOAS SWIR	Absorption	H ₂ O, CH ₄	A chemin intégré	Laser fibré supercontinuum	Directe	Photodiode InGaAs
	1.5 μm	Mini-peigne		H ₂ O (CO ₂)*	Profileur	Laser fibré cohérent	Cohérente	Photodiode InGaAs + traitement radiofréquence
	1.64 μm	VEGA		CH ₄ + Vent (flux)*				
	2.05 μm	HELENA		CO ₂ + Vent (flux)*				
MWIR	3-4 μm	SHADOAS MWIR	Absorption	CH ₄ , H ₂ O, COV	A chemin intégré	Laser fibré supercontinuum	Directe	Barette linéaire PbSe
	3-4 μm	SEPIA				Cristal NeSCOPO		Photodiode InSb
LWIR	7.5-11 μm	MICLID	Absorption	Gaz de combat	A chemin intégré	Cristal NeSCOPO	Directe	Photodiode HgCdTe

Tableau 2 – Synthèse des principaux systèmes lidars réalisés au cours de mes recherches

Néanmoins, je n'aurai pas l'occasion de développer en détail, dans cette section, tout le travail d'ingénierie qui a été nécessaire à la réalisation pratique des systèmes lidars qui seront présentés. Ce travail est pourtant capital. La réalisation d'un lidar exige en effet des compétences expérimentales dans de nombreux domaines : en optique bien sûr, mais aussi en mécanique, en thermique, ainsi qu'en électronique, instrumentation, et informatique qui sont trois domaines en constantes et rapides évolutions. La maîtrise de toutes ces connaissances et compétences ne peut se trouver qu'au sein d'un collectif. J'ai eu la chance de travailler pendant 15 années au sein d'une équipe pluridisciplinaire disposant de l'ensemble des compétences requises, et j'ai pu observer à maintes reprises tout le bénéfice de cette heureuse organisation, pour réaliser des prototypes lidars capables de fonctionner non seulement au laboratoire, mais aussi sur le terrain et dans des environnements parfois très contraignants (à l'extérieur, en avion, en hélicoptère...). Aussi, il me tient particulièrement à cœur de souligner que tous les prototypes qui seront présentés dans ce manuscrit sont le fruit de réalisations expérimentales collectives, et de saluer le travail de tous mes collègues qui ont participé à ces développements.

NB : Les références indiquées en bleu sont regroupées par section, comme au chapitre 3.

1. Les lidars Rayleigh PADL et MMEDTAC

a. Contexte et enjeux des recherches menées

Mes travaux sur les lidars à diffusion moléculaire Rayleigh ont porté sur deux enjeux majeurs :

- le contrôle « toute-altitude » des paramètres aérodynamiques de vol, appelés paramètres-air (*air-data*) : vitesse, température et densité de l'air ;
- la détection des Turbulences en Air Clair (TAC, ou CAT en anglais).

Dans le premier cas, le but général est de caractériser l'état aérodynamique de l'atmosphère en amont d'un aéronef, afin de pouvoir fournir les données mesurées au système de contrôle automatique de vol, et ainsi améliorer la manœuvrabilité des appareils (celle des avions d'armes notamment) ou leur sécurité (redondance des sondes Pitot par exemple). Les paramètres atmosphériques pertinents à mesurer dans ce contexte sont la vitesse (de prime importance), la température, et la densité de l'air, souvent regroupés en avionique sous le nom générique de « paramètres air » de l'atmosphère. La nécessité d'une mesure toute-altitude des paramètres air découle du besoin de disponibilité permanente des mesures pour les applications visées. La portée du système peut en revanche être limitée à quelques dizaines de mètres, de manière à positionner les points de mesure au-delà de la zone perturbée par le déplacement de l'aéronef (100 m au plus pour un gros porteur comme le montre la Figure 44).

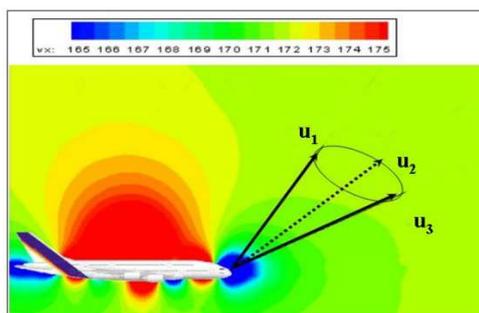


Figure 44. Perturbation du champ de vent atmosphérique au voisinage d'un aéronef (Source Onera). On a également représenté le principe d'une mesure de vitesse sur 3 axes (u_1 , u_2 , u_3) par lidar.



Figure 45 . Gauche : Turbulence en Air Clair liée à des ondes de Kelvin-Helmholtz, invisibles dans le cas général mais matérialisées ici par leur effet sur les nuages (Source : site internet de l'Université de Colombie Britannique). Droite : en 1992, un cargo parvient à atterrir après avoir perdu un réacteur et un morceau d'aile sous l'effet d'une turbulence extrême (Source : Denver Post, 10/12/1992)

Dans le second cas, le but est de détecter les turbulences de vol avant qu'elles ne surviennent, et particulièrement en situation d'air clair, lorsqu'aucun indice visuel n'est disponible pour les pilotes. Ces turbulences, qualifiées de Turbulence en Air Clair (TAC) ou « Clear Air Turbulence » en anglais (CAT), sont des phénomènes communs mais qui peuvent être extrêmement dangereux lors

de certaines occurrences particulièrement violentes (voir Figure 45 à droite). Deux stratégies sont possibles pour apporter des solutions à ce problème.

Dans la première, on cherche à détecter les turbulences de vitesse vent à courte portée devant l'aéronef (<200 m), dans le but de déclencher rapidement des actions correctives d'optimisation de voilure, via des actuateurs, permettant ainsi d'alléger les charges mécaniques encourues par la structure lors de rafales de vent : on parle d'allègement des charges de rafales (« gust alleviation load »). L'enjeu est alors d'augmenter la durée de vie des appareils, et/ou d'alléger leurs masses et leurs consommations de carburant. La mesure de vitesse air suffit pour cette application, avec une précision requise typique de 1 m/s.

La seconde stratégie, plus ambitieuse, consiste à détecter les turbulences à suffisamment longue distance en amont (plusieurs km) pour pouvoir faire assoir les passagers, et leur faire attacher leurs ceintures de sécurité (ce qui exige de l'ordre de 30 km de portée pour disposer de 2 minutes si l'avion vole à 900 km/h). Pour cette application, néanmoins, mesurer la vitesse de l'air par lidar Doppler n'est guère possible, car les turbulences sont le fait de variations de vitesses verticales du vent. Or à plusieurs km de distance, la projection de la vitesse verticale sur la ligne de visée laser est quasi-nulle (or seule cette projection est mesurable par effet Doppler). On peut en revanche chercher à mesurer les variations de densité atmosphérique, qui sont également un indicateur de présence de turbulences.

b. Intérêt et défis du lidar Rayleigh

Le lidar Rayleigh est la méthode la plus adaptée pour ces applications. En effet, premièrement, les molécules composant l'air (N_2 et O_2) sont présentes à toute altitude et varient très peu en concentration (seulement d'un facteur 4 entre 0 et 11 km). Par conséquent un lidar Rayleigh offre en principe une disponibilité permanente des données de mesure. Ce n'est pas le cas pour les lidars à diffusion de Mie sur les aérosols, dont la teneur dans l'atmosphère est hautement variable, et dont la présence en quantité suffisante demeure hypothétique à haute altitude. Deuxièmement, la diffusion Rayleigh produit un signal lidar dont l'intensité, la largeur spectrale, et les variations de fréquence centrale sont susceptibles d'être exploitées simultanément pour mesurer respectivement la densité, la température, et la vitesse de l'air (cf. chap.3.1, Figure 12). Les lidars à diffusion de Mie, eux, ne peuvent donner accès qu'à la vitesse de l'air (en supposant d'ailleurs que les aérosols sont des traceurs représentatifs du vent, mais cela est généralement vérifié).

Néanmoins, le signal lidar en diffusion moléculaire présente aussi des défis spécifiques. Sa cohérence temporelle est beaucoup plus faible que celle du signal de diffusion Mie. Il s'en suit une largeur spectrale bien plus importante (Figure 13), et par conséquent, une difficulté fondamentalement accrue pour mesurer le décalage de fréquence Doppler. Cette grande largeur spectrale rend également quasiment impraticable le procédé de détection cohérente, très employé sur les lidars Doppler à diffusion Mie. Il faut alors recourir à un procédé de détection directe. Par ailleurs, le spectre du signal Rayleigh peut être altéré par d'éventuelles contributions de diffusion Mie (Figure 13), imprévisibles et très variables, et de diffusion Brillouin (Figure 14), prévisibles mais difficiles à modéliser. Il faut donc faire en sorte que le système de mesure soit robuste face à ces perturbations.

c. Etat de l'art au démarrage des travaux (2004)

Dans le domaine de la mesure des paramètres air par lidar Rayleigh, le groupe le plus avancé était en 2004 celui de l'université du Michigan et de Michigan Aerospace Corp. (Tchoryk et al. 2001).

Cette équipe développait un concept de lidar UV à 266 nm, muni d'un interféromètre de Fabry-Perot imageur permettant l'analyse spectrale du signal Rayleigh-Mie. Les premières mesures de vitesse de vent en vol furent publiées en 2003 (Watkins et al. 2003). En Europe, une technologie identique était en développement par le groupe EADS dans le cadre du projet européen AWIATOR (2002-2007), dans un objectif d'allègement des charges de rafales. Une démonstration de mesures de vitesse en vol à courte portée, à partir d'un Airbus A340 spécialement modifié à cette fin, fut effectuée à l'issue de ce projet (Schmitt et al. 2007). Ces interféromètres imageurs de Fabry-Perot, à franges circulaires, rendaient néanmoins difficiles le traitement des interférogrammes, dont les paramètres étaient, de plus, fortement impactés par les perturbations de diffusion Mie (et Brillouin au second ordre).

En France, le lidar Rayleigh avait davantage été utilisé en aérologie pour sa capacité à réaliser des mesures de vitesse de vent dans la haute atmosphère depuis le sol. La station lidar de l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) était une référence mondiale en la matière. L'équipe du Service d'Aéronomie (SA, aujourd'hui LATMOS) avait développé dès 1989 un lidar Rayleigh Doppler pour la mesure de vitesse de l'air (Chanin et al. 1989). Le dispositif d'analyse spectrale se composait de deux interféromètres de Fabry-Perot utilisés en simple transmission (pas d'imagerie de frange) et disposés de part et d'autre de la raie de diffusion Rayleigh (système dit de double-pesée, ou « double-edge technique » en anglais). Ce dispositif a connu un vif succès international, si bien qu'on le retrouve aujourd'hui au cœur du satellite ADM-Aeolus (lancé en 2018), premier lidar en orbite capable de mesurer le vent dans l'atmosphère depuis l'espace, et dont la mission était en cours de conception au début des années 2000 (Stoffelen et al. 2005). En 2001 et 2002, le SA proposa aussi d'employer, en lieu et place des interféromètres multi-ondes de Fabry-Perot, des interféromètres à deux ondes de types Mach-Zehnder (Bruneau 2001, Bruneau 2002). Cette idée permettait notamment d'augmenter l'efficacité optique des dispositifs d'analyse spectrale, et la simplicité du paramétrage des interférogrammes. Ces travaux inspirèrent beaucoup les miens.

d. Principaux travaux accomplis

Mes recherches portèrent tout d'abord, au cours de mon travail de thèse, sur la mesure des paramètres air. Je me suis d'abord penché en détails sur l'origine des processus de diffusion Rayleigh, Raman, Mie et Brillouin, afin de bien comprendre les propriétés du rayonnement lidar qu'il me fallait analyser (cf chapitre 3.1.a et 3.1.b). La grande largeur spectrale de la diffusion Rayleigh ne permettant pas d'envisager un dispositif de détection cohérente, je me suis tourné vers les dispositifs de détection dite directe. L'intensité de diffusion Rayleigh étant proportionnelle à λ^{-4} , j'ai également rapidement opté pour un système dans l'UV (ce domaine procurant également une sécurité oculaire bien supérieure à celle du domaine visible), et choisi de m'en tenir à la 3^{ème} harmonique des lasers Nd:YAG, à 355 nm, la 4^{ème} harmonique à 266 nm promettant certes une meilleure isolation au bruit solaire, mais offrant un choix de composants (en détection notamment) très restreint.

Le principal défi était toutefois de réaliser un analyseur spectral capable de mesurer simultanément la vitesse de l'air, sa température, sa densité, mais également son rapport de diffusion aérosols/molécules. En effet, ce dernier étant imprévisible, il était indispensable de le placer au rang des inconnues à mesurer, pour éviter qu'il ne biaise les mesures des autres paramètres air. J'ai d'abord opté pour la famille des analyseurs à imagerie de franges d'interférence. Dans de tels systèmes, la vitesse de l'air se déduit de la phase des franges, laquelle demeure inchangée quelles que soient les contributions spectrales de diffusion Mie et Brillouin (car ces dernières n'altèrent pas le barycentre de fréquence du spectre de diffusion). C'est là un grand avantage par rapport aux systèmes non imageurs (à double pesée, ou bien à mono-filtre, comme

c'est le cas des lidars dits HSRL - High-Spectral Resolution Lidar), dont la fonction de mesure Doppler est affectée par ces phénomènes. L'inconvénient des systèmes à imagerie est surtout de ne pas permettre de mesures résolues en distance (en raison de la lenteur du processus de lecture des images). Mais pour la mesure des paramètres air en amont d'un aéronef, une mesure résolue n'était justement pas nécessaire, et une mesure localisée dans l'espace (délimitée optiquement par les paramètres géométriques du récepteur) s'avérait suffisante.

J'ai ensuite choisi de comparer les performances de deux types d'analyseurs spectraux à imagerie de frange: l'interféromètre de Fabry-Perot, et un double-interféromètre de Michelson. Ce dernier, représenté sur la Figure 46, était une proposition originale de ma part, inspirée par les travaux publiés par le Service d'Aéronomie sur les interféromètres à deux ondes, mais adaptée à la problématique de la mesure des paramètres air. En effet, j'ai démontré que si un seul interféromètre de Michelson (ou de Mach-Zehnder) était suffisant pour effectuer la mesure de vitesse, il était nécessaire d'en utiliser deux en parallèle, et de différences de marche distinctes, pour mesurer la température, la densité atmosphérique, et le rapport de diffusion aérosols/molécules. Malgré des pertes optiques de 50%, l'intérêt de l'interféromètre de Michelson était sa relative simplicité de mise en œuvre par rapport aux interféromètres de Mach-Zehnder. Et comme eux, il avait le grand avantage de présenter une fonction de réponse toujours sinusoïdale, à la fois simple à paramétrer et robuste aux désalignements.

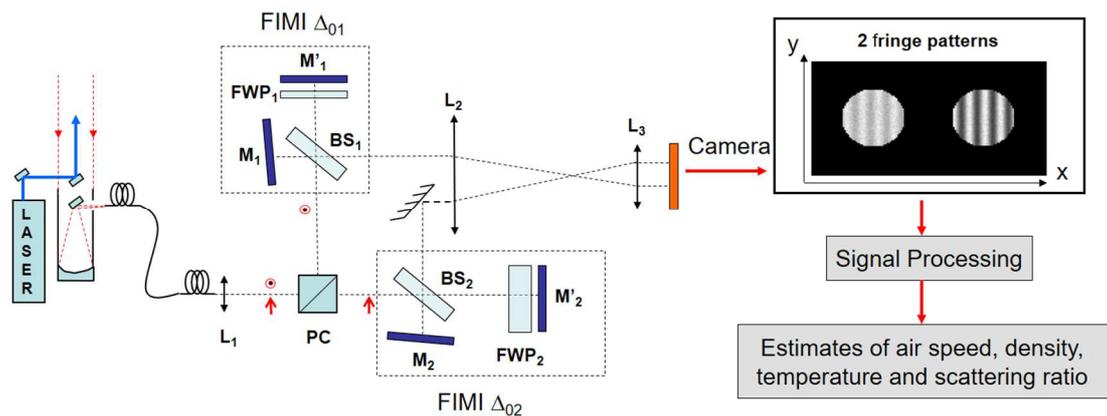


Figure 46 – Concept du Lidar Rayleigh à double interféromètre de Michelson à imagerie de franges, pour la mesure simultanée de la vitesse de l'air, sa température, sa densité, et son rapport de diffusion aérosols/molécules. Notations : FIMI : Fringe-Imaging Michelson Interferometer, $L_{1,2,3}$: lenses, PC : Polarizing Cube, $M_{1,2}$ & $M'_{1,2}$: mirrors, $BS_{1,2}$: Beamsplitter, $FWP_{1,2}$: Field Widening Plate (Source : Cézard et al. 2009)

Pour comparer les performances des interféromètres de Fabry-Perot et de Michelson pour la quadruple mesure de vitesse, température, densité, et rapport de diffusion, je me suis appuyé sur un modèle descriptif non seulement du signal, mais aussi du bruit de mesure attendu (bruit de photon dans le cas idéal), ce qui m'a permis d'établir dans chaque cas la fonction de vraisemblance du signal. J'ai pu me baser sur cette dernière pour élaborer d'une part un estimateur au maximum de vraisemblance (MLE en anglais) des paramètres de mesure recherchés, et d'autre part pour calculer les bornes de Cramer-Rao du système modélisé (cf. chapitre 3.3.b). L'emploi et l'intérêt de cette approche statistique du signal lidar était bien connue dans la communauté des lidars à détection cohérente (Frehlich 1993, Rye & Hardesty 1993), plus proche de la communauté radar pour laquelle ces notions sont plus familières. Elle était en revanche peu répandue dans la littérature sur les systèmes lidars à détection directe, à l'exception des travaux précurseurs de B.Rye (1995) à la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, USA). Cette méthodologie, appliquée au cas du double interféromètre de Michelson, est ainsi au cœur de ma première publication en journal (Cézard et al. 2009).

J'ai ensuite réalisé un démonstrateur lidar nommé PADL (Prototype of an Air-Data Lidar), à l'aide d'une source laser à 355 nm. J'ai dimensionné et mis en place le télescope, l'interféromètre de Michelson, ainsi que le dispositif d'imagerie des franges d'interférence, employant pour détecteur une caméra CCD interligne à double exposition. Grâce à ce lidar, j'ai pu apporter la première démonstration expérimentale de mesure de vitesse de l'air à courte portée (50 m) au moyen d'un interféromètre de Michelson à imagerie de franges. Un grand objet de satisfaction fut de parvenir à mesurer des décalages de franges extrêmement faibles, de l'ordre de $1/100^{\text{ème}}$ de pixel, en plein jour et sans utiliser de système de stabilisation thermo-mécanique de l'interféromètre. Pour y parvenir, j'ai mis d'une part en place une méthode de mesure différentielle (et tir-à-tir) de la phase des franges créées par le pulse laser émis et par le signal lidar reçu (d'où le choix d'une caméra à double-exposition), et développé d'autre part un estimateur de vitesse performant, basé sur un MLE initialisé par un traitement de Fourier de la figure de franges (Cézard et al. 2007). Cette expérience m'a convaincu de l'importance à accorder au traitement du signal et aux estimateurs pour atteindre de hautes performances.

Le démonstrateur lidar que j'ai réalisé est illustré en Figure 47. A gauche est schématisé l'interféromètre de Michelson à imagerie de franges, qui est le cœur du dispositif. A droite se trouve une photo du lidar complet. Certes, on peut voir que l'accent n'a pas été mis sur la minimisation de l'encombrement instrumental lors de ces travaux ! A vrai dire, le laser seul était assez encombrant, datant des années 90... Mais in fine, j'ai pu détecter avec succès des rafales artificielles (Figure 48) et démontrer ainsi la faisabilité de la mesure du vent par ce dispositif (Cézard et al. 2008). Enfin, j'ai également démontré que l'effet Brillouin n'avait pas d'impact pour effectuer des mesures de vent en imagerie de frange, mais qu'en revanche, il était indispensable de le modéliser très précisément pour pouvoir réaliser des mesures non biaisées de température et densité, sous peine de commettre des erreurs systématiques très importantes, jusqu'à 15°K en température par exemple (Cézard 2009). Bien que je n'ai pas eu le temps d'installer un second interféromètre de Michelson pour réellement tenter de mesurer l'ensemble des paramètres air, les résultats que j'ai obtenus ont permis de mieux comprendre les potentialités générales des lidars Rayleigh-Mie pour cette thématique de recherche.

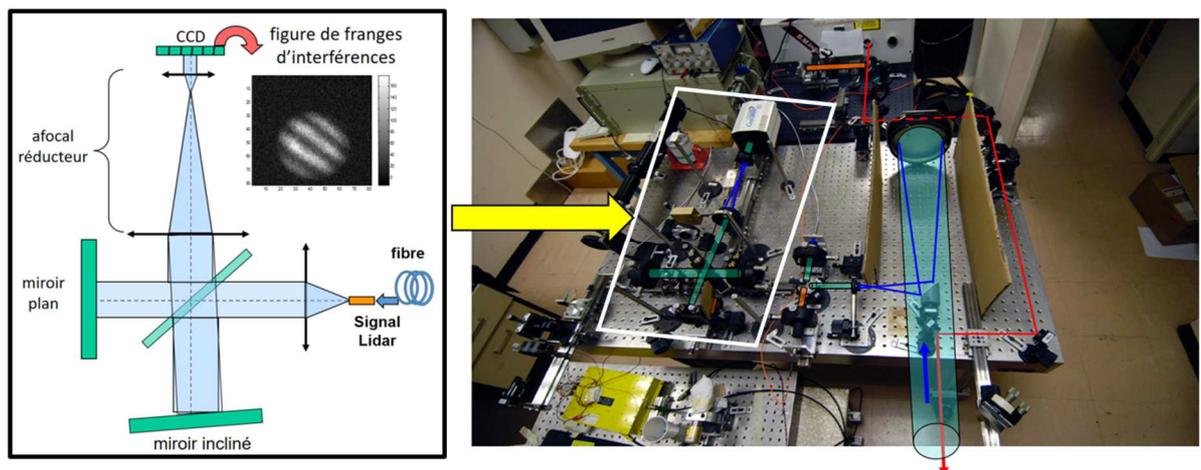


Figure 47 – Photo du lidar Rayleigh-Mie PADL développé pendant ma thèse. Les flèches rouges matérialisent le faisceau laser émis à 355 nm, les flèches bleues matérialisent le signal lidar collecté.

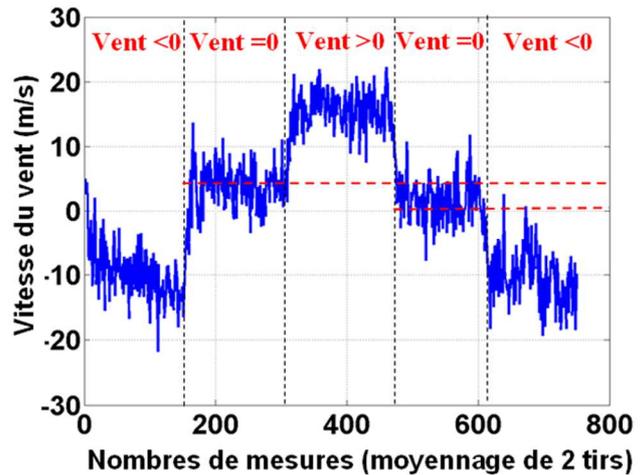


Figure 48 - A gauche : Génération artificielle, au moyen d'une « soufflante », de rafales de vent dans un tube par lequel passe le faisceau laser. A droite : Mesure par le lidar des paliers de vitesse air ainsi générés (en changeant le sens des rafales). (Source : Cézard et al. 2008)

A l'issue de ma thèse, j'ai pu approfondir encore la thématique de mesure des paramètres air pour l'allègement des charges de rafales. Le réglage angulaire de l'interféromètre de Michelson restant délicat, j'ai ré-interrogé, mais du point de vue expérimental cette fois, la solution de l'interféromètre de Fabry-Perot. Ce dernier avait en effet le double mérite d'exister commercialement sous forme monolithique et plus intégrée, et de permettre, théoriquement du moins, la mesure simultanée de tous les paramètres air (alors qu'il faut deux interféromètres de Michelson pour cela). Au cours d'un stage (Vanhelst, 2009), nous avons obtenu avec le lidar PADL, associé à un interféromètre de Fabry-Perot, des images de franges circulaires tout à fait conformes aux attendus théoriques (Figure 49), et travaillé sur le traitement de signal de ces images pour estimer les paramètres air. Les résultats obtenus ont mis en évidence un traitement du signal plus complexe que dans le cas des interféromètres de Michelson, mais offrant néanmoins des opportunités intéressantes. Le temps a malheureusement manqué pour que nous puissions réaliser des mesures de vent réel pendant ce stage.

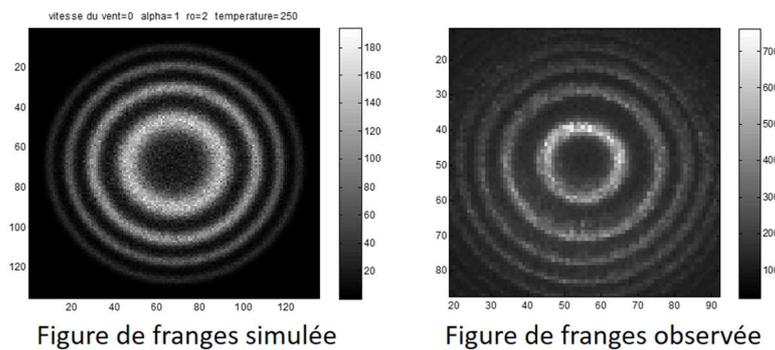


Figure 49 – Figures de franges de Fabry-Perot simulées et observées via le lidar Rayleigh. (Source : Vanhelst, 2009)

Le problème des solutions à imagerie de frange (de Michelson ou de Fabry-Perot) est néanmoins de ne pas permettre la réalisation de mesures lidar résolues dans l'espace. Les temps d'exposition et surtout de lecture des images est trop lent pour cela. Pour pallier à ce problème et pouvoir envisager des systèmes lidar Rayleigh résolus, pour les applications qui l'exigent, je me suis alors intéressé au concept d'interféromètre Quadri Mach-Zehnder (QMZ). Dans ce concept,

initialement proposé par [Bruneau \(2001\)](#), un interféromètre de Mach-Zehnder est muni d'une lame $\lambda/4$ dans l'un de ses bras, et de deux systèmes de détection en polarisations croisées à chaque sortie, de manière à proposer quatre canaux de sorties décalés chacun de $\pi/4$ en phase. Ce système à quatre canaux est intéressant car d'une part il ne réalise pas d'imagerie de franges, et permet donc l'emploi de mono-détecteurs aptes à fournir des mesures résolues temporellement (donc spatialement pour un lidar) ; d'autre part il conserve un certain nombre d'avantages des systèmes d'imagerie (absence de biais sur la mesure de vitesse en cas de diffusion de Mie et Brillouin notamment). Dans le cadre d'une étude nommée SARA pour Sagem, j'ai réalisé plusieurs dimensionnements de lidars basés sur ce principe, dans l'UV mais aussi dans l'infrarouge.

Néanmoins, à l'époque, quel que soit le système interférométrique, il s'avéra que les systèmes laser assez puissants pour espérer obtenir de bonnes performances étaient globalement peu compatibles avec les possibilités d'emport des avions, de sorte que mes travaux n'aboutirent pas sur des systèmes embarqués. Néanmoins, ils permirent de poser des jalons qui font toujours référence aujourd'hui dans mon unité de recherche, à l'heure où la thématique des lidars Rayleigh pour la mesure des paramètres air et des turbulences retrouve une importante dynamique.

J'ai également apporté une contribution aux recherches menées à l'Onera en matière de détection de Turbulences en Air Clair (TAC) par lidar Rayleigh, notamment à travers le projet ANR MMEDTAC (Modélisation, Mesure et Détection de Turbulences en Air Clair), qui visait à la détection, depuis la station lidar de l'Observatoire de Haute-Provence (OHP), de structures turbulentes dans la haute atmosphère. Le principe consistait à mesurer, au moyen d'un lidar Rayleigh de haute énergie impulsionnelle (300 mJ à 532 nm), les fluctuations de densité atmosphérique, attribuables aux turbulences de vent. En 2008, j'ai participé à la conception et à la mise en place à l'OHP d'une chaîne de détection analogique à deux voies de polarisation, spécialement adaptée en dynamique à l'objectif de mesure. Les tests auxquels j'ai contribué à l'OHP ont permis de confirmer la capacité du dispositif à mesurer le signal Rayleigh jusqu'à plus de 15 km en altitude (Figure 50). Ce dispositif fut ensuite utilisé au cours de plusieurs campagnes de mesures menées par le LATMOS en 2008 et 2009. Les données recueillies permirent au LATMOS de conclure à la détection positive, quoique ténue, de structures turbulentes par lidar Rayleigh ([Hauchecorne et al. 2016](#)).

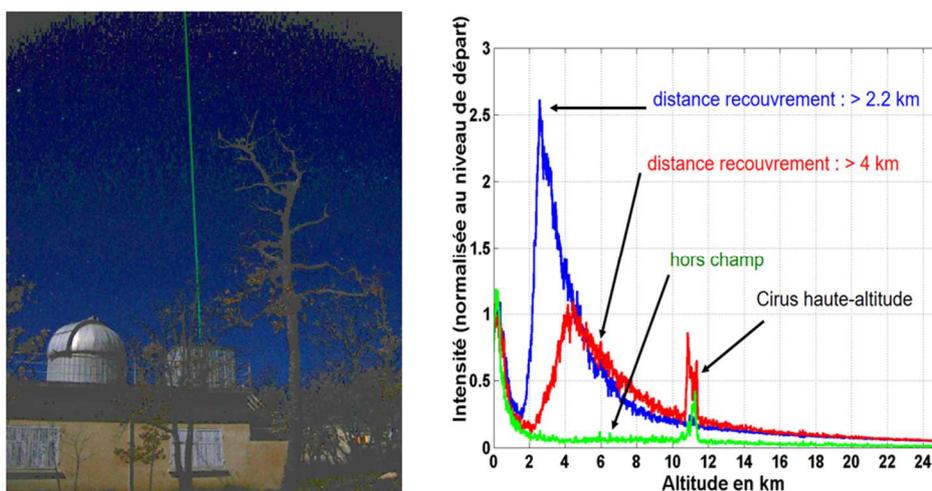


Figure 50. Gauche : Photo de la station Lidar Gérard Mégie en activité, prise lors de ma mission en 2008 à l'OHP. Droite : signaux de mesure enregistrés en faisant varier le champ récepteur.

e. Mise en perspectives des recherches menées

Mes principaux travaux sur la thématique des lidars Rayleigh se sont conclus à peu près en 2010. A cette date, ils avaient permis de mettre en évidence l'intérêt et les limites des interféromètres à deux ondes (à imagerie de franges ou à quatre canaux) pour la mesure des paramètres air et pour l'allègement des charges de rafales, de développer avec succès un démonstrateur lidar innovant à imagerie de franges de Michelson, et enfin de contribuer aux recherches sur la détection de turbulences depuis le sol, en collaboration avec le LATMOS.

Les interféromètres à deux ondes ont suscité à cette époque, et par la suite également, un intérêt important dans plusieurs laboratoires. Aux Etats-Unis, l'entreprise Ball Aerospace ([Grund et al. 2008](#)) avançait en 2008 le concept d'Optical Auto-Covariance Wind Lidar (OAWL), très proche du Quadri-Mach-Zehnder, pour la mesure des vents atmosphériques depuis l'espace. Ce développement est toujours activement soutenu aux Etats-Unis ([Tucker et al. 2018](#)). Au DLR, les perspectives de progrès proposées à la fin de ma thèse, pour rendre plus robuste l'interféromètre de Michelson par l'usage d'une construction monolithique (en un seul bloc de verre), furent suivies quelques années plus tard avec le travail de thèse de Jonas Herbst, encadré par Patrick Vrancken ([Herbst 2016](#)), avec qui j'ai eu de nombreux échanges. En France, le Latmos a également proposé récemment l'utilisation d'interféromètres Mach-Zehnder dans le cadre du projet de lidar spatial MESCAL. Aujourd'hui les concepts d'interféromètre de Michelson à Imagerie de franges et Quadri-Mach-Zehnder restent donc plus que jamais d'actualité.

A l'Onera, ces concepts font l'objet de nouvelles études depuis 2018, et j'ai d'ailleurs co-encadré plusieurs stages sur le sujet ces dernières années. En effet, la thématique du contrôle des paramètres air et de détection de turbulences suscite toujours l'intérêt, et si les attentes des industriels pour la mesure en vol n'ont toujours pas été comblées à ce jour, les évolutions technologiques sont favorables. L'apparition progressive de lasers plus performants et compacts, d'interféromètres plus robustes, de détecteurs plus rapides et moins fragiles, laisse entrevoir de nouvelles possibilités techniques qui n'existaient pas dans les années 2000. L'émergence récente de projets de pseudo-satellites à haute altitude (HAPS en anglais) pourrait motiver également de nouveaux besoins de navigation dans la haute atmosphère, pour lesquels les lidars Rayleigh seraient des solutions intéressantes. L'observation des vents atmosphériques depuis l'espace est aussi un sujet de grande actualité. La mission ADM-Aeolus, lancée en 2018, et munie du lidar Rayleigh-Mie Aladin à 355 nm, est un véritable précurseur dans ce domaine, mais sa durée de vie dans l'espace sera au plus de quelques années (durée programmée de 3 ans). La préparation de futurs lidars spatiaux pour la mesure de vent (à l'instar du programme Aeolus Follow-on) sera donc certainement un moment privilégié pour évaluer, à l'aune des technologies d'aujourd'hui, de nouveaux concepts de lidars Rayleigh.

f. Références

- **Bruneau D.**, "Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar," Appl. Opt. 40, 391-399 (2001)
- **Bruneau D.**, « Fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar », Appl. Opt. 41, p.503 (2002)
- **Cézarid N.**, A. Dolfi-Bouteyre, J-P. Huignard, and P-H. Flamant "Development of a short-range 355-nm Rayleigh-Mie lidar using a Michelson interferometer for wind speed measurements", Proc. SPIE 6750,

Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing III, 675008 (2007)

- **Cézard N.**, A.Dolfi-Bouteyre, J.P.Huignard, P.H.Flamant "Potential of the Michelson Interferometer fringe-imaging technique for Rayleigh-Mie spectral analysis", *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 24*, Boulder, USA (2008)
- **Cézard N.**, A. Dolfi-Bouteyre, J-P. Huignard, and P-H. Flamant, "Performance evaluation of a dual fringe-imaging Michelson interferometer for air parameter measurements with a 355 nm Rayleigh-Mie lidar," *Appl. Opt.* 48, 2321-2332 (2009)
- **Chanin M-L.**, A.Garnier, A.Hauchecorne, J.Porteneuve, « A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere », *Geoph.Res.Let.*, Vol.16, n°11 , p.1273 (1989)
- **Frehlich R.**, "Cramer-Rao Bound for Gaussian Random Processes and Applications to radar Processing of Atmospheric Signals", *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, Vol.31, n°6, p1123 (1993)
- **Grund C. J.** , M. Lieber, B. Pierce, M. Stephens, and C. Weimer, "Optical Autocovariance Wind Lidar (OAWL) for efficient space-based direct detection high-resolution aerosol backscatter winds", in *24th International Laser Radar Conference 2008 (ILRC 24)*, Vol. 1, ICLAS, 60–63.
- **Hauchecorne**, C. Cot, F. Dalaudier, J. Porteneuve, T. Gaudo, R. Wilson, C. Cénac, C. Laqui, P. Keckhut, J-M. Perrin, A. Dolfi, **N. Cézard**, L. Lombard, and C. Besson, "Tentative detection of clear-air turbulence using a ground-based Rayleigh lidar", *Appl. Opt.* 55, 3420-3428 (2016)
- **Herbst J.** and P.Vrancken, « Design of a monolithic Michelson interferometer for frine inaging in a near-field, UV, direct-detection Doppler wind Lidar, *Appl.Opt.* 55, pp.6910-6929 (2016)
- **Rye B.**, M.Hardesty, « Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar. I: Spectral accumulation and the Cramer-Rao Lower Bound », *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, Vol.31, n°1, p.16 (1993)
- **Rye B.**, « Comparative precision of distributed-backscatter Doppler lidars », *Appl.Opt.*34, p.8341 (1995)
- **Schmitt N.**, « Flight test of the AWIATOR airborne LIDAR Turbulence Sensor – First results », *Proceedings of 14th Coherent Laser Radar Conference (CLRC)* (2007)
- **Stoffelen A.**, J. Pailleux, E. Kaellen, J. M. Vaughan, L. Isaksen, P. Flamant, W. Wergen, E. Andersson, H. Schyberg, A. Culoma, R. Meynart, M. Endemann, and P. Ingmann, "The Atmospheric Dynamics Mission for global wind field measurement," *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 86, 73–87 (2005).
- **Tchoryk P.**, C.Watkins, S.Lindemann, P.Hays, C. Nardell, « Molecular Optical Air Data System (MOADS) », *Laser Radar Technology and Applications VI*, SPIE Proc. Vol. 4377 (2001)
- **Tucker S. C.**, C. S. Weimer, S. Baidar, and R. M. Hardesty, 2018: The Optical Autocovariance Wind Lidar. Part I: OAWL Instrument Development and Demonstration. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 35, 2079–2097
- **Vanhelst S.**, "Interférométrie appliquée au LIDAR », mémoire de stage de 3^{ème} année de l'Ensicaen (2009).
- **Watkins C.** et al., « Molecular optical air data system (MOADS) flight experiment », *Laser Radar Technology and Applications VIII*, SPIE.Proc.5086, p.236 (2003)

2. Le lidar Raman CALISTO

a. Contexte et enjeux des recherches menées

Les travaux que j'ai menés sur le lidar Raman CALISTO se sont inscrits dans un contexte tout à fait particulier, qui est celui de la gestion des déchets radioactifs en France. Dans notre pays, 77% de l'électricité produite est d'origine électronucléaire, et comme toute activité industrielle, celle-ci produit des déchets. Leur particularité est d'être radioactifs, et pour certains d'entre eux, extrêmement dangereux sur de très longues durées (jusqu'à plusieurs centaines de milliers

d'années...). Les déchets les plus problématiques ne représentent qu'une faible fraction en volume du parc de déchets radioactifs, mais ils génèrent à eux seuls la quasi-totalité de la radioactivité. Il s'agit des déchets de Moyenne Activité à Vie Longue (MAVL, 3% du volume, 2% de la radioactivité), et surtout des déchets de Haute Activité (HA, 0.2% du volume, 98% de la radioactivité). En France, c'est à l'Andra (Agence Nationale de gestion des déchets Radioactifs) qu'échoit la responsabilité de les gérer sur le long terme. En 2006, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) a recommandé que soit privilégiée pour ces déchets la solution d'un « stockage géologique profond », dans des galeries souterraines d'un milieu géologique particulièrement stable et apte à limiter la diffusion des radionucléides dans l'environnement. La loi du 28 juin 2006 a entériné cette option, vue comme la plus adaptée pour décharger les générations futures du poids de gestion de ces déchets. L'Andra a alors été chargé d'étudier les modalités du stockage géologique des déchets MAVL et HA. C'est ainsi qu'est né le projet Cigeo (Centre industriel de stockage géologique), illustré en Figure 51, qui pourrait déboucher à terme sur la création d'un centre de stockage souterrain sur le site de Bure, en Meuse/Haute-Marne.

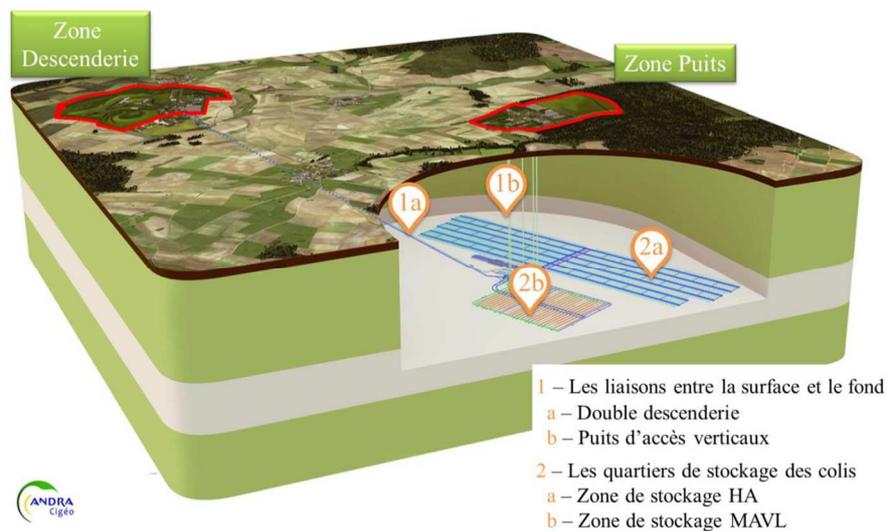


Figure 51 – Concept du projet Cigéo (Centre industriel de stockage géologique) (Source Andra)

C'est dans ce contexte qu'en 2009, l'Andra a sollicité l'Onera afin d'évaluer le potentiel de la technique lidar pour le suivi d'éventuelles émanations de dihydrogène dans les galeries de stockage souterrain. En effet, les études menées par l'Andra avaient alors montré qu'il existait un risque de lent dégazage d'hydrogène moléculaire (H_2) dans les galeries de stockage, sous l'effet de divers processus, principalement la corrosion anoxique des métaux, et la radiolyse de l'eau. L'hydrogène étant un gaz éminemment inflammable et explosif, avec une Limite Inférieure d'Explosivité (LIE) de 4% dans l'air, l'enjeu de sécurité posé par un dégazage de H_2 , très lent mais potentiellement sur de longues durées, était évident. Bien entendu, l'Andra développait également, avec d'autres laboratoires, toute une gamme de capteurs hydrogène in situ. Cependant, dans l'environnement particulièrement hostile à toute instrumentation que représente une galerie de stockage de déchets radioactifs, l'idée d'une solution de mesure par lidar, non invasive et à distance, était très attractive.

J'ai ainsi été chargé en 2010 de mener une pré-étude sur la faisabilité d'un lidar de surveillance des émanations de dihydrogène au sein des galeries de stockage, telles qu'elles étaient alors envisagées (illustrées en Figure 52). Les objectifs de performances du lidar étaient ambitieux : 500 m de portée, 3 m de résolution spatiale (sur l'axe de visée), 1 h de résolution temporelle, et 500 ppm de précision de mesure dans une gamme de concentration allant jusqu'à 4% (LIE).

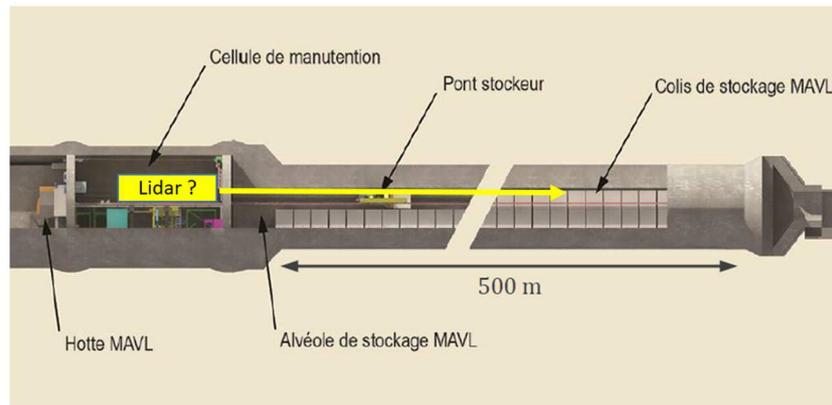


Figure 52 – Concept de surveillance par lidar des galeries de stockage de déchets radioactifs (MAVL ici) (Source : Andra)

b. Intérêt et défis posés

Le dihydrogène H_2 est une molécule dite diatomique et homonucléaire (i.e. constituée de deux atomes de même nature). Cette molécule ne présente donc aucun moment dipolaire, car les centres de charge positifs et négatifs sont strictement confondus. Elle ne présente par ailleurs qu'un seul mode de vibration, en étirement-contraction, pendant lesquels le moment dipolaire reste nul. Par conséquent la molécule H_2 n'est pas active en spectroscopie d'absorption vibrationnelle (cf. chapitre 3.1.d). En réalité, il existe dans l'infrarouge de très légères raies d'absorption de H_2 , liées à des variations de son moment non pas dipolaire mais quadripolaire. Ces dernières peuvent être exploitées dans certains dispositifs à très long parcours optique, comme des cavités CRDS (Cavity Ring-Down Spectroscopy), mais sont bien trop faibles pour donner lieu à une absorption détectable sur seulement quelques centaines de mètres par un lidar. La molécule H_2 est également absorbante dans l'UV (transitions d'énergie électronique) mais à des longueurs d'ondes trop courtes (<100 nm) qui sont très rapidement absorbées par l'oxygène atmosphérique. Elle ne pouvait donc pas être détectée en spectroscopie d'absorption. Par contre, la polarisabilité de la molécule H_2 varie pendant sa vibration, puisque la molécule est plus facilement polarisable en étirement qu'en contraction. La molécule H_2 est ainsi active en spectroscopie de diffusion Raman. Elle présente notamment une bande vibrationnelle distincte à environ 4160 cm^{-1} de la longueur d'onde d'excitation laser (soit 416 nm pour un laser à 355 nm). C'est cette analyse qui m'a permis de conclure, en 2010, que le lidar Raman était la meilleure technique à employer (et probablement la seule possible) pour répondre au problème posé de télémessure de la concentration de dihydrogène sur plusieurs centaines de mètres.

Néanmoins les défis posés par ce concept de mesure ont également été mis en évidence. Tout d'abord je me suis aperçu que les spectres de diffusion des molécules H_2 et H_2O se superposaient partiellement (cf. chapitre 3.1.c et la Figure 20). Pour éviter que des variations de la concentration de vapeur d'eau ne soient interprétées comme des variations de teneur en hydrogène, il était donc nécessaire de mesurer simultanément les deux molécules. L'autre défi posé par ce concept de lidar Raman restait (comme pour tous les lidars Raman) l'extrême faiblesse des signaux à détecter. Il était clair que le lidar devrait intégrer une chaîne de détection à comptage de photons très performante pour détecter les quelques photons/mètres de propagation (parfois même des dixièmes de photons, c'est-à-dire 1 photon/mètre en moyenne sur plusieurs impulsions laser émises !).

c. Etat de l'art au démarrage des travaux (2010)

En 2010, la mesure par lidar Raman de l'hydrogène dans l'atmosphère n'est pas, loin s'en faut, un problème usuel dans la communauté lidar, a fortiori dans le but de contrôler des galeries creusées à 500m de profondeur dans le sous-sol, et contenant des colis radioactifs. On ne s'étonnera donc pas que l'état de l'art sur ce sujet précis se soit révélé vierge au commencement de ces travaux. Néanmoins, l'hydrogène suscitant également beaucoup d'intérêt dans d'autres contextes applicatifs, comme celui de la combustion dans le domaine spatial par exemple, et plus généralement dans le secteur de la production d'énergie, il existait tout de même des travaux précurseurs portant sur la télédétection de l'hydrogène par spectroscopie Raman.

Des travaux sont notamment menés aux Etats-Unis dans les années 90 par la NASA, qui décrivent plusieurs senseurs à hydrogène utilisant l'effet Raman ([Adler-Golden et al. 1992](#) ; [De Groot 1994](#)). Ces dispositifs restent néanmoins des capteurs in situ, requérant pour le premier de prélever et injecter l'air à contrôler dans une cellule de test, et pour le second d'amener le rayonnement laser par fibre optique à quelques centimètres du volume d'air à contrôler. Ce ne sont donc pas vraiment des systèmes lidars. Les travaux de l'université de Floride dans les années 2000 s'en approchent davantage ([Ball 2005](#)), avec une démonstration à très courte distance (6 mètres) d'un lidar Raman pour la détection d'hydrogène (localisé dans une cellule close). Incidemment, ces travaux mettent bien en évidence l'effet délétère apporté par la fluorescence des hublots de la cellule de gaz sur la qualité des mesures. En 2007 une équipe japonaise du Shikoku Research Institute présente également un lidar Raman pour la télédétection de l'hydrogène, avec une intention de portée de 30 à 50 m ([Ninomiya et al. 2007](#)), mais la démonstration expérimentale se limite à une preuve de détection sans quantification, et à une distance encore très limitée de 11 m seulement. Ainsi, si l'ensemble de ces travaux suggéraient bien la possibilité de réaliser un lidar Raman pour mesurer l'hydrogène, parvenir à une mesure quantifiée de cette substance de manière résolue dans l'espace, et sur plusieurs centaines de mètres, semblait loin d'être acquis au vu des résultats publiés.

D'un autre côté, si la bibliographie sur les lidars Raman pour la détection d'hydrogène n'était pas très fournie, il en allait tout autrement des lidars Raman pour la détection de la vapeur d'eau. Dans ce domaine, la littérature est très abondante (elle remonte à 1969 !), et il était donc intéressant d'analyser les performances atteintes avec ce type d'instrument. Les travaux publiés par la NASA GSFC (Godard Space Flight Center) en 1992 sont une référence dans ce domaine ([Whiteman et al, 1992](#)). Les auteurs y démontrent des mesures nocturnes de vapeur d'eau effectuées par lidar Raman à très longue distance (5 km) avec des précisions très intéressantes. Plus récemment, un groupe de l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) communiquait également sur un lidar Raman H₂O assez semblable en performance à celui que nous souhaitons réaliser, visant à effectuer des mesures à très haute résolution spatiale et temporelle (1.5 m et 1 s), à une portée moyenne de 10 à 500 m en plein jour ([Ristori et al. 2006](#) ; de très bons résultats de mesures furent publiés un peu plus tard par [Froidevaux et al. 2013](#)). Ces résultats très encourageants offraient un contraste étonnant avec ceux reportés sur les mesures hydrogène. Cela laissait finalement à penser que ces derniers avaient été obtenus dans des conditions défavorables aux mesures (conditions diurnes, réflexions et fluorescence parasites de hublots) et qu'une marge de progression importante était possible.

d. Principaux travaux accomplis

Mes travaux ont d'abord consisté à acquérir les bases nécessaires de spectroscopie par diffusion Raman (cf. chapitre 3.1.c). Rapidement, j'ai constaté que la vapeur d'eau pourrait être un interférent gênant pour la détection de l'hydrogène (une question étrangement laissée de côté dans

la littérature). Afin de mieux contrôler ce risque, et aussi parce que le suivi de la vapeur d'eau dans les galeries présentait un intérêt en soi pour l'Andra (pour le suivi de l'humidité des galeries de stockage), j'ai proposé en 2010 le concept représenté sur la Figure 53 de lidar Raman multi-voies, pour mesurer simultanément les profils de concentration des molécules H₂ et H₂O (en prenant comme référence radiométrique commune le signal Raman de la molécule N₂). Grâce à un modèle paramétrique simple, j'ai ensuite effectué une pré-étude de faisabilité d'un tel système, et dimensionné une architecture instrumentale préliminaire, capable en principe d'atteindre les performances requises par l'Andra.

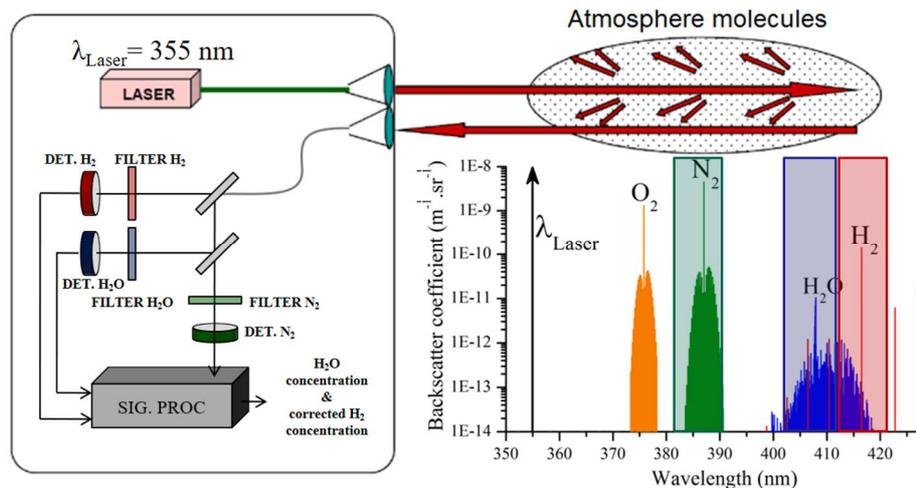


Figure 53 – Concept du lidar Raman CALISTO à 3 voies de mesures (H₂ à 416 nm, H₂O à 408 nm, N₂ à 387 nm) (Source : A. Liméry, Onera)

A l'issue de cette première phase d'étude, j'ai construit en 2011 avec l'Andra un accord de collaboration spécifique afin de co-financer le projet CALISTO (Caractérisation par Lidar des cellules de Stockage de déchets radioactifs). Ce projet visait à la réalisation, via une thèse, d'une étude détaillée sur le concept de lidar Raman tri-bande proposé, en parallèle du développement d'un démonstrateur de laboratoire. Le projet fut très long à mettre en place pour diverses raisons administratives, et ce n'est finalement qu'en 2014 que put commencer la thèse de mon doctorant Anasthase Limery (dirigé par Alain Hauchecorne, au Latmos).

Ce dernier a d'abord eu le grand mérite de rassembler, parmi des sources éparées, toutes les données bibliographiques nécessaires au calcul précis des spectres de diffusion Raman (rotationnels et vibrationnels) des principales espèces chimique d'intérêt pour le projet, c'est-à-dire N₂, H₂, et H₂O, ajoutant également O₂ au passage (cf. chapitre 3.1.c et la Figure 19). Ce fut là un travail minutieux et indispensable pour mener à bien le dimensionnement précis du lidar.

Nous avons ensuite réalisé les choix techniques principaux du démonstrateur. Toutes choses considérées (émission, détection, coûts...), nous avons notamment choisi de travailler avec une source laser Nd:YAG triplée à 355 nm (Quantel Ultra de 30 mJ/20 Hz), plus avantageuse qu'une source doublée à 532 nm, ou quadruplée à 266 nm. Nous avons ensuite défini l'architecture générale de l'analyseur spectral tri-bande, illustré sur la Figure 54. Le choix des filtres est naturellement critique, ces derniers ayant pour rôles d'une part de filtrer suffisamment le très fort signal Rayleigh-Mie et les réflexions du laser (plus de 120 dB de réjection), et d'autre part de diriger les signaux Raman de chaque molécule vers un détecteur dédié avec le maximum d'efficacité. Techniquement,

nous avons également fait le choix original d'utiliser des détecteurs de types SiPM (Silicium Photomultiplicateur), une technologie encore relativement récente en 2015. Ces détecteurs sont intéressants, en particulier par rapport aux tubes photomultiplicateurs, car bien qu'un peu plus bruités, ils sont comme eux extrêmement sensibles (ils permettent le comptage de photons), mais sont peu coûteux, plus robustes, et n'exigent pas de haute-tension d'alimentation.

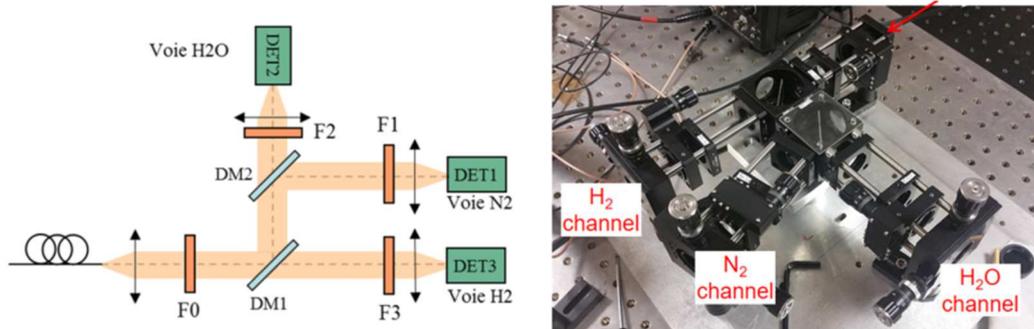


Figure 54 – Schéma et photo de l'analyseur spectral tri-bande. Le signal lidar arrive par la fibre (à gauche sur le schéma, à droite sur la photo) et rencontre plusieurs filtres et lames dichroïques qui permettent de distribuer les signaux Raman correspondant à chaque espèce vers un détecteur différent (N_2 à 387 nm, H_2O à 408 nm, et H_2 à 416 nm). (Source : [Limery, 2018](#))

Le développement matériel du lidar CALISTO et de la chaîne de traitement du signal ont été ensuite une réalisation collective, impliquant le doctorant pour une large part, mais également plusieurs collègues spécialisés en mécanique et instrumentation, et moi-même. Le lecteur intéressé trouvera sur cette réalisation de nombreuses informations complémentaires dans le mémoire de thèse ([Limery, 2018](#)). Je reviendrai seulement ici sur les principaux résultats expérimentaux que nous avons ensuite obtenus.

La Figure 55 (gauche) montre une photo du lidar CALISTO réalisé à la fin de la thèse (et du projet). On peut dire que le lidar est au stade « semi-intégré » : il est organisé en systèmes de racks séparés, reliés par câbles ou fibres optiques (analyseur spectral tri-bande, détecteurs, alimentations, etc...) et disposés dans une baie mobile. Par contre la table optique supérieure (porteuse du laser et du télescope) est encore d'un encombrement sous-optimal. La figure de droite montre l'expérience clé qui a été réalisée pour démontrer le bon fonctionnement du lidar. Le laser est émis depuis le laboratoire, et, pour rallonger le chemin parcouru, est dirigé vers un miroir de repli à environ 50 m avant d'arriver, au bout de 85 m, dans un tube permettant l'injection de différents mélanges de gaz.

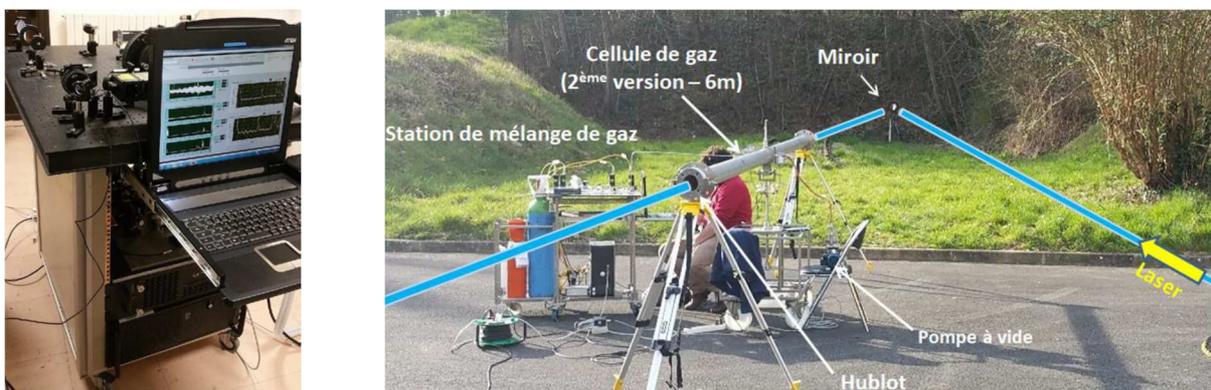


Figure 55 – A gauche, photo du lidar Raman CALISTO dans sa baie mobile. A droite, photo de l'expérience réalisée. (Source : [Limery, 2018](#))

La Figure 56 montre les rapports de mélange (Volume Mixing Ratio, ou VMR) en vapeur d'eau et dihydrogène mesurés par le lidar pour 3 mélanges de gaz différents dans le tube. Les courbes bleues correspondent à l'air extérieur humide, les vertes à l'injection d'air sec dans le tube, et les rouges à l'injection d'un mélange air sec-hydrogène (avec 2% d'hydrogène). On observe parfaitement la chute du VMR pour H₂O lorsqu'on injecte de l'air sec, et la hausse concomitante du VMR en hydrogène lorsqu'on injecte le mélange air-hydrogène. A l'extérieur du tube, les VMR enregistrés restent par contre conforme aux attendus. On peut souligner également l'excellente résolution spatiale et temporelle de ces mesures, de seulement 1 mètre et 1 minute, pour une puissance laser que nous avons limitée à seulement 5 mJ par impulsion. La précision relative des mesures de H₂ est estimée à 10% dans le tube, correspondant à une précision absolue de l'ordre de 2000 ppm. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication, à laquelle le lecteur pourra là aussi se référer pour davantage de détails (Liméry et al. 2017). Il y est notamment également démontré que le démonstrateur proposé pourrait en principe atteindre les performances souhaitées par l'Andra.

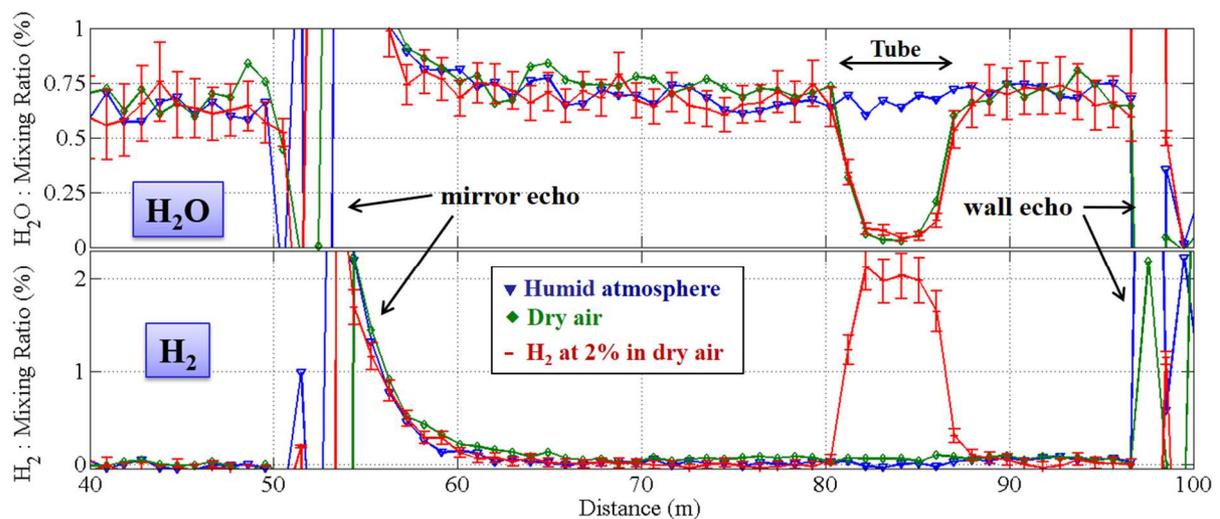


Figure 56 – Valeurs des rapports de mélange en vapeur d'eau et en dihydrogène, mesurés sur 95 m de distance, de nuit, pour différents mélanges de gaz injectés dans le tube. La résolution spatiale et temporelle des mesures est de 1 mètre et 1 minute. (Source : Limery, 2018)

Les travaux expérimentaux ont également permis de constater l'impact sur la mesure de la fluorescence des hublots, lorsqu'on en disposait sur le parcours. Cette question n'est pas anodine, car dans le contexte applicatif de l'Andra, il est évident qu'un hublot devra être disposé pour faire l'interface entre les galeries de stockage, et le lidar qui serait situé à l'extérieur. Nous avons constaté (cf. le mémoire de thèse) que la fluorescence des hublots que nous avons testés induisait une zone aveugle, pour la mesure Raman de l'hydrogène, allant de plusieurs mètres dans le meilleur des cas, à plusieurs dizaines de mètres dans le moins bon, en fonction de la composition du matériau du hublot. Pour statuer sur le niveau de nuisance de cette fluorescence (quelques mètres ne seraient pas gênants, mais quelques dizaines de mètres le seraient bien davantage), il sera nécessaire à terme de tester les hublots spécialement conçus par l'Andra, lesquels doivent répondre de performances optiques, mais également mécanique et radiologiques, et qui constituent en soi une activité de recherche.

e. Mise en perspectives des recherches menées

A l'issue du projet CALISTO (fin 2017), nous avons donc apporté la démonstration de faisabilité d'un lidar Raman tri-bande pour la mesure simultanée, à haute résolution spatiale, et avec une bonne précision, des rapports de mélange de la vapeur d'eau et du dihydrogène sur environ 100 m, ce qui allait bien au-delà des précédentes démonstrations de mesure d'hydrogène par lidar, décrites dans la littérature. De plus, puisque l'énergie laser utilisée n'était qu'à 20% de son maximum (5 mJ utilisés pour 30 mJ disponibles), il ne faisait aucun doute que le lidar CALISTO pouvait fonctionner, en l'état, à des portées supérieures à 100 m (que nous ne pouvions pas tester faute de disposer d'une ligne de visée suffisamment dégagée). Cette démonstration fut donc jugée convaincante, et il fut décidé par l'Andra de poursuivre le développement du lidar CALISTO, en lui assignant également des objectifs de mesures supplémentaires. En 2018 et 2019, j'ai ainsi coordonné pour l'Onera la mise en place d'un nouveau projet collaboratif, simplement nommé CALISTO-2.

Les objectifs du projet CALISTO-2, outre une montée en TRL (Technology Readiness Level) du démonstrateur, sont également de rajouter des voies de mesure du dioxygène O_2 et de la température. En effet, l'Andra a observé que le dioxygène pouvait être partiellement consommé dans les galeries de stockage (via divers processus chimiques) et souhaiterait donc suivre également l'évolution de ce processus au sein des galeries. D'autre part, un suivi de la température pourrait aussi révéler des colis de déchets défectueux (trop exothermiques par exemple). Si l'ajout d'une voie de mesure Raman vibrationnelle pour O_2 ne devrait pas poser de grandes difficultés, la mesure de température promet d'être le challenge technique de CALISTO-2. Il est connu que la température peut être mesurée par filtrage différentiel du spectre Raman rotationnel Stokes ou Anti-Stokes diffusé par l'atmosphère contrôlée. C'est une technique bien documentée (en Europe, les travaux de de l'université de Hohenheim ([Behrendt, 2000](#)) font par exemple référence) mais toujours délicate à mettre en place. De plus, l'exploitation du spectre rotationnel, dans un milieu où le rapport de mélange N_2/O_2 est potentiellement variable, crée des conditions atypiques qui nécessiteront une revisite à sa racine du concept de mesure.

Au-delà du projet CALISTO-2 et des applications spécifiques de l'Andra, le dihydrogène est également une source d'énergie décarbonée de plus en plus utilisée dans l'industrie, et promise à un bel avenir, comme en témoignent d'ailleurs les récentes annonces du gouvernement sur le plan de relance. Avec le développement industriel du secteur de l'énergie-hydrogène, les besoins en matière de surveillance, contrôle de fuites, et gestion du risque explosif lié à l'hydrogène devraient logiquement croître à l'avenir, ce qui pourrait susciter de nouveaux terrains d'application du lidar CALISTO, ou bien de nouvelles spécifications pour des démonstrateurs « cousins ». Plus spécifiquement, la technologie du lidar Raman pour le suivi de l'hydrogène pourrait également susciter l'intérêt pour le développement de l'avion décarboné de demain, domaine de recherche en plein essor et qui fait partie des missions centrales de l'Onera.

Le lidar Raman pourrait également être une solution d'intérêt, dans le domaine de la défense, pour la mesure d'émanations de chlore (Cl_2), car il s'agit également d'un gaz difficile à détecter en spectroscopie d'absorption (gaz diatomique homonucléaire). Dans le domaine de l'aéronautique, il serait également envisageable de recourir au lidar Raman pour la mesure de température et de densité, paramètres qui, comme on l'a vu plus haut, sont difficiles à mesurer en lidar Rayleigh en raison des perturbations de diffusion Mie et Brillouin.

Ces différents exemples illustreront peut-être qu'il est parfois utile, dans nos missions de recherche, de s'autoriser un « pas de côté » vers des applications a priori insolites comme celle de l'Andra, pour mieux revenir plus tard, avec de nouvelles idées et savoir-faire, sur des sujets plus centraux dans les domaines de la défense, de l'aéronautique, et de l'espace.

f. Références

- **Adler-Golden S.M**, Goldstein N., Bien F., Matthew M.W, Gersh M.E, Cheng W.K, Adams F.W, "Laser Raman sensor for measurement of trace-hydrogen gas", *Appl.Opt.* 31, pp.831-835 (1992)
- **Ball A.J**, "Investigation of gaseous hydrogen leak detection using Raman scattering and Laser-Induced Breakdown Spectroscopy", Thesis manuscript, University of Florida (2005)
- **Behrendt A.**, Reichardt J., « Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator », *Appl.Opt.* 39, pp.1372-1378 (2000)
- **De Groot W.** "The use of spontaneous Raman Scattering for hydrogen leak detection", NASA Contractor Report 195373 (1994)
- **Froidevaux M.**, Higgins C.W, Simeonov V., Ristori P., Pardyjak E., Serikov I., Calhoun R., Van den Bergh H., Parlange M.B, "A Raman lidar to measure water vapor in the atmospheric boundary layer", *Advances in Water Resources*, Vol. 51, p.345-356 (2013)
- **Liméry A.** « Étude et réalisation d'un lidar Raman pour la détection d'hydrogène et de vapeur d'eau dans une alvéole de stockage de colis radioactifs », Thèse de Doctorat de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, soutenue le 27 Mars 2018
- **Liméry A.**, **Cézar N.**, Fleury D., Goular D., Planchat C., Bertrand J., and Hauchecorne A. , "Raman lidar for hydrogen gas concentration monitoring and future radioactive waste management," *Opt. Expr.* **25**, 30636-30641 (2017)
- **Ninomiya H.**, Yaeshima S., Ichikawa K., "Raman lidar system for hydrogen gas detection", *Opt.Eng.* 46(9), 094301 (2007)
- **Ristori P.**, Serikov I., Simeonov V., Parlange M., Froidevaux M., « High resolution water vapor and temperature Raman Lidar », Présentation donnée à la conférence SESEC5 (2006)
- **Whiteman D.N**, Melfi S.H, Ferrare R.A, "Raman lidar system for the measurement of water vapour and aerosols in the Earth's atmosphere", *Appl.Opt.* 31, pp.3068-3082 (1992)

3. Les lidars IP-DIAL SHADOAS à source fibrée supercontinuum

a. Contexte et enjeux

Dès 2008, dans le cadre du projet ANR CONFIAN (CONTinuum à Fibres Infrarouges hAutement Non linéaires), une partie de l'activité de recherche du Pôle Laser de mon unité s'est tournée vers l'étude et le développement de sources impulsionnelles fibrées à supercontinuum dans le MWIR. J'ai présenté au chapitre 3.2.d les résultats obtenus au laboratoire dans ce domaine (voir Figure 36), et en 2012, notre équipe était l'une des rares dans le monde à disposer d'une source fibrée à supercontinuum émettant une puissance spectrale significative (0.1 mW/nm) dans la bande 3-4 μm . Il était donc particulièrement intéressant de chercher à valoriser cette innovation en étudiant le potentiel d'une telle source pour des applications lidar. J'ai été chargé pour ma part d'évaluer les perspectives d'applications pour la spectroscopie d'absorption.

Comme nous l'avons vu au chapitre 3.1.e, la bande MWIR offre dans ce domaine des perspectives d'applications à la fois civiles, avec la détection de composés organiques volatils (en premier lieu le méthane), et militaires, avec la détection de gaz explosifs, bien que la bande MWIR

dans ce domaine soit un peu moins bien adaptée que la bande LWIR. Je ne mentionnerai dans ce mémoire que les applications civiles envisagées.

En attendant la mise au point de la source supercontinuum en bande MWIR, survenue en 2012, j'ai lancé dès 2009 une première phase d'études dans le SWIR (1.3-2 μm), une bande spectrale plus facile d'accès en émission comme en réception (sources laser et analyseurs de spectres commerciaux). Les travaux effectués en bande SWIR nous ont en quelque sorte servi « d'entraînement » pour développer une méthodologie de mesure, ainsi que des techniques génériques de traitement des signaux de spectroscopie à supercontinuum.

b. Intérêt et défis posés

Les sources fibrées à supercontinuum sont spectralement très larges mais demeurent angulairement très directives (fibre émettrice de petit cœur). L'intérêt de ce type de source pour des applications lidar est donc clair. Dans le cas d'un lidar à absorption différentielle, le scénario le plus intéressant pour une source supercontinuum est celui où les espèces chimiques à caractériser ne sont pas préalablement connues, situation que l'on peut rencontrer par exemple dans le contexte de la surveillance de sites industriels particulièrement peu coopératifs, ou encore dans le contexte de réactions chimiques très complexes sur des systèmes de combustion. Dans ce type de scénario, émettre un spectre large est une stratégie sensée, puisqu'on ne sait pas exactement dans quelle bande spectrale vont signer les espèces en présence. La problématique de l'identification des espèces chimiques dans un signal de spectroscopie à supercontinuum doit alors être abordée, en plus du besoin de quantification.

Le lidar à supercontinuum peut également s'avérer intéressant pour mesurer des espèces chimiques aux signatures spectrales très larges, typiquement des molécules lourdes comme celles qui composent les gaz explosifs ou toxiques. Dans le cas où les molécules sont connues, et à signatures spectrales très fines (cas des gaz simples comme H_2O , CO_2 , CH_4 ...), la spectroscopie à supercontinuum paraît a priori moins pertinente puisque seule une petite fraction du spectre émis est exploitée. Mais elle conserve toutefois deux avantages. Tout d'abord le caractère simultané de l'émission en bande large, associé à la haute cadence de répétition des sources supercontinuum, permet d'envisager des mesures de gaz à haute résolution temporelle, utiles par exemple pour l'étude du milieu de combustion. Et deuxièmement, puisqu'il n'y a pas besoin d'accorder la source laser en longueur d'onde, celle-ci ne fait appel à aucun dispositif d'accordabilité mécanique (comme c'est le cas sur les NesCOPO) ou électrique (comme pour les lidars fibrés mono-fréquence). En termes de praticité opérationnelle, l'absence de tout élément mobile ou variable dans une source à supercontinuum, qui plus est fibrée, est ainsi un avantage important.

En dépit de ces avantages, réaliser un système lidar à source supercontinuum renfermait aussi, au début de nos travaux, plusieurs défis et questions ouvertes. Tout d'abord, la puissance spectrale par intervalle de longueur d'onde (0.1mW/nm, soit 4 μW /MHz à 3.5 μm) restait considérablement inférieure, de l'ordre de 3 ordres de grandeurs, à celles offertes par les sources mono-fréquences. D'emblée, il a donc été décidé de se concentrer sur des applications IP-DIAL, utilisant pour commencer un rétro-rélecteur en bout de de ligne de visée. D'autre part, le type de détecteur à employer, pour exploiter au mieux la large bande émise, se devait d'aller au-delà du simple analyseur de spectre à réseau tournant, qui ne permet qu'une analyse séquentielle des éléments spectraux successifs. Nous nous sommes donc tournés, pour les applications MWIR, vers des dispositifs spectrographiques. Sur le plan du traitement des signaux supercontinuum, le défi consistait d'une

part à développer une méthode efficace d'estimation de la concentration de multiples espèces de gaz, en prenant en compte les propriétés particulières de la source (ligne de base très variable, bruit d'intensité) et du récepteur (fonction de convolution spectrale). D'autre part, la méthode à employer pour identifier les espèces chimiques en présence à partir des signaux était un sujet très ouvert. Enfin, le défi posé par la mise en œuvre pratique de la source à supercontinuum MWIR posait un défi en soi. En effet, cette dernière, bien qu'entièrement fibrée, présentait un point de fragilité important à l'interface de la fibre de pompage, en silice, et de la fibre en verre fluoré générant le supercontinuum, de sorte que la mise en œuvre de la source restait un travail délicat.

c. Etat de l'art au démarrage des travaux (2012)

La détection à distance de gaz polluants multi-espèces dans l'atmosphère, par optique active et à large bande spectrale, n'est pas une idée nouvelle. L'idée connaît un essor particulier au début des années 1980 avec la mise au point de la technique DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) (Platt 1994). Utilisant une source incohérente (lampe arc Xénon) émettant dans l'UV/visible, la technique DOAS permet alors de détecter de nombreuses espèces d'intérêt, dont O₃, NO₂, SO₂, de nombreux hydrocarbonés aromatiques (benzène, toluène...). En revanche, la plupart des COV (Composés Organiques Volatils) ne peuvent être mesurés, faute de source d'illumination dans l'infrarouge en bande MWIR.

Le début des années 2000 voit le développement d'un nouveau type d'instrument de spectroscopie en bande large. Le lidar femtoseconde à lumière blanche, basé sur la filamentation dans l'atmosphère d'impulsions ultra-courtes et intenses (5 TW crête) et la rétrodiffusion d'une lumière 'blanche' qui s'en suit (Kasparian et al. 2003), couvre en effet un spectre très large (0.23-4.5 μm) et permet d'effectuer des mesures de gaz atmosphériques résolues en distance (RR-DIAL). Des résultats prometteurs sont obtenus dans la bande 0.6 – 1 μm, mais l'intensité diffusée dans l'UV et dans l'IR est trop faible pour pouvoir être efficacement exploitée. Par ailleurs, la source laser, de la taille d'un container, reste très complexe et encombrante.

Dans les années 2000, des sources laser fibrées à supercontinuum dans le visible/SWIR (jusqu'à 2 μm) sont développées dans différents laboratoires, et bientôt produit industriellement. L'Université de Cambridge (Kaminski et al. 2008) propose alors une technique de spectroscopie large-bande élégante, dispersant temporellement le spectre supercontinuum SWIR dans des fibres dispersives, mais malheureusement inapplicable en bande MWIR, faute de fibres optiques aux propriétés adéquates. Des démonstrateurs de lidar à supercontinuum commencent également à être développés à l'université de Pennsylvanie (Brown et al. 2008) et à Osaka (Somekawa et al. 2011). Ces démonstrateurs emploient en réception des analyseurs de spectres à réseaux tournants, et bien que ce ne soit pas la solution la plus efficace du point de vue optique, ils permettent de démontrer respectivement la faisabilité de mesure de la concentration de H₂O et de CO₂ sur des trajets de plusieurs centaines de mètres avec une cible réfléchive. La précision de mesure de ces systèmes n'est toutefois pas étudiée en détails.

Dans le MWIR, la bibliographie en 2012 est beaucoup plus clairsemée, car il n'existe pas encore de source commerciale. Il faut donc disposer de la capacité d'en réaliser au laboratoire. L'équipe en pointe dans ce domaine à cette époque est celle de l'université du Michigan, qui publie sur l'utilisation d'une source supercontinuum ZBLAN très puissante (3.9W) pour la détection de composés explosifs déposés sur des cibles, à une distance de quelques mètres (Kumar et al. 2012).

L'une des limites de cette expérience, par ailleurs réussie, est qu'elle nécessite une mesure préalable de la réflectivité spectrale de la cible avant de déposer les substrats explosifs dessus, afin de procéder par analyse différentielle, ce qui limite l'applicabilité opérationnelle du principe de mesure à des scénarios où règnent des conditions de mesures très contrôlées.

d. Principaux travaux accomplis

Mes travaux sur les lidars IP-DIAL à source fibrée supercontinuum ont commencé en 2009. A cette époque, les travaux de thèse de Mathieu Duhant sur la génération de supercontinuum dans le MWIR venaient de commencer, et la source MWIR que ce dernier développa par la suite (cf. chap.3, Figure 36) n'était pas encore disponible. J'ai donc commencé par des travaux exploratoires dans le SWIR, à l'aide d'une source commerciale (chap.3, Figure 34). J'ai très vite été rejoint dans ces travaux par un étudiant en post-doctorat, Julien Fade (2009-2010), puis par mon premier doctorant, Alexandre Dobroc (2010-2013). Ensemble nous avons pu mener un travail de fond tant du point de vue théorique (modélisation du signal et des performances prévisionnelles d'un lidar à supercontinuum) qu'expérimental (mesures de spectres d'absorption, et traitement des données expérimentales).

Sur le plan expérimental, nous avons d'abord développé en 2010 une première version du banc qui fut nommé plus tard SHADOAS (Supercontinuum Light Generation for Differential Optical Absorption Spectroscopy), représenté en Figure 57. Ce dispositif, qui fut amélioré progressivement au cours de la thèse d'Alexandre Dobroc, nous a permis de réaliser des premiers essais de mesure de vapeur d'eau (naturelle) et de méthane (dans une cellule) dans le SWIR, dans les bandes 1.3-1.4 μm et 2.1-2.2 μm .

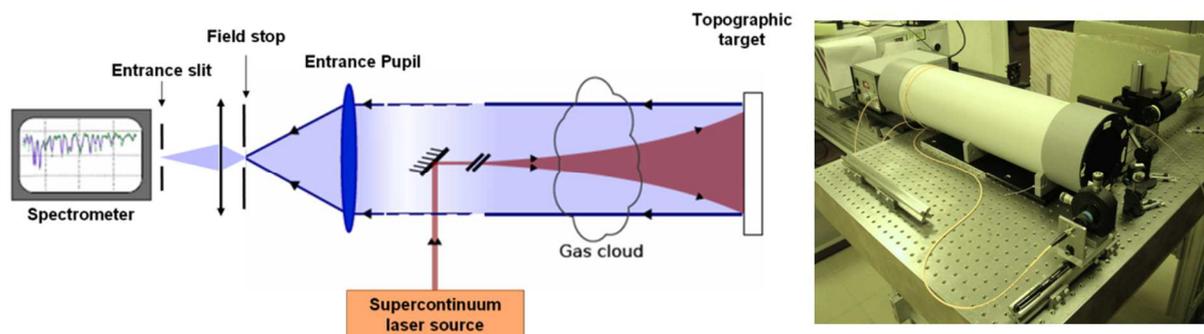


Figure 57 – Schéma et photo du banc SHADOAS dans le SWIR. (Source. J. Fade, Onera)

Bien que sous-optimal du point de vue de la détection (le récepteur était un analyseur de spectre optique commercial à réseau tournant), ces expériences ont permis de fournir la matière nécessaire au développement et au test de techniques variées de traitement de signal. Les signaux brut enregistrés ressemblaient typiquement à celui illustré en Figure 58. On y aperçoit nettement des raies d'absorption qui se superposent sur une ligne de base d'allure quelconque.

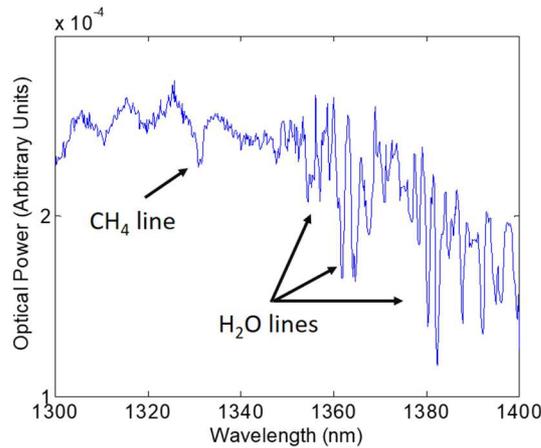


Figure 58 – Signal lidar IP-DIAL à source supercontinuum enregistré dans le SWIR (Source : A.Dobroc, Onera)

Cette ligne de base s'avéra à terme être un problème très significatif pour les mesures supercontinuum. Dans le cadre des travaux de post-doctorat de Julien Fade, nous avons d'abord essayé de la calibrer, c'est-à-dire de la mesurer indépendamment pour pouvoir mieux la soustraire aux signaux spectroscopiques ensuite. Expérimentalement, la chose était faisable (bien que de manière imparfaite et contraignante), de sorte que nous avons choisi d'ignorer ce problème dans un premier temps. Dans le cadre simplifié d'une ligne de base connue, le calcul théorique des performances prévisionnelles d'un lidar supercontinuum a pu être développé (Fade et al. 2010) en distinguant deux cas de contexte :

- celui d'une estimation paramétrique de la concentration de multiples espèces de gaz. Pour ce cas nous avons calculé les Bornes de Cramer-Rao (cf. chapitre 3.3.b) du système modélisé, et vérifié que ces bornes étaient bien atteintes par un estimateur au maximum de vraisemblance (MLE);
- celui d'une prise de décision binaire quant à la présence ou non d'un gaz donné dans la ligne de visé. Pour ce cas, nous avons calculé les courbes ROC du système (cf. chapitre 3.3.c), en supposant l'application aux données d'un test de vraisemblance (LRT).

Puis nous nous sommes concentrés sur le problème de l'identification des espèces de gaz en présence, lorsque ces dernières ne sont pas a priori connues. Comme exposé au chapitre 3.3.d, l'approche que nous avons suivie consistait à trouver les bons « régresseurs » d'un signal parmi une liste de gaz candidats, tout en veillant à pénaliser les modèles trop complexes, c'est-à-dire comportant trop de régresseurs et menant à un ajustement exagéré du bruit (*noise over-fitting*). Une méthode itérative et non supervisée d'identification des gaz a été mise au point, en comparant différents critères de pénalisation des modèles complexes. En particulier, des critères nommés MDL (Minimum Description Length) basés sur la théorie descriptive de l'information (Rissanen 2007) ont été testés sur des signaux de simulation (Fade et al. 2011), démontrant de meilleures performances statistiques que des critères plus classiques (cf chap.3.3.d). A l'issue du post-doctorat de J.Fade, j'ai poursuivi ces travaux en démontrant l'applicabilité de l'algorithme d'identification réalisé à des signaux réels mesurés au laboratoire (Cézar et al. 2011). La Figure 59 montre par exemple, à partir de signaux enregistrés dans le SWIR, comment l'algorithme sélectionne à chaque itération une nouvelle espèce de gaz, s'arrêtant ici à deux régresseurs (et les bons) parmi une liste de 5 espèces interférant dans cette gamme spectrale.

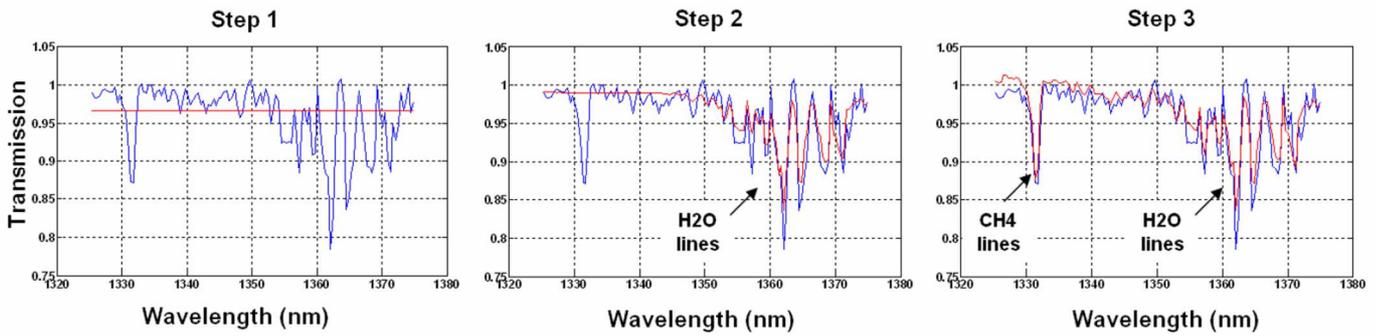


Figure 59 – Illustration de la méthode d’identification d’espèces gazeuses dans des signaux de spectroscopie à supercontinuum, par l’algorithme d’identification itérative à modèles complexes pénalisés (ici, par le critère dit nMDL qui est l’un des critères possibles de *Minimum Description Length* (MDL) proposés dans la littérature. (Source : Cézard et al. 2011)

Néanmoins, si l’identification était bonne, la quantification des gaz, réalisée simultanément à l’identification, apparaissait biaisée en raison d’une part de la correction imparfaite de la ligne de base, et d’autre part de l’absence de prise en compte des non-linéarités du signal apportées par la fonction d’appareil du spectromètre et par la loi de Beer-Lambert.

Les travaux de mon premier doctorant, Alexandre Dobroc, ont ensuite permis d’aborder ces deux problèmes, en développant tout d’abord un modèle non linéaire décrivant le signal mesuré de manière plus réaliste, puis en mettant au point une technique de filtrage de Fourier de la ligne de base. Inspiré des méthodes employées dans le domaine de la DOAS (Platt 1994), ce filtrage permet de supprimer toutes les variations basse fréquence de la ligne de base, qui n’a donc plus besoin d’être connue, mesurée, ou modélisée par une fonction hypothétique. La Figure 60 montre un exemple de signal après filtrage, avec une ligne de base ramenée à zéro. Un nouvel algorithme dit MCI (Moindre Carrés Itératifs) a alors été développé par le doctorant pour quantifier la concentration d’espèces multiples à partir de ces signaux filtrés, et les nouvelles bornes de Cramer-Rao adaptées aux signaux filtrés ont également été calculées, permettant d’évaluer le coût de ce filtrage en termes de précision prévisionnelle (Dobroc & Cézard 2012). Des mesures lidar de vapeur d’eau à courte portée (4 m) et simultanément de méthane (dans une cellule), toujours en bande SWIR, nous ont permis de valider la méthode de filtrage et d’estimation proposée (Figure 60).

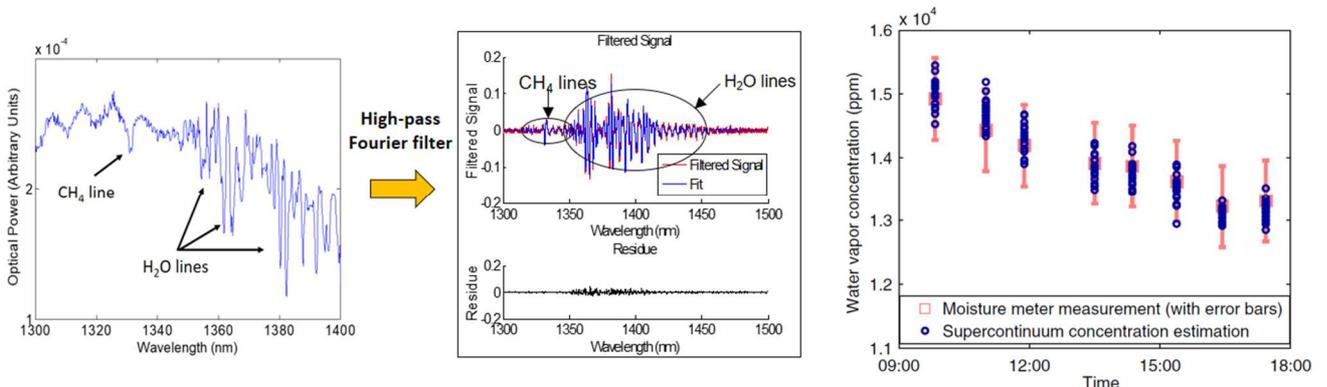


Figure 60 – A gauche, signal de spectroscopie à supercontinuum enregistré dans le SWIR au moyen d’une source commerciale et d’un spectromètre à réseau. La ligne de base, très variable en fonction des paramètres instrumentaux ne peut être modélisée facilement. Au milieu, la ligne de base a été filtrée dans le domaine de Fourier. Le signal supercontinuum devient alors répétable dans le temps. A droite, validation des mesures du rapport de mélange en vapeur d’eau par lidar IP-DIAL à supercontinuum, par comparaison avec les mesures d’un hygromètre calibré. (Source : Dobroc & Cézard 2012)

Après ces premiers résultats dans le SWIR, et puisqu'en parallèle la source supercontinuum MWIR avait pu être développée avec succès dans le cadre de la thèse de Mathieu Duhant (Duhant 2012, Figure 36), la suite des travaux a été orientée dans la bande MWIR.

Avec mon doctorant Alexandre Dobroc, nous avons réalisé un second banc de mesure fonctionnant dans le MWIR et représenté en Figure 61, adapté à la réalisation de mesures spectroscopiques au-delà de $3\mu\text{m}$. L'originalité de ce banc, outre sa source laser, a été de mettre en place une mesure par spectrographe statique, en utilisant une barrette de 256 détecteurs photo-conductifs en PbSe, en lieu et place du spectromètre à balayage (par réseau tournant) que nous utilisions dans le SWIR. Ce faisant, le système de mesure devenait bien plus efficace du point de vue radiométrique, captant, à chaque impulsion émise, le signal supercontinuum sur toute une étendue spectrale. Autre point intéressant, ce montage de spectroscopie en bande large dans le MWIR devenait aussi complètement statique, et donc potentiellement très stable dans la perspective de futures applications de terrain.

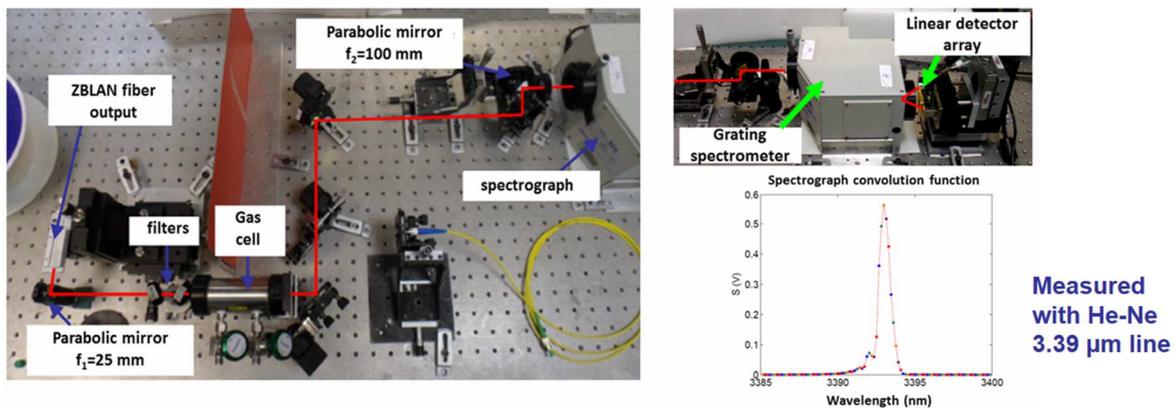


Figure 61 – Photo du banc SHADOAS dans le MWIR. Deux miroirs amovibles (non visibles ici) permettent de dévier le faisceau émis pour lui faire parcourir un trajet en espace libre jusqu'à un rétro-rélecteur. Une barrette linéaire de détecteurs PbSe en sortie permet d'exploiter à chaque impulsion émise une large fraction du spectre émis. (Source : Cézard et al. 2014)

Grâce à ce banc, le doctorant a pu réaliser des mesures de concentration de méthane à $3.3\mu\text{m}$ dans une cellule de gaz, et tester les algorithmes que nous avons développés auparavant. Les résultats furent positifs, à ceci près que l'estimateur MCI développé dans le SWIR se révéla inapproprié pour estimer avec précision la concentration d'un gaz présentant des raies très saturées en absorption (le méthane absorbe beaucoup plus dans le MWIR que dans le SWIR, comme on l'a montré au chap.3.1.e). Pour pallier à ce défaut, j'ai développé l'année suivante un estimateur non linéaire par maximum de vraisemblance, dont les bonnes performances sont illustrées par la Figure 62. J'ai également poursuivi le perfectionnement du banc SHADOAS-MWIR, et démontré la faisabilité de mesures spectrales sur plus de 200 nm d'étendue dans le MWIR, avec une résolution de 0.8 nm en moins de 0.1 seconde (Cézard et al. 2014).

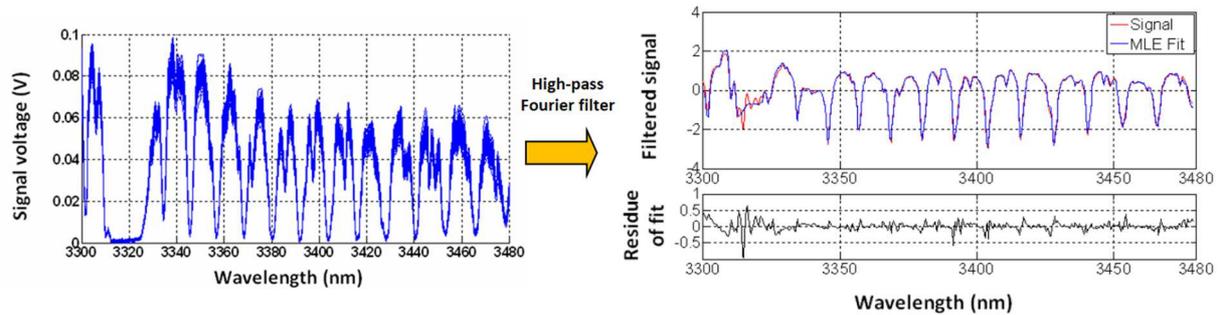


Figure 62 - A gauche, signal supercontinuum, enregistré dans le MWIR au moyen du banc SHADOAS, après propagation dans une cellule de gaz contenant un bar de méthane pur. A droite, le même signal après filtrage de la ligne de base. Un estimateur MLE lui est appliqué, permettant un excellent fit sur l'ensemble de la zone spectrale, y compris la raie d'absorption très saturée à 3320 nm. (Source : Cézard et al. 2014)

Ces bons résultats expérimentaux et algorithmiques auraient logiquement pu nous entraîner vers la réalisation d'un véritable démonstrateur lidar à supercontinuum dans le MWIR, en nous tournant vers des expériences de mesures à distance. Néanmoins, il restait avant cela un important problème technique à résoudre, et nous n'y sommes pas parvenus. Il s'agit du problème, mentionné plus haut, de l'interfaçage mécanique entre la fibre en silice convoyant le faisceau de pompage et la fibre en verre fluoré générant le supercontinuum. Au cours de tous les essais menés dans le MWIR, les deux fibres étaient simplement mises en vis-à-vis au moyen d'une soudeuse à fibre (un instrument coûteux mais qui permet d'aligner deux fibres avec une bonne précision). Il n'était pas possible de souder directement les deux fibres ensemble car les points de fusion de la silice et du verre fluorés diffèrent de presque 1000°C. Mais il n'était pas possible non plus de progresser vers un démonstrateur lidar fiable sans résoudre ce problème. Nous avons testé plusieurs méthodes alternatives (collage, capillaires...), relatées dans Dobroc, 2013, pour tenter d'assurer la pérennité du taux de couplage entre les deux fibres, sans soudeuse. Mais en dépit de quelques espoirs, ces essais se sont tous soldés, au bout de quelques jours au mieux, par une dégradation rédhibitoire de l'une ou l'autre des fibres.

Après tous les travaux menés sur la spectroscopie supercontinuum sur plusieurs années, cet obstacle a été pour moi une source de frustration. Néanmoins, même si nous aurions probablement trouvé avec le temps une solution, ce n'est pas la seule raison qui nous a poussés à arrêter là nos efforts de recherche sur ce thème. A partir de 2014, d'une part les expressions d'intérêt que nous pouvions recueillir de la part de partenaires ou de financeurs se dirigèrent plutôt vers la bande LWIR que la bande MWIR, ce qui impliquait d'aller vers l'emploi de fibres en verre de chalcogénures (cf. chap.3.2.d). Or les résultats de génération de supercontinuum obtenus au laboratoire dans ces fibres extrêmement fragiles s'étaient révélés peu probants. D'autre part, en 2014 ont démarré pour moi deux projets d'envergure sur les lidars CALISTO et VEGA, qui allaient requérir toute mon attention pendant plusieurs années, ainsi que celle de plusieurs collègues du Pôle Laser. En 2015, il a donc été collégialement décidé, au sein de mon unité de recherche, de suspendre les activités de recherches et développement des sources laser et des systèmes lidars à supercontinuum.

e. Mise en perspectives des recherches menées

Même si je ne suis pas parvenu à faire du lidar IP-DIAL à source supercontinuum un véritable outil de terrain, ni à lui donner de larges perspectives applicatives dans ce domaine, le cycle de recherche que j'ai consacré à ce sujet pendant environ 5 ans a été extrêmement riche d'enseignements. Il m'a tout d'abord donné l'occasion de développer des moyens de modélisation

de la transmission de différents mélanges de gaz, dans différentes bandes spectrales (cf. chap.3.1.d). Il m'a également permis d'acquérir de nouvelles connaissances dans des domaines très variés couvrant aussi bien la technologie (effets non linéaires dans les fibres optiques, photodétection, analyse spectrale en bande SWIR et MWIR) que le traitement de signal (estimation, détection, et identification de multiples espèces de gaz). Acquérir une bonne maîtrise de tous ces champs de connaissance fut pour moi un défi, mais cela m'a permis de constituer un véritable socle sur lequel se sont appuyés bon nombre des travaux que j'ai menés par la suite (lidars VEGA, HELENA, SEPIA, MICLID, Minipeigne...).

Les sources fibrées à supercontinuum, et leur emploi dans de nouveaux systèmes de mesure, sont restées un champ de recherche dynamique depuis 2015. La technologie laser a progressé, et l'on trouve aujourd'hui dans le commerce des sources fibrées à supercontinuum dans le MWIR (NKT Photonics au Danemark, Leukos en France). Les obstacles techniques que nous avons rencontrés ont donc été franchis, et il est possible aujourd'hui, pour des concepteurs lidar, de se concentrer entièrement sur l'intégration de ce type de source dans des systèmes et sur l'exploitation scientifique des données. On trouve dans la littérature de récentes réalisations de lidar à supercontinuum pour le diagnostic de milieux de combustion à courte portée dans le SWIR ([Blume & Wagner 2015](#), [Saleh et al. 2020](#)), ou de cellules de gaz dans le MWIR ([Jahromi et al. 2020](#)). Mais il semble que l'usage de sources supercontinuum pour des applications de lidars DIAL à longue distance soit encore peu répandu, ce qui semble confirmer la difficulté de l'exercice.

A l'Onera, les sources fibrées à supercontinuum sont aujourd'hui utilisées en télédétection dans d'autres champs applicatifs, notamment la caractérisation par lidar à courte portée de panaches d'aérosols ([Gaudfrin 2020](#)), ou encore l'imagerie laser hyper-spectrale. Ces développements se déroulent d'ailleurs dans l'unité DOTA/IODI, que j'ai rejoint fin 2019. Ce sont donc des sujets sur lesquels il me sera possible de contribuer à l'avenir.

f. Références

- **Blume N.G.**, and S. Wagner, "Broadband supercontinuum laser absorption spectrometer for multiparameter gas phase combustion diagnostics," *Opt. Lett.* **40**, 3141-3144 (2015)
- **Brown D. M.**, K. Shi, Z. Liu, and C. R. Philbrick, "Long-path supercontinuum absorption spectroscopy for measurement of atmospheric constituents," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 8457-8471, (2008)
- **Cézard N.**, A. Dobroc, G. Canat, M. Duhant, W. Renard, C. Alhenc-Gelas, S. Lefebvre, and J. Fade "Supercontinuum laser absorption spectroscopy in the mid-infrared range for identification and concentration estimation of a multi-component atmospheric gas mixture", *Proc. SPIE 8182, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VII*, 81820V (2011)
- **Cézard N.**, G. Canat, A. Dobroc, M. Duhant, W. Renard, and C. Besson, "Fast and wideband supercontinuum absorption spectroscopy in the mid-IR range," in *Imaging and Applied Optics 2014*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper LW4D.4 (2014)
- **Dobroc A.** and **N. Cézard**, "Performance assessment and signal processing for range-integrated concentration measurement of gas species using supercontinuum absorption spectroscopy," *Appl. Opt.* **51**, 8470-8480 (2012)
- **Dobroc A.**, Etude et réalisation de dispositifs optiques à large couverture spectrale pour la détection multi-gaz à distance. Thèse de l'Ecole Polytechnique, soutenue le 18 décembre 2013
- **Duhant M.**, Etude des sources supercontinuum à fibres transparentes dans le moyen infrarouge, Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne, soutenue le 12 octobre 2012.
- **Fade J.**, and **N. Cézard**. Supercontinuum Lidar absorption spectroscopy for gas detection and concentration estimation. International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 25, Jul 2010, Saint-Petersburg, Russia (2010)

- **Fade J.**, S. Lefebvre, and **N. Cézard**, "Minimum Description Length approach for unsupervised spectral unmixing of multiple interfering gas species," *Opt. Express* 19, 13862-13872 (2011)
- **Gaudfrin F.**, « Lidar supercontinuum pour la caractérisation spectrale des milieux diffusants à haute résolution spatiale : Étude numérique et développement instrumental », thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, soutenue le 17 février 2020
- **Jahromi K.E.**, M. Nematollahi, Q. Pan, M. A. Abbas, S. M. Cristescu, F. J. M. Harren, and A. Khodabakhsh, "Sensitive multi-species trace gas sensor based on a high repetition rate mid-infrared supercontinuum source," *Opt. Express* 28, 26091-26101 (2020)
- **Kasparian J.** et al., « White light filaments : sources for long-range atmospheric analysis », *Science* 301, 31 (2003)
- **Kaminski C.**, R. Watt, A. Elder, J. Frank, and J. Hult, "Supercontinuum radiation for applications in chemical sensing and microscopy," *Applied Physics B*, vol. 92, no. 3, pp. 367-378, (2008)
- **Kumar M.**, M. N. Islam, F. L. Terry, M. J. Freeman, A. Chan, M. Neelakandan, and T. Manzur, "Stand-of detection of solid targets with diffuse reflection spectroscopy using a high-power mid-infrared supercontinuum source," *Appl. Opt.*, vol. 51, pp. 2794-2807 (2012)
- **Platt U.**, "Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)", in *Air Monitoring by Spectroscopic techniques*, M. Sigrist, ed. (John Wiley & Sons, Inc. 1994).
- **Rissanen J.**, *Information and Complexity in Statistical Modeling* (Springer, 2007).
- **Saleh A.**, P. Ryzkowski, G. Genty, and J. Toivonen "Short-range supercontinuum Lidar for combustion diagnostics (Conference Presentation)", *Proc. SPIE 11260, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems*, 1126015 (2020)
- **Somekawa T.**, N. Manago, H. Kuze, and M. Fujita, "Differential optical absorption spectroscopy measurement of CO₂ using a nanosecond white light continuum", *Opt. Lett.*, vol. 36, pp. 4782-4784 (2011).

4. Les lidars IP-DIAL SEPIA et MICALID à source accordable NeSCOPO

a. Contexte et enjeux

Les sources accordables à cristaux non linéaires de type NeSCOPO (Nested Cavities Optical Parametric Oscillator) représentent une seconde technologie très intéressante pour la spectroscopie d'absorption en bande large. Contrairement aux sources supercontinuum qui délivrent une lumière de large bande spectrale à chaque impulsion, une source NeSCOPO délivre un rayonnement mono-fréquence, de largeur spectrale bien inférieure à la largeur d'une raie d'absorption, mais largement accordable en longueur d'onde en jouant sur divers degrés de libertés mécaniques et thermiques du dispositif (cf. chap.3.2.e). Ces sources particulières sont développées à l'ONERA par l'équipe « Sources Laser et Métrologie » (SLM) du département de mesures physiques (DPHY). Mes travaux dans ce domaine se sont donc naturellement déroulés en collaboration avec cette équipe. Cette collaboration a débuté dans le cadre du PRF SEPIA (Projet de Recherche Fédérateur de l'Onera, 2012-2016), au cours duquel notre objectif a été de développer un prototype lidar accordable pour la détection de gaz industriels polluants en bande MWIR (cf. chap.3.1.e). Dans ce projet, mon rôle a consisté à développer le modèle de performances prévisionnelles du lidar ainsi que des techniques de traitement de signal adaptées. J'ai également conduit une réflexion théorique plus personnelle sur les moyens d'optimiser le système lidar par un usage parcimonieux (au sens commun) des différentes longueurs d'ondes que le NeSCOPO est capable d'émettre.

Cet axe de collaboration s'est ensuite poursuivi pendant le projet MICALID (2015-2018, financé par l'EDA - Agence Européenne de Défense). MICALID est un lidar émettant dans la bande LWIR (7.5-10.7 μm) pour la détection de gaz toxiques militaires. Il est basé sur un NeSCOPO à 2 μm amplifié, suivi d'un étage supplémentaire de conversion de fréquence par DFG (Difference Frequency

Generation) pour accéder à la bande LWIR. Dans ce projet, le développement expérimental du lidar a été réalisé par l'équipe DPHY/SLM et je ne détaillerai donc pas cet aspect ici. J'ai quant à moi réalisé le modèle de performances prévisionnelles du lidar (en mode IP-DIAL), étendu la méthodologie d'optimisation de la séquence de longueur d'onde du lidar, et également étudié les performances du lidar en détection (courbes ROC, cf. chap.3.3.c).

b. Intérêt et défis posés

Le grand intérêt de la technologie NesCOPO, pour les lidars DIAL à large bande, tient en ce qu'elle offre une combinaison très intéressante de qualités, alliant une forte énergie par impulsion (grande portée), une faible largeur spectrale (haute-résolution spectroscopique), et une grande accordabilité (grande couverture spectrale). Cette dernière s'obtient aujourd'hui en jouant sur différents degrés de libertés mécaniques (translation longitudinale des miroirs de la cavité résonnante, translation transversale du cristal intra-cavité) ou thermique (changement de température du cristal). Ces différents degrés de liberté confèrent aux sources NesCOPO une grande souplesse sur le choix de la longueur d'onde émise. Ils exigent en échange une très bonne maîtrise des conditions et du réglage thermomécanique de la cavité, ce qui constitue l'un des défis importants pour cette technologie. Les fortes énergies impulsives obtenues impliquent également des problématiques de tenue au flux des cristaux non linéaires.

Ma contribution aux projets SEPIA et MICLID s'est essentiellement portée sur le terrain de la modélisation instrumentale, avec tout d'abord l'ambition de réaliser un code de calcul permettant d'anticiper les performances prévisionnelles d'un lidar DIAL à NesCOPO dans une grande variété de situations physico-chimiques. L'exploitation de cet outil m'a ensuite permis de proposer des méthodes originales d'optimisation du fonctionnement de ce type d'émetteur. En travaillant également sur le traitement des données, mon objectif a été d'appliquer à ce type de lidar les techniques d'estimation au maximum de vraisemblance, et de détection à seuil de Neyman-Pearson (cf. chap.3.3), auxquelles je m'étais précédemment formé. S'il serait peut-être exagéré de dire que nous avons relevé des défis majeurs dans ces domaines, la modélisation de performances système, et l'obtention de mesure de gaz de qualité, métrologiquement qualifiées, n'en restent pas moins des travaux de valeur, comme le montre le bon accueil fait à ces travaux dans des revues scientifiques.

c. Etat de l'art au démarrage des travaux (2012)

L'utilisation de sources OPO accordables pour réaliser des lidars DIAL dans la bande MWIR a fait l'objet de très nombreux travaux par le passé. Le bref état de l'art présenté ici ne vise donc pas à l'exhaustivité, et ne donnera que quelques points de repère. En Europe, l'une des équipes en pointe sur ce sujet dans les années 2000 est par exemple celle de l'Université de Lund ([Weibring et al. 2004](#)), dont les travaux illustrent bien la possibilité de détecter, identifier et quantifier un mélange d'alcanes avec des précisions intéressantes (10-20 ppm.m). En France, l'Ineris (Institut National de l'environnement industriel et des risques) est équipée d'un camion mettant en œuvre un OPO accordable en bande MWIR pour le contrôle d'effluents industriels ([Fréjafon 2010](#)). Au Royaume-Uni, le National Physics Laboratory (NPL), dispose également d'un équipement similaire ([Innocenti et al. 2017](#)). A l'Onera, l'innovation du NesCOPO conduit à des démonstrations de mesures multi-espèce à courte portée ([Hardy et al 2012](#)), avec une technologie disposant d'un plus grand potentiel de compacité vis-à-vis des systèmes existants par ailleurs. La thèse de Jessica Barrientos Barria est alors lancée afin de poursuivre ces efforts et développer des prototypes lidar dans le SWIR à 2 μm (pour le CO_2) et dans le MWIR autour de 3.3 μm (pour le méthane et les COV).

Dans la bande LWIR, les développements lidars sont beaucoup moins nombreux, car c'est une bande plus difficile d'accès. Les prototypes réalisés reposent presque tous sur l'emploi de sources laser à gaz CO₂, capables d'émettre des raies discrètes dans les bandes 9.2-9.8 μm et 10.1-10.8 μm. Aux Etats-Unis, on peut mentionner par exemple les travaux précurseurs de l'équipe du MIT (Menyuk et al. 1982), et plus tard d'une équipe de Los Alamos National Laboratory (Quagliano et al. 1997), pour la réalisation de lidars LWIR dédiés à la mesure de gaz toxiques. En France, le lidar MIRELA exploite la même technologie, et dans le même but, dès la fin des années 90 (Adam et al. 1997). Les lasers CO₂ présentent néanmoins plusieurs inconvénients majeurs. D'une part, ils ne peuvent émettre que sur des raies discrètes en nombre limité, ce qui diminue les possibilités d'évitement des interférences avec les autres gaz. D'autre part, ils ne peuvent pas couvrir la bande autour de 8.3 μm, qui renferme les signatures spectrales des gaz moutardes, particulièrement stratégiques dans le domaine militaire. L'utilisation d'une source NesCOPO dans le LWIR, résolvant ces deux problèmes, se présentait donc comme une importante innovation vis-à-vis de l'état de l'art.

d. Principaux travaux accomplis

Mes premiers travaux, dans le domaine des lidars DIAL à OPO accordables pour la détection de gaz, se sont tenus dans le cadre du PRF SEPIA, dédié à la réalisation de moyens de mesure des COV. Ils ont d'abord consisté à développer un outil de modélisation générique des performances d'un tel lidar, en mode RR-DIAL ou IP-DIAL. Je me suis basé pour ce faire sur l'outil de calcul des sections efficaces d'absorption que j'avais précédemment réalisé (cf. chap. 3.1), en y ajoutant différents modules pour prendre en compte :

- les paramètres physico-chimique de l'atmosphère le long de la ligne de visée (profils de température, pression, et de concentration des différents gaz),
- les paramètres de l'émetteur du laser (longueurs d'ondes émise, énergie, cadence...)
- les paramètres du récepteur (télescope, détecteur InSb ou HgCdTe, pré-amplificateur transimpédance) en me limitant au procédé de détection directe, généralement employé avec la technologie NesCOPO.

En exploitant l'ensemble de ces données, j'ai développé un outil de calcul des bornes de Cramer-Rao pour l'estimation des différents gaz observés, et dans des conditions d'observations définies de manière extrêmement souples. L'outil de modélisation, nommé LIDIASOL (Lidar Dial pour application Sol) est synthétisé en Figure 63.

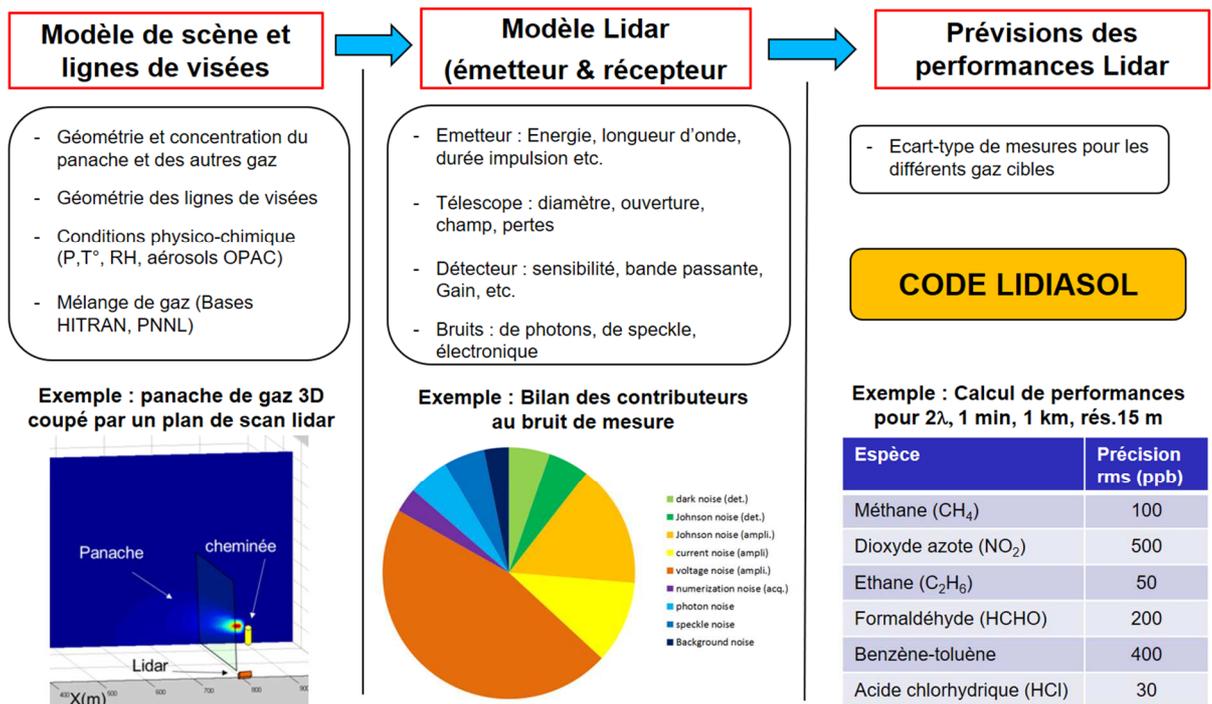


Figure 63 – Illustration du fonctionnement du code LIDIASOL

Les tests expérimentaux du lidar SEPIA ont été réalisés dans le cadre conjoint des thèses de Jessica Barrientos-Barria au DPHY/SLM (encadrée par Myriam Raybaut) et d'Alexandre Dobroc au DOTA/SLS (encadré par moi-même). La première avait en charge la réalisation de la source laser NesCOPO et la mise en place de l'expérience lidar, tandis que le second avait pour objectif de réaliser le traitement et l'analyse de qualité des données. En particulier, ce dernier a pu utiliser le même paradigme et les mêmes outils méthodologiques (estimateurs au maximum de vraisemblance) que lors de ses travaux sur la spectroscopie supercontinuum. C'était d'ailleurs bien là le but et la cohérence de sa thèse : développer une méthodologie d'analyse commune pour ces deux techniques d'absorption en bande large. Le dispositif et les mesures réalisés par les deux doctorants, illustrés en Figure 64, sont la première démonstration d'un lidar multi-espèce (H₂O et CH₄) dans le MWIR à partir d'une source NesCOPO. Ces mesures ont été réalisées en chemin intégré (IP-DIAL), la puissance étant encore faible à ce stade de développement du prototype lidar. Les mesures d'humidité relative et de concentration de méthane réalisées à partir de ces spectres de transmission se sont montrées en bonne cohérence avec les attendus, comme illustré dans la publication commune de ces résultats (Barrientos Barria, 2012).

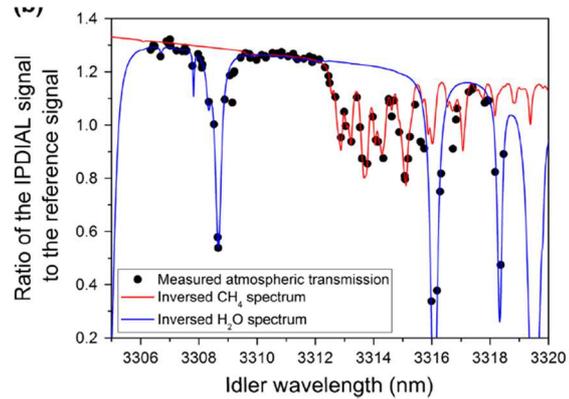
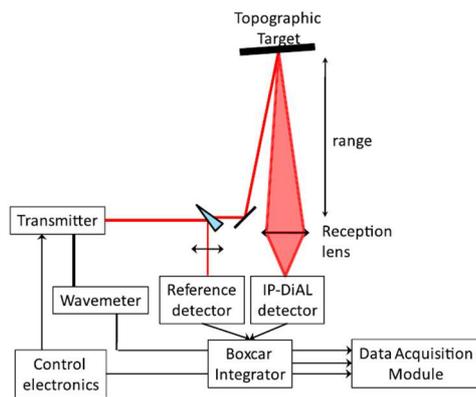


Figure 64 – Gauche : Schéma de principe du lidar SEPIA (IP-DIAL basse puissance) ; Droite : signaux de spectroscopie multi-fréquence enregistrés en bande MWIR. Les signatures spectrales du méthane et de la vapeur d'eau sont bien observées. (Source : Barrientos Barria, 2012)

J'ai également apporté à ces travaux une contribution plus personnelle en m'interrogeant sur les moyens d'optimiser la précision de mesure de ce lidar en un temps T donné, en réduisant la série de longueurs d'onde émises mais en moyennant plus longtemps la mesure de chaque point spectral. Par exemple, la série de 93 longueurs d'onde émises représentée en Figure 64 est manifestement largement surdimensionnée dans un contexte où seulement 2 espèces sont mesurées. J'ai donc proposé une méthode afin de rechercher, parmi les longueurs d'ondes « émissibles » par le NesCOPO (qui ne sont pas totalement libre de choix une fois la température du cristal fixée), quelle est la suite de longueur d'onde optimisant la mesure du méthane, de la vapeur d'eau, ou d'un mélange $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$, en un temps donné. Ce travail a été publié (section 4 de Barrientos Barria, 2012), et un exemple de résultat obtenu est illustré en Figure 65. On montre par exemple que l'usage de ces séquences de longueurs d'ondes optimales peuvent permettre de gagner un facteur 2 à 4 sur le temps de mesure (à erreur constante) par rapport à l'émission de la séquence complète de 93 longueurs d'ondes. On peut ainsi imaginer une démarche de scan fréquentiel en bande large pour identifier les gaz en présence (lorsqu'on ne les connaît pas), suivi d'une émission de séquence optimale, une fois l'identification effectuée, afin de maximiser la précision de mesure.

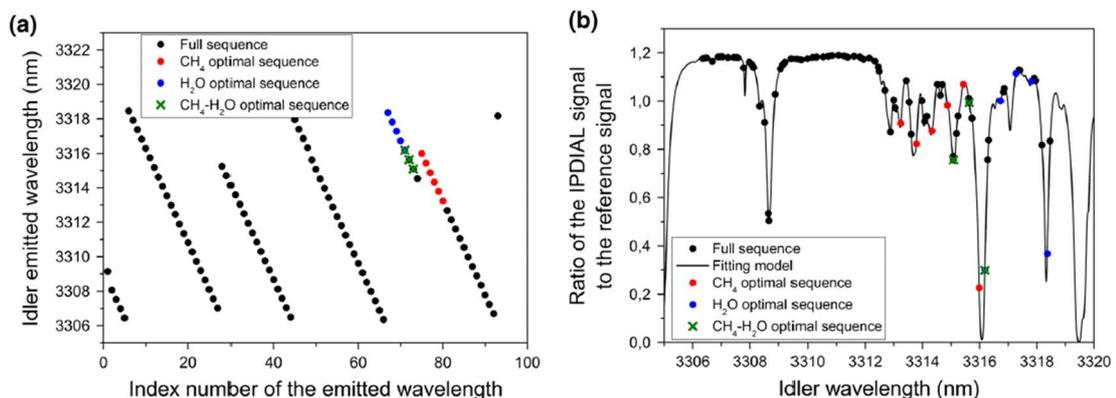


Figure 65 - Gauche : séquences de longueurs d'ondes émissibles par le NesCOPO (points noirs) et identification des sous-séquences optimales selon que l'on mesure du méthane pur, de la vapeur d'eau pure, ou bien un mélange des deux. Droite : transcription de ces séquences sur les spectres de transmission enregistrés expérimentalement. L'intérêt est de remarquer que les séquences optimisées ne sont pas forcément intuitives à déterminer « à l'œil ». (Source : Barrientos Barria, 2012)

Les travaux de l'unité DPHY/SLM sur la réalisation de systèmes lidars à sources NesCOPO se sont ensuite poursuivis. Le lidar SEPIA n'a finalement pas été amplifié ni testé en mode RR-DIAL comme initialement escompté, l'arrivée du projet NAOMI ayant rebattu les cartes des priorités. Le

projet NAOMI (j'y reviendrai plus bas) a en effet déclenché le développement, dans l'équipe DPHY/SLM, du lidar à NesCOPO nommé GAZ-L, pour la détection du CH₄ à 1.6µm (Dherbecourt et al. 2019). Un autre lidar a également été développé à 2µm pour la détection du CO₂ atmosphérique (Cadiou 2017). Je n'ai pas eu l'occasion de participer à ces développements, étant moi-même pleinement engagé dans d'autres projets (notamment le lidar VEGA détaillé plus loin). Mais ma collaboration avec l'équipe DPHY/SLM a pu se poursuivre à l'occasion du projet MICLID (2015-2018).

Durant le projet MICLID, une source NesCOPO originale a été développée en bande LWIR (7.5-10.7 µm) pour la détection de gaz militaires, et un démonstrateur lidar a été assemblé et testé (Melkonian, 2020). Mon rôle a été d'en évaluer les performances prévisionnelles, en quantification et en détection. Pour ce faire, j'ai enrichi le code LIDIASOL en intégrant les sections efficaces de ces gaz spéciaux, et étudié en détails les risques d'interférence spectrales entre ces gaz et les principaux gaz atmosphériques (H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, O₃) dans la bande d'accordabilité du lidar. Ceci nous a permis d'identifier, avec mes collègues du DPHY, un jeu de 17 longueurs d'onde réparties sur la bande 7.8-10.7 µm et adaptées à la surveillance générale des gaz toxiques dans cette bande (Figure 66 à gauche). Cette étape a également mis en évidence l'absorption non négligeable du continuum de vapeur d'eau en dessous de 8 µm.

Puis, j'ai réalisé l'évaluation des performances prévisionnelles du lidar, en mode IP-DIAL, pour la quantification de 4 gaz toxiques particuliers. J'ai également étendu la réflexion initiée pendant le projet SEPIA sur l'optimisation des performances par réduction des longueurs d'ondes émises. Dans le cas de l'émetteur MICLID, contrairement à celui de SEPIA, il n'y a pas obligation de contiguïté entre deux longueurs d'onde consécutivement émises, impliquant dès lors des possibilités d'optimisation plus libres. La méthode de réduction de séquence que j'ai développée utilise un algorithme pas à pas, éliminant à chaque pas la longueur d'onde dont la suppression à un coût minimal sur la plus mauvaise des Bornes de Cramer-Rao du système. Cette technique permet d'optimiser le fonctionnement de l'émetteur lidar en fonction des gaz qu'il mesure. Un exemple de cette démarche est représenté en Figure 66 (à droite).

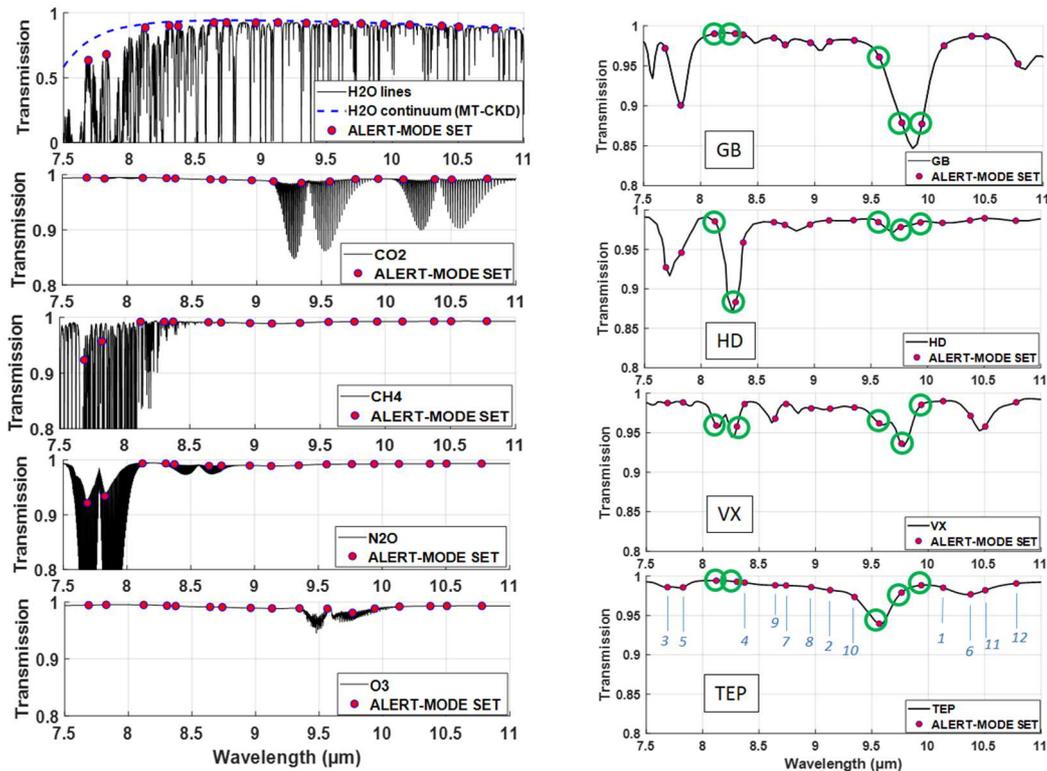


Figure 66 – Gauche : transmission des gaz atmosphériques en bande LWIR, pour un lidar IP-DIAL de 500 m de portée. Les points rouges représentent la séquence d’alerte du système MICALID, pour sa mission de surveillance de l’ensemble de la bande d’accordabilité. Chacune de ces longueurs d’ondes est à un maximum de transmission atmosphérique. On note aussi que l’absorption du continuum de vapeur d’eau est significative en-dessous de 8 μ m. Droite : transmission des 4 gaz toxiques plus particulièrement étudiés dans le projet : Sarin (notation OTAN : GB), gaz moutarde (HD), agent innervant base-V (VX), et triéthylphosphate (TEP). Les cercles verts indiquent le jeu de 5 longueurs d’ondes identifié par l’algorithme comme optimal dans le cadre d’une surveillance limitée à ces 4 gaz. L’ordre d’élimination des autres longueurs d’onde est indiqué par les libellés bleus de la figure en bas à droite. (Source : Cézard & Melkonian 2020)

J’ai également réalisé l’évaluation des performances du lidar MICALID en détection, via le calcul des courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) de l’instrument. Un point intéressant, sur ce sujet, a été de constater l’impact des hypothèses que l’on peut formuler dans ce type de problème. Par exemple, les statistiques du test de vraisemblance (Likelihood Ratio Test ou LRT, cf. chap.3.3.c) ne sont pas du tout les mêmes selon que l’on suppose un test de détection contrôlée (où l’on connaît la concentration du gaz testé) ou un test en aveugle. La Figure 67 montre que dans le premier cas, et dans l’hypothèse de signaux lidars de statistiques gaussienne, les probabilités conditionnelles du LRT obtenues selon les hypothèses H_0 (gaz absent) et H_1 (gaz présent) sont elles-mêmes gaussiennes. Dans le cas d’un *blind test*, le système doit d’abord estimer la concentration du gaz et prendre une décision de présence/absence sur cette base. Si l’on emploie pour ce faire un estimateur au maximum de vraisemblance, alors les probabilités conditionnelles du LRT suivent des lois de χ^2 respectivement centrée (H_0) et non-centrée (H_1). Il s’en suit des taux de fausse alarme et de bonne détection différents dans les deux cas (et au désavantage, fort logiquement, du test en aveugle), comme le montrent les courbes ROC calculées dans l’un et l’autre cas (Figure 68). L’ensemble des résultats de modélisation présentés ici sur le lidar MICALID ont fait l’objet d’une publication récente (Cézard & Melkonian 2020).

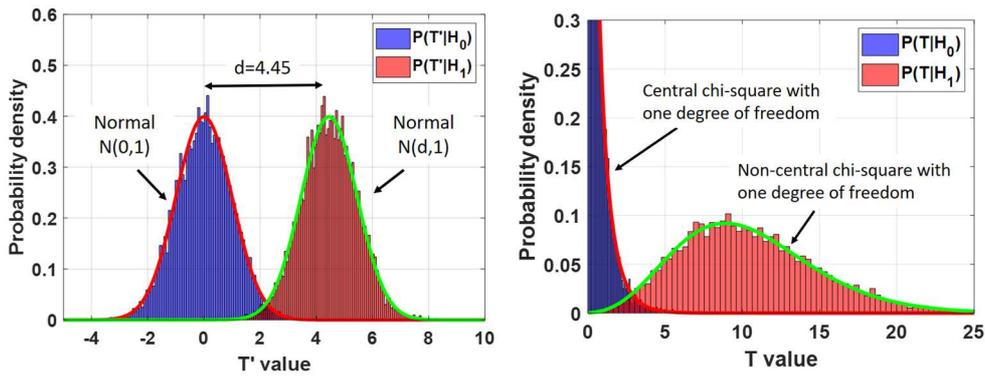


Figure 67 - Probabilités conditionnelles du test LRT selon les hypothèses H_0 et H_1 , pour la détection du gaz GB à un niveau donné de concentration. Gauche : cas de conditions de test contrôlées (la concentration du gaz cible est connue); droite : conditions de test en aveugle (la concentration du gaz est estimée par un estimateur au maximum de vraisemblance) (Source : Cézard & Melkonian 2020)

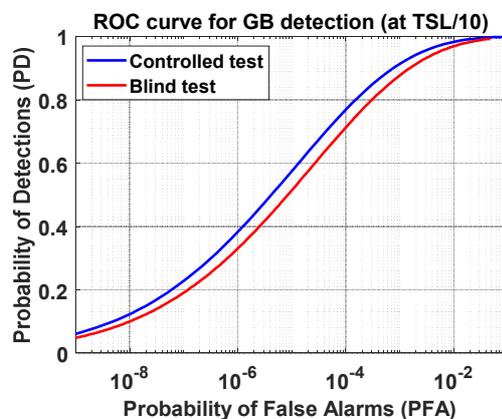


Figure 68 – Courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) pour la détection du gaz GB en conditions de test contrôlées ou aveugles. La différence entre les deux courbes ROC n'est ici pas très importante, car les mesures effectuées sont supposées de bon rapport signal à bruit. L'étape d'estimation n'ajoute donc pas ici une grande incertitude supplémentaire pour la prise de décision. (Source : Cézard & Melkonian 2020)

e. Mise en perspectives des recherches menées

Par rapport au large savoir-faire de l'équipe « Sources Laser et Métrologie » du DPHY, qui développe les sources NesCOPO et les instruments lidars associés, je dirais que les travaux que j'ai menés dans ce domaine ont permis d'ajouter une forte composante de modélisation système, qui fut bienvenue. J'ai en effet apporté une approche plus formelle des signaux lidars escomptés avec ce type de système lidar, et de l'information (au sens de Fisher) contenue à l'intérieur. Cette approche a permis notamment de bien distinguer les différents postes de bruit de ces systèmes lidars, qui sont des indicateurs précieux pour orienter les travaux de dimensionnement ou d'amélioration de prototypes expérimentaux. Les techniques que j'ai proposées, en matière d'optimisation de séquences d'émissions de fréquences, peuvent également avoir un impact direct sur la conception et/ou le réglage pratique de la source laser, signe que les travaux de modélisation ne sont pas décorrélés des travaux expérimentaux, bien au contraire. En travaillant sur les tests de décision et sur les courbes ROC escomptées pour des systèmes lidar de surveillance, j'ai également accru notre capacité collective à positionner la technologie des lidars NesCOPO vis-à-vis de spécifications opérationnelles de détection.

Ces différents résultats seront certainement très utiles pour la suite des travaux conduits par l'unité DPHY/SLM. Il appartiendrait à un représentant de cette équipe, plus qu'à moi-même, d'en détailler toutes les perspectives, mais l'on peut citer à titre d'exemples les projets ANR WAVIL et H2020 LEMON, au sein desquels sont actuellement développés des lidars DIAL NesCOPO dans le SWIR, pour la mesure principalement des gaz à effet de serre ($\text{H}_2\text{O}/\text{HDO}$, CO_2 , CH_4). Les travaux sur la détection de gaz toxiques dans le LWIR continuent également.

f. Références

- **Adam P.**, J.-L. Duvent and S. W. Gotoff, "Detection and reconnaissance of pollutant clouds by CO_2 lidar (MIRELA)," Proc. SPIE , Proceedings of SPIE 3127 , pp. 212-223 (1997)
- **Barrientos Barria J.**, A. Dobroc, H. Coudert-Alteirac, M. Raybaut, **N. Cézard**, J.-B. Dherbecourt, T. Schmid, B. Faure, G. Souhaité, J. Pelon, J.-M. Melkonian, A. Godard, and M. Lefebvre, "Simultaneous remote monitoring of atmospheric methane and water vapor using an integrated path DIAL instrument based on a widely tunable optical parametric source," Appl. Phys. B: Lasers Opt. 117(1), 509–518 (2014).
- **Cadiou E.**, D. Mammez, J.-B. Dherbecourt, G. Gorju, J. Pelon, J.-M. Melkonian, A. Godard, and M. Raybaut, "Atmospheric boundary layer CO_2 remote sensing with a direct detection LIDAR instrument based on a widely tunable optical parametric source," Opt. Lett. 42, 4044-4047 (2017)
- **Cézard N.** and J.-M. Melkonian, "Long-wave infrared multi-wavelength IPDA lidar for standoff detection of chemical warfare agents: theoretical study," Appl. Opt. 59, 11167-11179 (2020)
- **Dherbecourt J.-B.**, J. Melkonian, A. Godard, V. Lebat, N. Tanguy, C. Blanchard, X. Watremez, D. Dubucq, S. Doz, P. Foucher, and M. Raybaut, "The NAOMI GAZL multispecies differential absorption lidar: realization and testing on the TADI gas leak simulation facility," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper ATH3K.1.
- **Fréjafon E.**, "Lidar DIAL et autres techniques optiques de surveillance industrielle et environnementale", Communication lors de l'Ecole d'été Lidar et Géophysique (2010)
- **Hardy, B.**, Raybaut, M., Dherbecourt, J.B. *et al.* Vernier frequency sampling: a new tuning approach in spectroscopy—application to multi-wavelength integrated path DIAL. *Appl. Phys. B* 107, 643–647 (2012).
- **Innocenti, F.**, Robinson, R., Gardiner, T., and Finlayson, A. "Differential Absorption Lidar (DIAL) Measurements of Landfill Methane Emissions". *Remote Sens.*, 9(953) – (2017)
- **Quagliano R.**, P. O. Stoutland, R. R. Petrin, R. K. Sander, R. J. Romero, M. C. Whitehead, C. R. Quick, J. J. Tiee and L. J. Jolin, "Quantitative chemical identification of four gases in remote infrared (9-11 μm) differential absorption lidar experiments," Appl. Opt. 36 (9), pp. 1915-1927 (1997)
- **J.-M. Melkonian**, J. Armougom, M. Raybaut, J.-B. Dherbecourt, G. Gorju, **N. Cézard**, A. Godard, V. Pašiškevičius, R. Coetsee, and J. Kadlčák, "Long-wave infrared multi-wavelength optical source for standoff detection of chemical warfare agents," Appl. Opt. 59, 11156-11166 (2020)
- **Menyuk N.**, D. K. Killinger and W. E. DeFeo, "Laser remote sensing of hydrazine, MMH, and UDMH using a differential-absorption CO_2 lidar," Appl. Opt. 21 (12), pp. 2275-2286 (1982)
- **Webber M. E.**, M. Pushkarsky, C. Kumar, N. Patel, "Optical detection of chemical warfare agents and toxic industrial chemicals, Simulation", *Journal of Appl. Phys.* 97, pp. 113101 (2005)
- **Weibring P.**, C. Abrahamsson, M. Sjöholm, J. N. Smith, H. Edner, S. Svanberg "Multi-component chemical analysis of gas mixtures using a continuously tuneable lidar system", *Appl. Phys. B* 79, 525-530 (2004)

5. Le lidar DIAL-Doppler fibré VEGA

a. Contexte et enjeux

J'ai montré précédemment (chapitre 3.1.e) que la bande SWIR était bien adaptée à la détection de certains gaz d'intérêt majeurs, notamment les trois principaux gaz à effet de serre que sont CO_2 , CH_4 , et H_2O . Or dans la bande SWIR, la technologie des sources laser fibrées peut être envisagée, puisque la silice des fibres optiques est transparente jusqu'à environ $2.2 \mu\text{m}$. Au début des années 2010, nous avons commencé à nous interroger, au sein de mon unité de recherche, sur l'opportunité d'utiliser des sources fibrées mono-fréquences (à sources MOPA, cf. chap.3.2.c) pour détecter ces gaz clés à l'aide de lidar DIAL tout fibrés.

Les premiers travaux ont concerné d'abord le Pôle Laser de mon unité. Le projet ESA HEPILAS (2010-2013), sur lequel je reviendrai plus loin, a suscité le développement d'une source fibrée pour la détection du CO_2 à 1579 nm . Toutefois cette source, peu intégrée, n'a pu donner lieu à une exploitation lidar dans les années qui ont suivi. Mais il n'en alla pas de même pour la source fibrée développée à 2051 nm dans le cadre du PR DROSOFIL (projet Onera 2011-2014). Conçue à la base pour une application de pompage d'OPO à $2 \mu\text{m}$, nous en avons choisi la longueur d'onde de manière à ce qu'elle puisse aussi être testée pour la détection du CO_2 atmosphérique. Terminée dans sa première version en 2014 (Lucas et al. 2014), cette source a dû patienter un peu avant d'être reprise, améliorée, et intégrée dans un système lidar nommé HELENA à partir de 2019 (cf. section 4.6). En 2013, des travaux sont également lancés via la thèse de Philippe Benoit, afin de concevoir une source laser fibrée à $1.65 \mu\text{m}$ pour la télédétection du méthane. Ce sont finalement ces travaux qui, les premiers, nous ont permis de développer un lidar DIAL.

C'est en effet également en 2013 que la société Total a sollicité l'Onera afin de développer de nouveaux instruments pour la télédétection des hydrocarbures sous différentes formes (gaz ou liquide). De nombreux travaux de recherche ont alors été lancés à l'Onera, dans le cadre d'un partenariat Recherche-Industrie (PRI) nommé NAOMI (New Advanced Observation Methods Integration, 2014-2019).

L'une des problématiques soulevées par Total concernait la caractérisation, à distance de sécurité, de panaches de gaz naturel (méthane) issus de fuites massives sur des sites industriels accidentés. L'entreprise venait de connaître, en mars 2012, une fuite majeure de gaz (phénomène dit de *blowout*) sur la plate-forme d'Elgin en mer du Nord (Figure 69a). Pendant cette fuite qui dura 51 jours, le risque d'explosion avait conduit à l'évacuation totale des 238 employés de la plate-forme, et rendu encore plus difficiles les conditions d'intervention. Au total, près de 6000 tonnes de CH_4 s'étaient alors échappées dans l'atmosphère, et le manque à gagner, ajouté au coût de l'accident, s'était élevé à plusieurs centaines de millions de dollars. Lors de cet épisode, le manque d'instruments de télédétection capables d'analyser à distance les zones de risques explosifs et le débit de fuite, fut clairement identifié. Une partie des travaux du PRI-NAOMI visaient donc directement à remédier à cette situation, à travers le développement de nouvelles technologies d'observation du méthane en télédétection passive et active. Côté actif, j'ai alors proposé des travaux échelonnés sur 5 ans, visant à développer un lidar fibré innovant, à double-fonction DIAL-Doppler, capable de mesurer à distance la concentration du méthane et la vitesse de l'air, dans le but de remonter aux débits de fuite sur des installations accidentées. Ce projet a été retenu, et c'est ainsi qu'a débuté le développement du lidar VEGA (Vent & Gaz) en 2014.

Pendant le projet NAOMI, l'accident survenu sur le puits d'Aliso Canyon en Californie, en Octobre 2015, vint aussi nous rappeler, et avec force, les enjeux de nos travaux en matière de sécurité, d'environnement, et d'économie. Pendant les 118 jours que dura cette fuite de méthane, l'une des plus importantes de l'histoire des Etats-Unis (Figure 69b), plus de 11 000 personnes durent être évacuées, environ 100 000 tonnes de méthane furent rejetées dans l'atmosphère (doublement des émissions de l'ensemble de la Californie sur la même période), pour un coût total de plus d'un milliard de dollars pour le seul exploitant SoCalGas (Ouraga 2019).



Figure 69 – (a) Plate-forme d'Elgin en mer du Nord (Source : Total E&P) b) image en caméra infrarouge de la fuite au puits d'Aliso Canyon en octobre 2015 (Source : Environment Defense Fund, USA)

A côté de ce type d'évènements accidentels, qui heureusement restent rares, les émissions dites « fugitives », de basse intensité mais souvent étalées dans le temps faute d'être détectées, constituent un autre enjeu d'importance pour les exploitants pétroliers. Aux Etats-Unis, elles sont estimées à environ 2.3% de la production totale (Alvarez et al. 2018), tandis que la perte d'exploitation à l'échelle planétaire est estimée à environ 30 milliards de dollars chaque année (Larsen et al. 2015). La détection et quantification des fuites fugitives sur un site industriel devint d'ailleurs un sujet d'importance croissante au cours du PRI-NAOMI. De sorte qu'en 2019, Total souhaite que le lidar VEGA, conçu avec un objectif applicatif de caractérisation de fuites majeures, soit testé également sur des scénarios de fuites fugitives de faibles intensités.

b. Intérêt et défis posés par le lidar VEGA

Nous sommes en 2013, et bien que le principe du lidar DIAL soit ancien, il n'existe aucun producteur commercial de lidar DIAL infrarouge. Marché applicatif trop petit, ou sources lasers trop complexes (sans doute un mélange des deux), le fait est que la quasi-totalité des lidars Dial existants sont issus de travaux de laboratoire, et reposent sur des sources lasers à état solide (à cristaux), complexes à mettre en œuvre. Dans ce paysage, l'intérêt de développer des lidars fibrés bi-fonction DIAL-Doppler est double.

Premièrement, les lidars fibrés font généralement preuve sur le terrain d'une grande robustesse. Le succès des lidars Doppler fibrés, commercialisés par exemple par la société française Leosphere, a d'ores et déjà démontre la pertinence et la capacité de cette technologie à répondre à des besoins industriels exigeants (dans le secteur de l'éolien notamment), en terme d'autonomie, de simplicité de mise en œuvre et d'alignement, et de fiabilité. Pour de nouvelles applications lidar comme la télédétection de gaz, la technologie fibrée est donc porteuse des mêmes promesses. Qui plus est, ajouter une fonction DIAL aux architectures fibrées des lidars Doppler ne doit en principe pas bouleverser fondamentalement le fonctionnement de ces lidars déjà éprouvés par le marché.

Le second avantage d'un lidar DIAL-Doppler réside dans sa double capacité de mesure de la vitesse du vent et de la concentration de gaz. Comme le montre le schéma de la Figure 70, la mesure simultanée de la concentration du gaz à travers une section de panache, et de la vitesse normale à cette section, fournit les mesures primaires nécessaires au calcul du débit d'une fuite de gaz. Néanmoins, comme un lidar Doppler ne mesure que la vitesse projetée du vent sur l'axe de visée (vitesse dite « radiale »), il paraît antinomique de mesurer à la fois une section de panache de gaz, et la vitesse du vent normale à cette dernière (vitesse dite « transverse »). C'est pourtant possible, mais à la condition d'utiliser un lidar scannant sur deux axes, par exemple en élévation pour couper le panache selon une section, et en azimut pour reconstruire le vent transverse (à partir des variations angulaires de la vitesse radiale, selon la méthode appelée VAD pour *Velocity Azimut Display*).

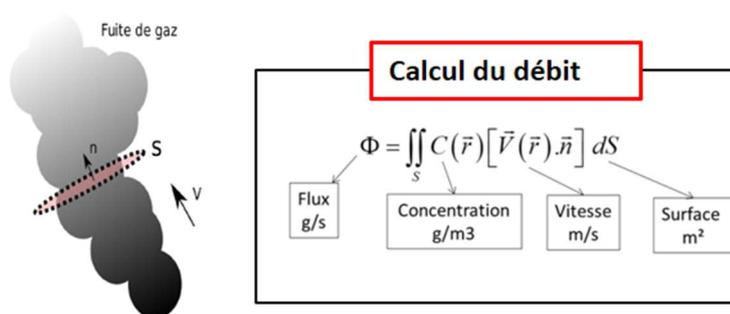


Figure 70 – Principe de mesure du débit d'une fuite de gaz. Il est nécessaire de mesurer la concentration de gaz à travers une section du panache, ainsi que la vitesse du vent normal à cette section (Source : S. Le Méhauté, Onera)

Concevoir et réaliser le lidar VEGA présentait toutefois plusieurs défis, avec en premier lieu, celui de la source laser. La difficulté était qu'il n'existe pas d'ions dopants qui permettent aux fibres silice de fournir un gain significatif à cette longueur d'onde (cf. chap. 3.2.c et la Figure 30). Il était donc nécessaire de concevoir et réaliser un amplificateur Raman, technologie bien moins répandue. De plus la source devait être compatible avec les nombreuses exigences du lidar Dial-Doppler envisagé : finesse spectrale, qualité de faisceau, puissance suffisante, impulsions courtes...

Le second défi consistait bien sûr à réaliser un lidar Dial-Doppler fonctionnel, ce qui représentait une première dans notre équipe, et à vrai dire, une première mondiale en technologie fibrée (à notre connaissance). Au-delà du challenge technique, des questions scientifiques étaient également soulevées, concernant par exemple l'impact du bruit de speckle sur les mesures de gaz, ou encore le traitement des signaux lidar adaptés à la restitution des produits de mesures DIAL et Doppler.

c. Etat de l'art au démarrage des travaux

En France, l'institut de référence pour la mesure de panaches de gaz industriels est l'Ineris. Dans les années 2000, cet organisme disposait d'un lidar DIAL (combinant diverses sources laser à colorant et à base d'OPO) installé dans un camion, ce qui lui permettait d'effectuer des mesures de différents polluants industriels, dont le méthane (Frejafon, 2010). Mais l'instrument était complexe, coûteux et encombrant, et en 2014, il n'était presque plus employé à l'Ineris. Pour la mesure du méthane par lidar, une équipe de l'Institut Lumière-Matière (ILM, Lyon) a proposé en 2012 une autre technique baptisée Optical Correlation Spectroscopy ou OCS (Thomas et al. 2012). Mais la technique n'avait pas encore démontré son applicabilité expérimentale au méthane à cette époque. A l'Onera, au sein même du projet NAOMI, l'équipe SLM du département DPHY venait de lancer en 2013 le

développement du lidar GAZ-L, basé sur un NesCOPO à $1.65\mu\text{m}$ (Dherbecourt et al, 2019). Cet instrument visait à la mesure du CH_4 et du CO_2 , mais pas à la mesure de vent.

Au Royaume-Uni, le National Physical Laboratory (NPL) utilisait un équipement similaire à celui de l'Ineris, resté depuis très actif (Innocenti 2017). Mais cet équipement relativement encombrant (camion dédié) ne mesure pas non plus la vitesse du vent. Pour cela, il est nécessaire de recourir à un mat anémométrique pour recueillir la donnée de vitesse, ou bien de déployer un lidar Doppler complémentaire. Ces deux solutions augmentent encore la complexité de l'instrumentation déployée. En Allemagne, le DLR avait développé l'instrument CHARM, un lidar IP-DIAL à $1.64\mu\text{m}$ basé sur une source OPO/OPA, pour le suivi en hélicoptère des fuites de méthane le long de pipelines, en partenariat avec Ruhrgas AG (Fix et al. 2004). Aux Etats-Unis, le Godard Space Flight Center (GSFC) de la NASA avait également réalisé un lidar IP-DIAL à base de laser OPO à $1.64\mu\text{m}$ pour des mesures aéroportées du méthane (Riris et al. 2012). Mais tous ces instruments avaient en commun d'utiliser une méthode de détection directe, ne permettant donc pas la fonction d'anémométrie.

d. Principaux travaux accomplis

Dans la première phase du projet (2013-2016) les travaux de recherche autour du lidar VEGA ont concerné d'une part l'étude et la réalisation d'une source laser fibrée, d'autre part le pré-dimensionnement d'un lidar fibré DIAL-Doppler.

L'étude et réalisation de la source fibrée a été réalisée au cours de la thèse de Philippe Benoit, encadré par Guillaume Canat à l'Onera, et dirigé par Arnaud Mussot (Université de Lille). En tant que responsable du projet VEGA, j'ai suivi de près le développement de cette source, et eu pour apport essentiel d'en calculer les spécifications, fixant ainsi les objectifs techniques de la thèse. Mais n'ayant pas pris part au développement de la source à proprement parler, je me limiterai ci-dessous à résumer les résultats finaux obtenus, sans entrer dans le détail de la démarche de conception (que l'on pourra lire dans Benoit 2017).

J'ai par contre effectué personnellement le pré-dimensionnement du lidar VEGA, et établi ses performances prévisionnelles. Pour ce faire, je me suis à nouveau appuyé sur le code de modélisation LIDIASOL, que j'ai fait évoluer pour y intégrer de nouveaux éléments, propres à la détection cohérente. Une étude spectrale des différentes raies d'absorption en bande $1.63\text{-}1.67\mu\text{m}$ m'a tout d'abord permis de choisir la longueur d'onde de travail exacte du lidar VEGA à 1645.54 nm (Cézar et al. 2016). J'ai également repris, et adapté à mon problème, la démarche de Rye et Hardesty 1993, permettant le calcul des Bornes de Cramer-Rao d'un lidar cohérent pour l'estimation du barycentre et de l'intégrale d'un pic de signal dans l'espace des radiofréquences. Cela m'a permis d'évaluer les performances attendues du lidar VEGA pour la mesure simultanée de la vitesse du vent et de la concentration de méthane, dans diverses configurations d'observation, et en fonctions des paramètres instrumentaux. J'ai pu alors en déduire des spécifications sur les paramètres les plus importants de la source laser (longueur d'onde exacte, puissance, cadence, durée d'impulsion, finesse et stabilité spectrale...) et du système lidar.

Par exemple, les impulsions laser obtenues en sortie d'amplificateur Raman étaient initialement affectées d'un bruit d'intensité résiduel, lié à celui des diodes de pompe. L'amplificateur Raman présentant un couplage entre le gain et la phase de l'onde amplifiée, cette modulation créait un élargissement spectral significatif du signal laser, impliquant une dégradation des bornes de Cramer-Rao pour la mesure du vent et de la concentration de méthane. La Figure 71 montre ainsi,

pour différentes configurations d'impulsions, le lien entre la portée du lidar et la puissance laser requise (pour un objectif de 10% de précision relative sur un panache de concentration donnée, observé pendant une durée et avec une résolution spatiale données). On voit que ce type de figure illustre très clairement l'impact d'une imperfection du système laser sur les performances du lidar. A partir de là, il est possible de raffiner les spécifications et d'orienter les efforts à porter (ou non) à tel ou tel paramètre laser.

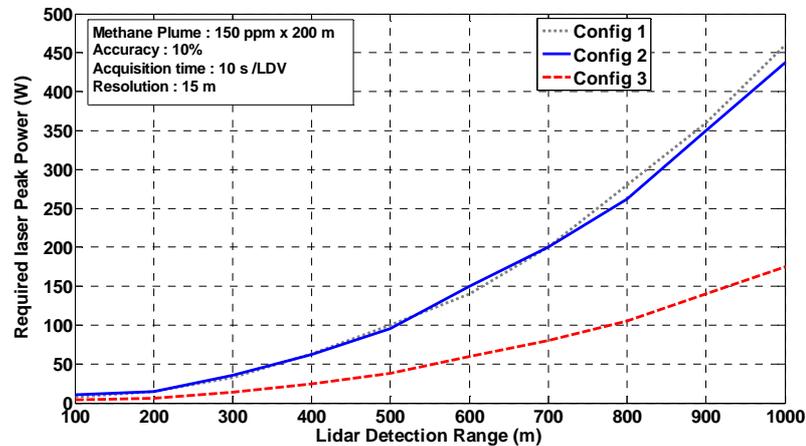


Figure 71 – Evaluation de la puissance laser requise (peak power) en fonction de la portée recherchée du lidar, pour différents paramètres d'impulsions (durée, bruit d'intensité résiduelle).

Mes travaux de pré-dimensionnement ont permis de nous convaincre, et de convaincre Total, du réel potentiel de la source laser réalisée pendant la thèse de Philippe Benoit, et de l'intérêt de poursuivre le projet en développant concrètement un démonstrateur lidar capable d'aller sur le terrain. J'ai alors proposé une seconde thèse, entièrement tournée vers l'étude détaillée et la réalisation de ce démonstrateur lidar. C'est ainsi que j'ai pu accueillir dans notre équipe et encadrer les travaux de doctorat de Simon Le Méhauté (2016-2020), dirigé par Hervé Delbarre au Laboratoire de Physico-Chimie Atmosphérique (LPCA Dunkerque).

Le lidar VEGA a donc peu à peu pris corps à partir de 2016, en prenant néanmoins le temps d'étudier en détails chacun de ses composants dans le cadre de la thèse. Les injecteurs ON et OFF sont caractérisés, et un interrupteur optique est installé pour sélectionner alternativement l'un ou l'autre. Pour choisir simplement le couple de fréquence ON et OFF du lidar, une procédure de calibration spectrale automatique est mise en place. La tête optique de visée monostatique est également dimensionnée et installée afin de pouvoir focaliser le faisceau à distance réglable. Plusieurs détecteurs sont aussi testés. En parallèle de ce travail expérimental, un simulateur détaillé des performances du lidar, ainsi que des méthodes de traitement du signal cohérent, sont développés. Dans [Le Méhauté et al. 2018](#), la méthode d'estimation, permettant de mesurer la concentration du gaz et la vitesse du vent, est explicitée, et une première démonstration expérimentale est apportée pour la mesure de méthane en mode IP-DIAL multi-spectral (i.e. en faisant varier la position de la fréquence ON du lidar, et en laissant fixe la fréquence OFF).

En parallèle de ces travaux, la source laser fibrée est peu à peu rendue plus compacte, organisée dans des racks, et intégrée au sein d'une baie mobile. Un scanner motorisé (issu de développements précédents sur les lidars Dopplers) est ajouté afin de pouvoir orienter la ligne de visée en azimut et élévation. Les problématiques de gestion des flux de données et de pilotage informatique de l'ensemble du lidar, à travers une interface homme machine (IHM), sont peu à peu résolues. Une technique semi-automatique de contrôle et d'optimisation de la forme temporelle des impulsions laser (et de détection d'effet Brillouin) est également mise au point. Tous ces ajouts

indispensables sont le fruit du travail de plusieurs collègues, que je n'ai fait qu'orchestrer. La réalisation du lidar VEGA est ainsi véritablement devenue une œuvre collective. Outre le doctorant et moi-même, plusieurs personnes s'y sont considérablement investies, et qu'il convient de nommer, notamment Philippe Benoit (revenu après sa thèse pour un CDD), Didier Goular, Christophe Planchat, et Didier Fleury.

A l'été 2018, l'architecture du lidar VEGA est finalisée. Représentée sur la Figure 72, elle prend la forme d'un lidar Doppler cohérent classique, avec néanmoins trois différences essentielles :

- Le lidar intègre deux injecteurs laser physiquement distincts (l'un à la fréquence ON, l'autre à la fréquence OFF), sélectionnés alternativement par un interrupteur optique ;
- Un dispositif de calibration spectrale, utilisant une petite cellule fibrée contenant du méthane, permet de fixer précisément les fréquences ON et OFF émises ;
- L'amplificateur Raman (pompé à 1.55 μm), véritable innovation au cœur du système, permet de délivrer des impulsions linéairement polarisées de 10 μJ , 200 ns à 20 kHz, à 1645.5 nm, avec une excellente qualité spectrale (6 MHz de largeur de raie) et spatiale ($M^2=1$). Il est de plus contrôlé et peut être optimisé par une IHM dédiée.

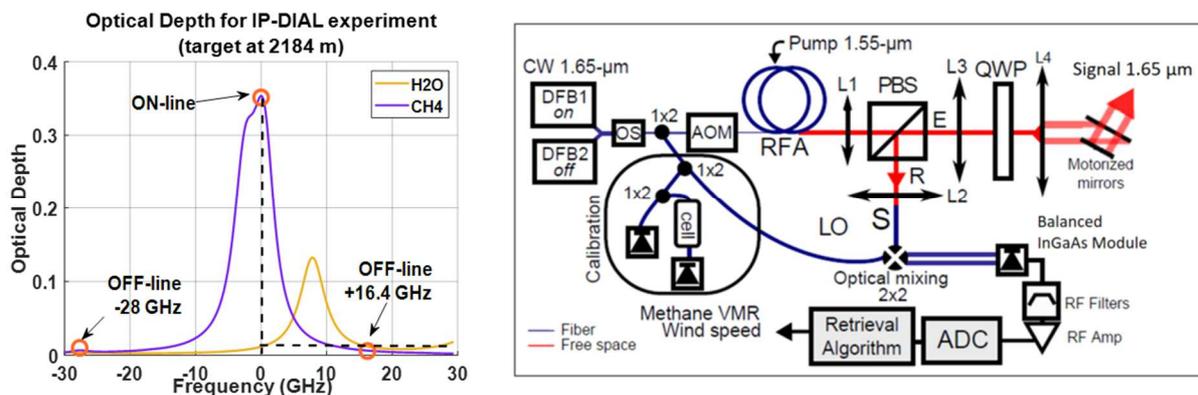


Figure 72 –Gauche : Raie d'absorption du méthane à 1645.54 nm utilisée par le lidar VEGA. Les fréquences ON-line et OFF-line peuvent être facilement ajustées par les courants d'alimentation des injecteurs laser correspondants. Différentes fréquences OFF ont été utilisées au cours de nos essais. Droite : Schéma du lidar VEGA (acronymes : DFB Distributed Feedback Diode, CW : Continuous Wave, OS : Optical Switch, AOM : Acousto-Optic Modulator, RFA : Raman Fiber Amplifier, PBS : Polarizing Beam-Splitter, L1-4 : Lenses, QWP : Quarter-Wave Plate, E/R : Emitter/Receiver channels, LO/S : Local Oscillator/Signal, RF: Radio Frequency, ADC : Analog to Digital Converter). (Source : Cézard et al. 2020-2)

A l'automne 2018 se déroule la campagne d'essai de fin de projet NAOMI, organisée par Total sur son site d'essai de Lacq (Pyrénées-Atlantiques). Total y dispose d'une installation originale, nommée TADI (Total Anomaly Detection Infrastructure), permettant de générer des fuites de gaz de débit contrôlé (entre 0.3 g/s et 300g/s) à partir de plusieurs types d'équipement industriels : réservoirs, cheminées, brides de canalisations... Pendant la campagne, le lidar VEGA est positionné à 200 m des points de fuite. Son but est de détecter et quantifier les rejets effectués sur les différents points de fuite. Les photos de la Figure 73 donneront au lecteur une idée du déroulement de la campagne et des installations visées par le lidar.

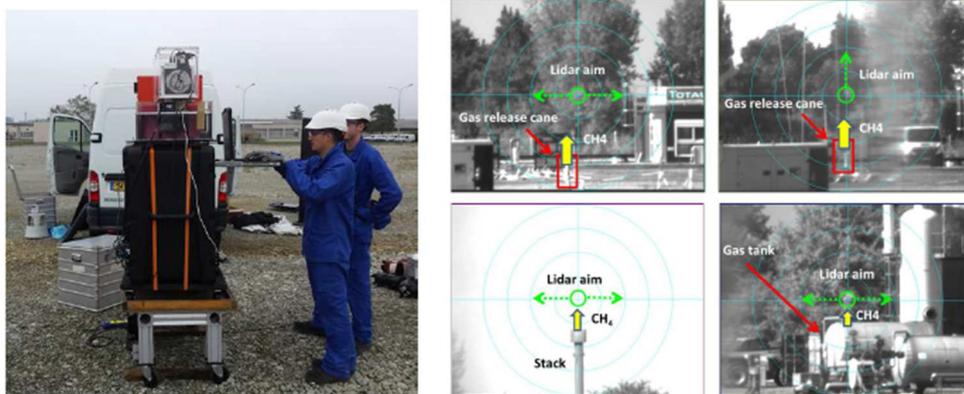


Figure 73 – Gauche : Lidar VEGA installé au sol à 200 m des points de fuite, sur la plate-forme industrielle TADI de Total à Lacq (Pyrénées Atlantiques). Droite : photos prise par la caméra de visée du lidar VEGA, illustrant différents types d'équipement de test et les conditions expérimentales de la campagne 2018. (Source : Cézard et al 2019-1)

Le traitement des données enregistrées s'effectue en léger différé (de quelques minutes après l'enregistrement) et donne une idée superficielle du succès ou non de la détection du panache. Néanmoins, l'analyse approfondie des signaux enregistrés lors de cette campagne (35 tests différents) nous a pris plusieurs mois, pendant lesquels je me suis considérablement investi. Il s'avéra que la campagne de mesure était un véritable succès pour le lidar VEGA. Nous sommes en effet parvenus à démontrer un grand nombre de fonctionnalités de mesure intéressantes, illustrées en partie par la Figure 74 :

- Profils de vitesse de vent (mesures validés par des anémomètres soniques)
- Profils de concentration relatives d'aérosols (amplitude du signal rétrodiffusé)
- Profils de concentration de méthane : la mesure est bien quantifiée. Il faut néanmoins être vigilant pour interpréter les valeurs mesurées, et prendre en compte l'effet diluant de la résolution de 30m du lidar lorsque les panaches sont plus petits.
- Détection et localisation de panache (dans le temps et dans l'espace)
- Imagerie dynamique 2D / 3D de panache (scanner angulaire)
- Modulation du contraste d'absorption pour les hauts débits (scanner spectral)
- Mesure IP-DIAL d'opportunité (quand une cible dure est présente derrière le panache)

Ces résultats ont fait l'objet de plusieurs communications en congrès (Cézard et al. 2019-1, 2019-2, 2020-1), et d'une publication en journal (Cézard et al. 2020-2). Une publication en journal analysant davantage de résultats acquis lors des campagnes de 2018 et de 2019 (cf. infra) est prévue d'ici 2022.

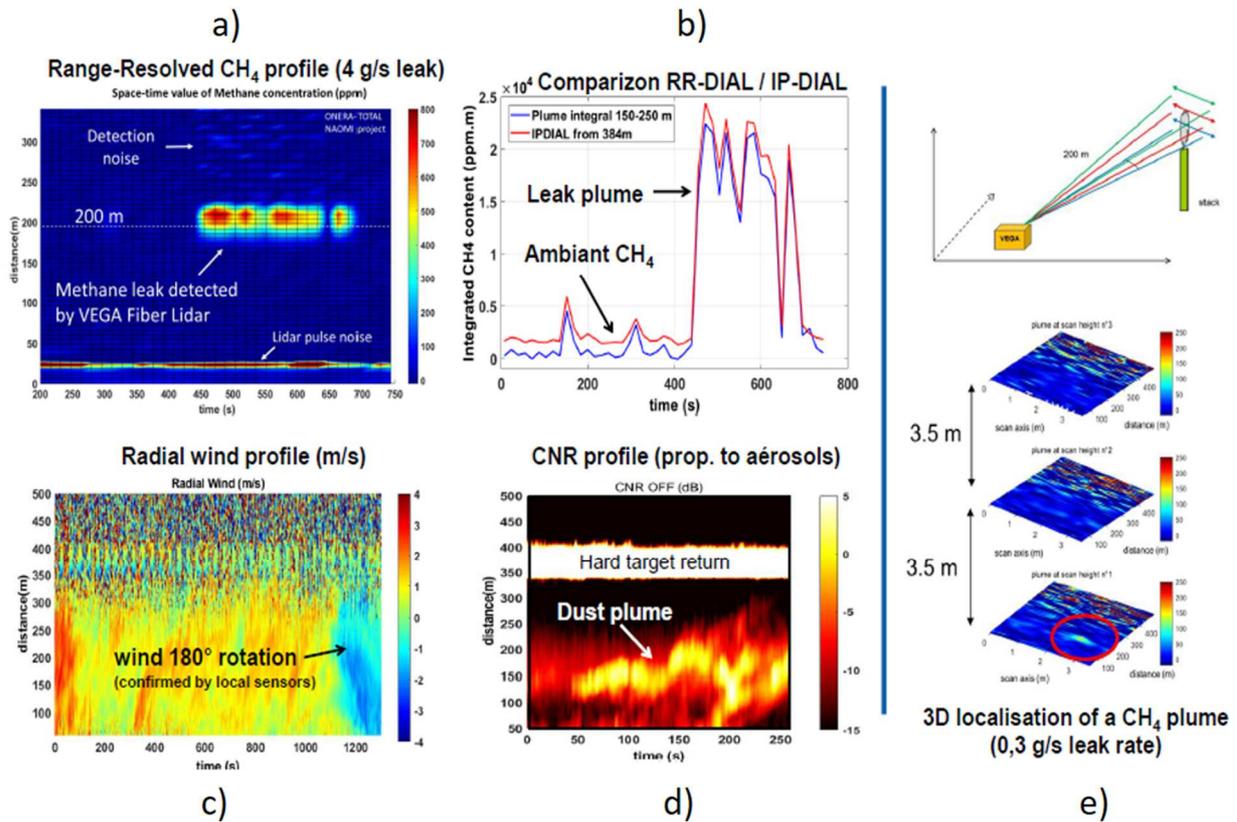


Figure 74 – Résultats de la 1^{ère} campagne de Lacq, en 2018 (Source : Cézard et al 2019-1)

a) Carte de concentration de méthane enregistrés par le lidar VEGA en mode RR-DIAL, en fonction du temps et de l'espace, lors d'une fuite contrôlée de méthane à 4g/s depuis un point source à 200 m de distance. La ligne de visée du lidar est fixe et le faisceau est focalisé à 200 m. La résolution temporelle est de 10 secondes et la résolution spatiale de 30 m (avec sur-échantillonnage pour le rendu graphique). Le panache est très clairement détecté.

b) Mesures comparatives du contenu en méthane du panache (en ppm.m) par deux méthodes, l'une intégrant les mesures RR-DIAL sur la longueur du panache, l'autre étant la mesure IP-DIAL réalisée simultanément en utilisant le retour d'une cible dure à l'arrière du panache (à 384 m). Les deux mesures concordent très bien, démontrant leur cohérence quantitative. Le décalage entre les deux courbes provient de l'absorption supplémentaire par le CH₄ ambiant en dehors du panache, qui est prise en compte dans la mesure IP-DIAL.

c) Carte de vent radial (projeté sur la ligne de visée) enregistrée par le lidar VEGA, à nouveau en fonction du temps et de l'espace. Entre le début et la fin de l'enregistrement, on perçoit nettement un basculement de sens du vent, confirmé par les anémomètres soniques disposés non loin du point de mesure. La cible dure étant disposée à 384 m, la mesure au-delà correspond à du bruit.

d) Carte du Carrier to Noise Ratio (CNR) du signal lidar, proportionnel au coefficient de rétrodiffusion des aérosols, en fonction du temps et de l'espace, lors d'un autre test (le faisceau est focalisé à 150 m environ). On aperçoit nettement le passage d'un nuage de poussière dans la ligne de visée, correspondant à une hausse subite du CNR, qui se superpose à une présence d'aérosols de fond. La mesure ne permet pas de caractériser quantitativement les aérosols à proprement parler, mais délivre néanmoins une information qualitative, apportant un complément d'information sur la scène atmosphérique observée. Elle permet aussi de faire le lien avec la précision de mesure des autres produits de mesure du lidar, puisque la précision des mesure vent et gaz s'améliore quand le CNR augmente. Par contre, une trop grande variabilité du CNR peut aussi apporter du bruit supplémentaire si la fréquence d'alternance ON/OFF du lidar est trop lente par rapport aux variations du coefficient β des aérosols.

e) Illustration de la capacité de visualisation 3D du lidar VEGA. Pour ce test, une fuite de 0.3 g/s (le plus petit débit possible) a été générée à partir d'une cheminée de 6 m, et nous avons réalisé un scan sur 3 plans successifs au-dessus de la cheminée, avec 11 lignes de visée azimutales pour chaque plan. Nous obtenons ainsi 3 cartes spatiales (coordonnées angulaire en abscisse et spatiale en y) à différentes hauteurs d'élévation. Le panache n'est détecté que sur le plan inférieur, juste au-dessus de la cheminée (ce jour-là, il s'est rapidement dispersé horizontalement). Ce test illustre également la très bonne sensibilité du lidar VEGA, puisque le débit d'émission était ici très faible.

En 2018, notre objectif a été de démontrer la double capacité de mesure CH₄/vent, sans chercher à calculer le débit de fuite. En effet, pour concentrer nos efforts sur la détection de méthane (qui était déjà une première) nous n'avons pas cherché à mesurer la vitesse du vent transverse pendant cette campagne. Cela aurait nécessité la mise en œuvre d'une stratégie de scan appropriée, qui aurait pu nous détourner de l'objectif n°1 de détection des panaches. Mais nous avons eu l'occasion de le faire lors d'une seconde campagne, menée fin 2019.

En effet, suite aux résultats très prometteurs obtenus lors de la campagne 2018, Total a proposé que le lidar VEGA participe à une seconde campagne afin de tester les performances du lidar pour la détection d'émissions fugitives (bas débits, longues durées, et points sources pas forcément connus). Entre les deux campagnes, nous avons donc apporté quelques améliorations au lidar, notamment afin de mieux entrelacer temporellement les mesures des gaz (selon une section de panache) et de vent (en visant cette fois la reconstitution de la composante transverse du vent).

Nous avons donc déployé une nouvelle fois le lidar sur le site TADI de Lacq en octobre 2019. Autre amélioration significative sur le plan opérationnel, par rapport à 2018 : cette fois nous avons utilisé le lidar directement depuis une camionnette sans le débarquer au sol. Par conséquent, nous avons pu effectuer des mesures de panache depuis plusieurs endroits différents, dans un temps très raisonnable de quelques dizaines de minutes, et démontrer le caractère robuste et mobile du lidar. Les contraintes matérielles de la campagne ayant imposé que le lidar soit plus proche des points sources qu'en 2018, le lidar en 2019 a été focalisé au plus près, à environ 100m de distance. Cette seconde campagne de 2019 a permis de démontrer deux nouvelles fonctionnalités très intéressantes du lidar VEGA :

- Sa capacité à estimer un débit de fuite de manière autonome. L'étude que j'ai menée en 2020 sur un cas-test particulier de la campagne semble en effet confirmer la capacité du lidar à mesurer la concentration sur une section de panache ainsi que le vent normal à cette section. Un débit de 6.5 g/s a ainsi été mesuré (pour une vérité terrain de 9.5 g/s), ce qui constitue un ordre de grandeur très correct. Cette analyse nécessite néanmoins des travaux complémentaires, prévus pour 2021, impliquant davantage de cas d'analyse.
- La capacité du lidar à surveiller une assez large scène, et à détecter de multiples et faibles points d'émissions fugitives en mode *blind test*. La Figure 75 (à droite) montre par exemple la carte de concentration de méthane obtenue lors d'un scan azimutal de 10° environ. Alors même qu'il pleuvait (légère bruine), on voit que deux fuites sont visibles, permettant d'identifier correctement deux équipements endommagés. Les débits de fuites annoncés après coup (non mesurés par le lidar pour ce test) étaient très faibles (1g/s pour l'une, 0.5 g/s pour l'autre), ce qui confirme la très bonne sensibilité du lidar. Ces résultats ont fait l'objet d'une communication (Cézard et al. 2020-3) mais ils seront repris et complétés dans une publication future.

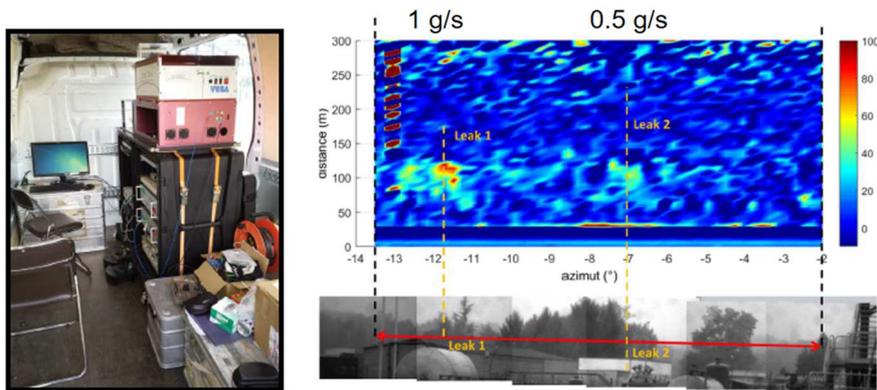


Figure 75 - (Gauche) Photo du lidar VEGA utilisé depuis une camionnette, et visant par la porte latérale. (Droite) Rapport de mélange de CH₄ (couleur en ppm) mesuré par le lidar en fonction de l'angle de scan (abscisse) et de la distance (ordonnée). Un scan est composé de 52 lignes de visées, avec 1 sec/ligne de visée (soit environ 1min/scan). La figure présentée est la moyenne de 10 scans, donc 10 minutes de mesures. La photo sous la carte montre l'extension spatiale du scan azimuthal dans la scène observée (flèche rouge), composés de multiples équipements potentiellement générateurs de fuites. Les lignes verticales oranges pointillées montrent les équipements endommagés identifiés par le lidar (et ce sont les bons). (Source : [Cézard et al. 2020-3](#))

A l'issue du projet NAOMI, prolongé par la campagne 2019, il ne faisait aucun doute que le lidar VEGA disposait d'un potentiel très intéressant à la fois pour le scénario de mesure de fuites massives de méthane (cas de *blowout*) pour lequel nous l'avions d'abord conçu, mais aussi pour le scénario de suivi des émissions fugitives de sites industriels. Les objectifs que nous nous étions fixés en 2014 avec Total étaient donc atteints, et même dépassés en termes de sensibilité de mesure.

En revanche les mesures de panache effectuées pendant les campagnes de mesures avec Total ne nous avaient pas permis de bien évaluer les performances du lidar dans des conditions stationnaires (les essais de fuites contrôlées de gaz se succédant à assez haute cadence). Il était donc difficile de projeter les performances du lidar VEGA sur d'autres scénarios environnementaux, impliquant la mesure de faibles déviations par rapport à la concentration ambiante de méthane. J'ai donc entrepris à Palaiseau des mesures complémentaires du méthane ambiant, en mode IP-DIAL et RR-DIAL, en faisant durer les acquisitions suffisamment longtemps pour pouvoir évaluer la déviation d'Allan du lidar sur des temps significatifs. Les résultats obtenus sont illustrés à la Figure 76 et permettent de mieux évaluer les performances atteignables avec le lidar VEGA. Par exemple, la précision atteinte en 16 minutes d'accumulation est de 10-20 ppb en mode IP-DIAL pour une cible dure à 2.2 km, et 0.3-2 ppm en mode RR-DIAL à 150m. De telles performances paraissent en adéquation avec les besoins d'applications environnementales, exigeant une précision de mesure proche du niveau de concentration ambiante, mais pouvant s'accommoder de durées de mesures de plusieurs minutes ou dizaines de minutes. J'ai également mené une analyse théorique démontrant que ces niveaux de performances étaient conformes avec les attendus théoriques compte-tenu des niveaux de signal enregistrés. Ces résultats ont été récemment publiés ([Cézard et al. 2020-2](#)).

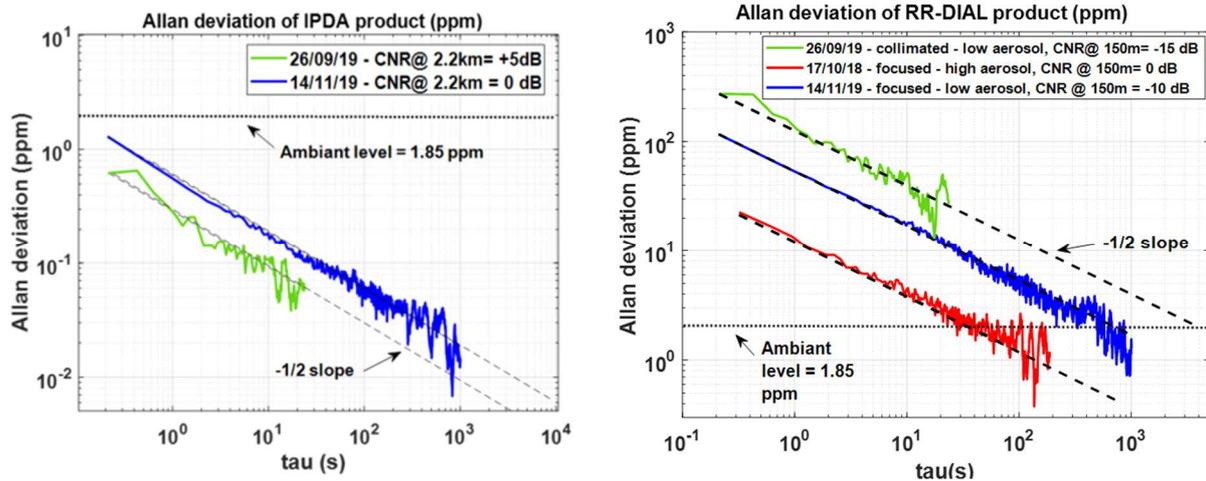


Figure 76 – Courbes de déviation d’Allan du lidar VEGA pour la mesure du rapport de mélange de méthane, en mode IP-DIAL (à gauche, avec une cible dure située à 2.2 km) ou RR-DIAL (à droite, avec différentes conditions de focalisation et de concentration en aérosols). (Source : Cézard et al. 2020-2)

e. Mise en perspectives des recherches menées

Les travaux que j’ai menés sur le lidar VEGA depuis 2013, avec mon équipe, ont ouvert un nouveau pan d’activité de recherche au Département d’Optique. En réalisant pour la première fois un lidar DIAL-Doppler en technologie fibrée, le savoir-faire de l’équipe a été étendu tout en conservant sa cohérence. C’est une vraie force car toutes les réflexions et innovations qui nourrissent la thématique des lidars Doppler cohérents peuvent également s’appliquer au lidar VEGA, et vice versa. Les perspectives de progression sont nombreuses, et le lidar VEGA va continuer d’évoluer et de monter en performances dans les années à venir.

D’abord, il est important de compléter et valoriser à leur juste niveau les résultats expérimentaux acquis lors des campagnes de 2018 et 2019. Plusieurs résultats importants, déjà acquis, n’ont pas encore été publiés, notamment la capacité de l’instrument à effectuer des mesures de panaches en 3D, à permettre une estimation multi-spectrale, ou encore à mesurer des débits par combinaison des données vent et gaz. Synthétiser et communiquer ces résultats sera donc une priorité de mes futurs travaux. Deuxièmement, il s’agit de continuer à faire progresser techniquement le démonstrateur. La source laser, aujourd’hui limitée à 10-15 μ J par impulsion, doit monter en puissance pour augmenter la portée du lidar. Sa stabilité spectrale peut aussi être améliorée pour accroître la précision des mesures sur les temps longs. Le lidar peut également gagner encore en niveau d’intégration et en vitesse logicielle pour afficher des résultats de mesure en temps réel. Enfin le lidar VEGA doit continuer à participer à des campagnes de mesures, à la fois pour démontrer son intérêt sur de nouvelles applications, mais aussi pour identifier les pistes vers lesquelles l’améliorer encore.

Tous ces travaux sont bien identifiés, et j’ai mis en place différents projets de recherche pour les effectuer. J’y reviendrai dans le 5^{ème} et dernier chapitre de ce mémoire, dédié à mes perspectives de recherches, mais la plupart de ces travaux sont d’ores et déjà programmés au sein du PRF Telemac (2019-2022), projet interne Onera que je co-anime. En 2020, malgré une année très perturbée par les conditions sanitaires liées à la pandémie de Covid-19, plusieurs axes de progrès pour le lidar VEGA ont pu être étudiés à travers des stages (Manzoni, 2020 ; Graf, 2020) et d’autres ont été identifiés pour les années à venir. Un projet de valorisation est également prévu pour 2021, ainsi qu’une campagne de mesure sur site industriel en partenariat avec le Laboratoire des Sciences

de l'Environnement et du Climat. Enfin, des contacts ont également été pris avec des industriels afin d'évaluer les possibilités d'un transfert industriel de cette nouvelle technologie lidar. Le lidar VEGA est ainsi amené à demeurer un sujet de recherche très actif dans les prochaines années.

Par ailleurs, les travaux de recherche sur les lidars fibrés DIAL-Doppler en tant que tels vont également progresser et se diversifier. Depuis 2018, j'ai lancé par exemple la thèse de Julien Lahyani sur le développement du lidar HELENA, dédié à la mesure simultanée du CO₂ et du vent à 2.05 µm. Son développement étant également en lien avec les applications spatiales, j'ai choisi de présenter ces travaux dans la section suivante. Le lancement de travaux de développement d'un lidar H₂O/vent est également envisagé, bien que dans ce domaine, le positionnement de travaux devra être revu après la très récente publication d'une équipe japonaise sur un lidar fibré H₂O/vent à 1.53 µm ([Imaki et al. 2020](#)).

Enfin, le caractère bi-fonction DIAL et Doppler des lidars VEGA (et HELENA) ouvre des perspectives quant à l'exploitation scientifique conjointe des données de vent et de gaz, pour évaluer de nouveaux produits de mesure plus complexes. Cela peut être des débits de fuite de points sources, comme on vient de l'évoquer plus haut. A ce sujet, la mesure par lidar des débits de fuites industrielles est en train d'être normée à l'échelle européenne (sur la base des moyens et méthodes d'observation du NPL), et le lidar VEGA peut donc être amené à jouer un rôle intéressant auprès des organismes responsables des contrôles industriels (comme l'Ineris en France). Mais on peut également songer à mesurer des flux de gaz à travers des surfaces plus larges qui seraient observées sur de plus longues durées, à l'échelle urbaine ou régionale par exemple, via l'utilisation de moyens aéroportés. Ce sujet constitue également une perspective prometteuse pour de futures recherches (cf.chap.5).

f. Références

- **Alvarez, R. A.**, Zavala-Araiza, D., Lyon, D. R., Allen, D. T., Barkley, Z. R., Brandt, A. R., Davis, K. J., Herndon, S. C., Jacob, D. J., Karion, A., et al. (2018). Assessment of methane emissions from the US oil and gas supply chain. *Science*, 361(6398) :186–188.
- **Benoit P.** « *Conception et réalisation d'un amplificateur Raman fibré mono-fréquence à 1645 nm pour la mesure de méthane par LIDAR* », Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1, soutenue le 12 mai 2017
- **Cézard N.**, P. Benoit, G. Canat « 1.6 micron fiber laser source for CH₄ gas leak detection », EPJ Web of Conferences 11911, 05010 (2016)
- **Cézard N.**, S. Le Méhauté, P. Benoit, D. Fleury, D. Goular, J. Le Gouet, C. Planchat, A. Dolfi-Bouteyre, X. Watremez, « All-fiber DIAL/Doppler lidar at 1.65 micron for remote detection of methane leaks », presented during the 29th International Laser Remote sensing Conference (ILRC-29), Hefei, China, (no proceedings) - (2019-1)
- **Cézard N.**, S. Le Méhauté, J. Le Gouet, A. Dolfi-Bouteyre, and C. Besson, "Coherent Fiber Lidar at 1645 nm for simultaneous measurements of methane, wind speed, and aerosols," in *Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C)*, OSA Technical Digest, paper LM4B.5 (2019-2)
- **Cézard N.**, J. Dherbecourt, M. Raybaut, and A. Dolfi-Bouteyre, "Development of gas sensing Lidars for industrial and climate issues," in *Optical Sensors and Sensing Congress*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2020), paper LM4A.3 (2020-1)
- **Cézard N.**, S. Le Méhauté, J. Le Gouët, M. Valla, D. Goular, D. Fleury, C. Planchat and A. Dolfi-Bouteyre, "Performance assessment of a coherent DIAL-Doppler fiber lidar at 1645 nm for remote sensing of methane and wind," *Opt. Expr.* 28, no. 15, pp. 22345-22357 (2020-2)
- **Cézard N.**, A. Dolfi-Bouteyre, "Overview of Recent Lidar Developments at ONERA's Optics Department for Wind and Gas Remote Sensing", in *Proceedings of the European Lidar Conference (ELC)* (2020-3)
- **Dherbecourt J-B.**, J. Melkonian, A. Godard, V. Lebat, N. Tanguy, C. Blanchard, X. Watremez, D. Dubucq, S. Doz, P. Foucher, and M. Raybaut, "The NAOMI GAZL multispecies differential absorption lidar: realization and testing on

the TADI gas leak simulation facility," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper ATH3K.1.

- **Fix, A.**; Ehret, G.; Hoffstädt, A; Klingenberg, H., H.; Lemmerz, C; Mahnke, P.;Ulbricht, M.; Wirth, M.; Wittig, R.; Zirnig, W.: CHARM - A Helicopter-borne Lidar System for Pipeline Monitoring, *Proceedings of the 22nd International Laser Radar Conference (ESA SP-561)*, 2004
- **Fréjafon E.**, "Lidar DIAL et autres techniques optiques de surveillance industrielle et environnementale", Communication lors de l'Ecole d'été Lidar et Géophysique (2010)
- **Graf, C.**, « Amplification hybride fibre/cristal pour la télédétection du méthane atmosphérique », mémoire de stage de Master 2 de l'Université de Strasbourg (2020)
- **Imaki M.**, H. Tanaka, K. Hirotsawa, T. Yanagisawa, and S. Kameyama, "Demonstration of the 1.53- μm coherent DIAL for simultaneous profiling of water vapor density and wind speed," *Opt. Express* **28**, 27078-27096 (2020)
- **Innocenti, F.**, Robinson, R., Gardiner, T., and Finlayson, A. "Differential Absorption Lidar (DIAL) Measurements of Landfill Methane Emissions". *Remote Sens.*, 9(953) – (2017)
- **Larsen, K.**, Delgado, M., and Marsters, P. "Untapped Potential : Reducing Global Methane Emissions from Oil and Natural Gas Systems", Rhodium group Technical Note (2015)
- **Le Méhauté S.**, « Etude et réalisation d'un Lidar DIAL cohérent fibré pour la mesure simultanée de la vitesse du vent et de la concentration de méthane », Thèse de doctorat de l'Université du Littoral Côte d'Opale, soutenue le 19 Juin 2020.
- **Le Méhauté S.**, P. Benoit, [N. Cézard](#), D. Goular, C. Planchat, M. Valla, A. Dolfi-Bouteyre, X. Watremez, and H. Delbarre "All-fibered coherent-differential absorption lidar at 1.645 μm for simultaneous methane and wind-speed measurements", *Proc. SPIE 10791, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XIV*, 1079103 (2018)
- **Lucas E.**, L. Lombard, Y. Jaouën, S. Bordais, and G. Canat, "1 kW peak power, 110 ns single-frequency thulium doped fiber amplifier at 2050 nm," *Appl. Opt.* **53**, 4413-4419 (2014)
- **Manzoni M.** " Optimisation d'un lidar fibré pour la mesure du méthane atmosphérique », mémoire de stage de Master Photonique de Strasbourg (2020)
- **Ouraga Z.**, « Retour d'expérience sur les risques liés au stockage en réservoir déplété : cas de l'accident d'Aliso Canyon (Etats-Unis) », Ineris, Note 180582 - 1785835 - v1.0 (2019)
- **Riris H.**, K. Numata, S. Li, S. Wu, A. Ramanathan, M. Dawsey, J. Mao, R.Kawa, J.Abshire, "Airborne measurements of atmospheric methane column abundance using a pulsed Integrated-path differential absorption Lidar", *Appl. Opt.* **51**, pp 8296-8305 (2012)
- **Rye B.**, M.Hardesty, « Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar. I: Spectral accumulation and the Cramer-Rao Lower Bound », *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, Vol.31,n°1, p.16 (1993)
- **Thomas B.**, A. Miffre, G.David, J-P.Cariou, P.Rairoux, "Remote sensing of atmospheric gases with optical correlation spectroscopy and lidar: theoretical and numerical approach", *Appl.Phys.B* **108** pp.689-702 (2012)

6. Etudes et développements pour la détection de gaz par lidar spatial

a. Contexte et enjeux

Dans une perspective de réchauffement climatique global, il est essentiel de mieux comprendre et caractériser, à l'échelle planétaire, les cycles des principaux gaz à effet de serre (GES), notamment le dioxyde de carbone et le méthane. Actuellement les GES sont principalement observés par des méthodes spectrales passives (spectro-imagerie ou spectrométrie mono-pixel). Les instruments dans cette catégorie sont nombreux, et s'appellent SCHIAMACHY, Sentinel-7 (Carbonsat), MicroCarb, Sentinel-5, GHGSat, GOSAT-2, OCO-2... Les mesures passives permettent d'obtenir des données de CO₂ (et/ou de CH₄) avec une résolution spatiale de l'ordre de 0.5 à 30 km. Cependant, certaines d'entre elles ne couvrent pas les hautes-latitudes (mesures dans l'UV-VIS-SWIR), et peuvent être entachées d'erreurs significatives, résultant de la propagation d'erreurs commises sur différents paramètres lors du processus d'inversion (profils d'aérosols, topologie du sol, albédo, nuages...). Dans l'infrarouge thermique (IASI par exemple), des mesures de jour comme de nuit sont possibles, mais plutôt dans la troposphère libre, ce qui est moins adapté à l'assimilation

de données pour remonter à des mesures de flux (lesquels s’opèrent principalement dans les basses couches de l’atmosphère).

Une instrumentation active, de type Lidar embarqué sur satellite, aurait comme principaux avantages, par rapport à une instrumentation passive, i) de permettre une meilleure observation de la Terre aux hautes latitudes surtout en hiver (mesure lidar indépendante de l’éclairement solaire); ii) d’être moins sensible aux éventuelles couches d’aérosols traversées, qui représentent un interférent majeur pour les mesures passives, et iii) d’être moins sensible aux biais induits par les surfaces terrestres complexes ou accidentées. Les mesures de concentration de gaz par méthodes lidar seraient ponctuelles mais en principe plus justes (Ehret et al. 2017, Chen et al. 2012). Elles pourraient donc contribuer avantageusement à l’identification des sources de GES, anthropiques ou naturelles.

Etant donnée la très grande distance à parcourir entre le satellite et l’atmosphère, il n’est actuellement pas envisagé de mesure résolue (RR-DIAL) des gaz atmosphériques depuis un lidar spatial. La mesure des GES par lidar spatial repose donc sur le concept IP-DIAL (illustré en Figure 77, et souvent notée IPDA - Integrated-Path Differential Absorption – dans le domaine spatial), et s’appuie sur le signal rétrodiffusé par la surface terrestre (ou océanique) à deux longueurs d’ondes ON et OFF très proches. La mesure de la distance entre le satellite et la surface diffusante est également nécessaire, afin de pouvoir ramener la valeur intégrée du rapport de mélange du gaz, mesurée en ppm.m par la technique IPDA, à une valeur moyenne en ppm. Pour un satellite, la mesure de distance revient à une fonction d’altimétrie, appelée SSE (Surface Scattering Elevation). On parle donc de lidar IPDA/SSE.

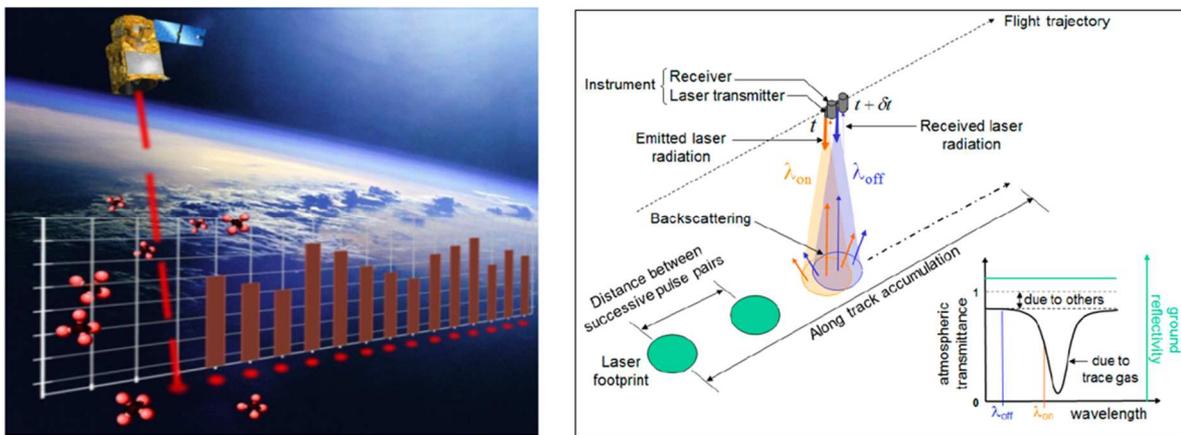


Figure 77 – Gauche : vue d’artiste d’un lidar spatial pour le suivi des gaz à effets de serre à l’échelle planétaire ; Droite : schéma de principe du lidar MERLIN (IPDA/SSE) pour la mesure du méthane à 1645 nm. (Source : Ehret et al. 2013)

Des études de dimensionnement de systèmes lidars spatiaux ont permis depuis longtemps d’identifier les longueurs d’ondes les plus adaptées pour la mesure du CO₂, du CH₄, et d’autres GES comme N₂O (Menzies et al. 2003, Ehret et al. 2008) :

- Pour le CH₄, il s’agit de la bande 1.64-1.66µm, avec un intérêt tout particulier pour le doublet d’absorption à 1645.5 nm, qui offre l’opportunité de relâcher significativement l’exigence de stabilité spectrale du laser ;
- Pour le CO₂, deux bandes spectrales sont intéressantes :
 - La bande 2µm, et en particulier la raie R30 à 2051 nm, scientifiquement reconnue comme étant l’une des plus prometteuses. Elle permet en particulier d’offrir une bonne

sensibilité de mesure du CO₂ dans les basses couches atmosphériques, où se déroulent les échanges de gaz entre les réservoirs atmosphériques et continentaux/océaniques. Le bruit des détecteurs à 2 μm, en revanche, est un problème majeur.

- La bande 1.57-1.58 μm qui offre plusieurs raies d'absorption d'intensités adéquates, et qui a surtout le grand mérite d'être dans la bande telecom, pour laquelle il existe de très nombreux composants, notamment fibrés, et de meilleurs détecteurs qu'à 2 μm. Son inconvénient principal est toutefois d'offrir une sensibilité un peu moindre qu'à 2 μm dans les basses couches atmosphériques.

Néanmoins, malgré ces études préparatoires et de très nombreux travaux de développement technologiques (laser, détecteurs...) engagés depuis deux décennies, les exigences techniques pour réaliser un lidar spatial d'observation des GES sont telles qu'il n'en existe encore aucun en orbite à ce jour. La mission franco-allemande MERLIN, qui sera lancée dans quelques années, va permettre de remédier à cela, et de placer en orbite le premier lidar dédié à l'observation du méthane atmosphérique (Ehret et al. 2017). Mais son temps de développement très long (plus de 15 ans), et les grandes difficultés techniques rencontrées pour le réaliser, justifient pleinement de poursuivre les recherches afin de pouvoir proposer, dans le futur, des concepts plus simples ou plus performants. Par ailleurs, pour le CO₂, il n'existe pas encore de mission lidar sélectionnée pour une mise en orbite dans les années à venir, signe que les technologies actuelles ne sont pas encore suffisamment matures, et que les recherches doivent se poursuivre pour les faire progresser.

b. Intérêt et défis posés

Dans ce contexte, les recherches que j'ai menées, ou auxquelles j'ai contribué, ont eu pour but de contribuer à l'effort mondial visant à améliorer et simplifier les technologies lidars DIAL, dans les bandes de longueurs d'ondes sélectionnées par les agences spatiales (1.57-1.58 μm et 2μm pour le CO₂, 1.64-1.66 μm pour le CH₄). J'ai abordé cette thématique par le prisme des technologies fibrées uniquement, pour deux raisons : tout d'abord afin de valoriser les connaissances et savoir-faire de mon unité de recherche dans ce domaine, et deuxièmement parce que je suis convaincu que cette technologie peut apporter de véritables innovations, voir une rupture technologique, dans le domaine des lidars DIAL spatiaux.

Les lidars spatiaux pour la mesure des GES doivent vérifier un vaste ensemble de spécifications très exigeantes, pour passer sous la barre des erreurs aléatoires et systématiques de mesure visées. Les objectifs sur l'erreur aléatoire fixent le rapport signal à bruit exigé, et induisent des spécifications sur l'énergie impulsionnelle, la cadence de tir, le diamètre du télescope, le bruit du détecteur, les filtres solaires... Les objectifs sur l'erreur systématique fixent également de très importantes contraintes sur la stabilité en fréquence du laser, sa largeur, sa pureté spectrale, sur la connaissance a priori des profils atmosphériques de température, de pression, de vapeur d'eau, sur l'intervalle de temps inter-pulse séparant les impulsions ON et OFF... Toutes ces contraintes rendent extrêmement difficiles la conception de systèmes laser adéquats, devant de plus être capables de supporter les contraintes d'envoi et d'utilisation dans l'espace (tenue aux vibrations, aux radiations, tenue des optiques au flux laser dans le vide, gestion thermique...).

Faces à ces exigences, les technologies fibrées présentent de très nombreux atouts : simplicité et fiabilité des alignements optiques, souplesse dans le réglage des propriétés temporelles et spectrales des impulsions, grande cadence de répétition, bonne qualité de faisceaux, grande finesse spectrale, accordabilité suffisante pour le sondage d'une raie unique d'absorption, possibilité de

réaliser un système de stabilisation de fréquence tout fibré... S'il n'y avait l'écueil de la diffusion Brillouin Stimulée, qui limite l'énergie impulsionnelle extractible d'une fibre optique à des valeurs typiques de quelques dizaines de μJ (contre plusieurs mJ pour les lasers à cristaux), les lidars spatiaux en cours d'étude ou réalisation seraient probablement basés sur des technologies fibrées.

L'un des principaux défis à relever en technologie fibrée est donc de repousser le seuil Brillouin (comme nous l'avons déjà souligné au chapitre 3.2). Le Pôle Laser de mon unité de recherche est précisément spécialisé sur cette question, et de nombreuses pistes d'améliorations ont déjà été explorées et mises en œuvre. A $1.5\ \mu\text{m}$, notre équipe a par exemple récemment mis en œuvre un lidar Doppler intégrant une source laser d'énergie impulsionnelle dépassant $400\ \mu\text{J}$ à $14\ \text{kHz}$ ($5.7\ \text{W}$ moyen ; par comparaison, le lidar MERLIN délivre $0.4\ \text{W}$ moyen), sans dégrader les performances spectrales et spatiales des faisceaux délivrés (Augere et al. 2019). L'un des axes des recherches, pour la thématique des lidars de mesure de GES, est donc d'appliquer ces nouvelles techniques de montée en puissance à des sources lasers fonctionnant aux longueurs d'ondes propres aux applications spatiales. Sur ce sujet, mon principal apport a été de faire le lien entre les performances laser et les besoins spatiaux, afin d'orienter, aussi pertinemment que possible, les développements de nouvelles sources fibrées pour ces applications.

L'une des opportunités permises par la technologie fibrée est aussi qu'elle ouvre de nouveaux degrés de libertés pour la conception de systèmes lidars innovants, en particulier en jouant sur les formats de modulations temporelles et spectrales des impulsions. Un deuxième axe de recherche s'est ainsi dégagé, dans lequel je me suis pleinement investi, consistant à mettre en œuvre ou à imaginer de nouvelles techniques de modulation, dans le but de simplifier le fonctionnement de systèmes lidar IPDA/SSE, voir d'étendre leur potentiel de mesure.

c. Etat de l'art au démarrage des travaux

En tant que principal gaz à effet de serre, c'est le CO_2 qui a fait l'objet des travaux pionniers en matière de télédétection par lidar spatial. Des travaux précurseurs ont lieu au CalTech (USA) au début des années 2000 (Menzies & Tratt, 2003). En Europe, une publication détaille dès 2008 les performances de lidars spatiaux IPDA pour la mesure de CO_2 , CH_4 et N_2O (Ehret et al. 2008). En 2007, le projet A-SCOPE (Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth) est sélectionné par l'ESA pour une étude en phase zéro. Cette étude détaillée a permis d'aller plus loin dans la modélisation, d'évaluer les sources de biais, et d'identifier les points durs (Caron 2009) d'un lidar spatial adapté à la mesure du CO_2 . La mission n'est finalement pas sélectionnée pour passer en phase supérieure, en raison du manque de maturité de plusieurs briques technologiques, mais les travaux continuent dans les laboratoires. En France, l'équipe du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) est pionnière sur la télédétection du CO_2 par lidar et sur ses applications spatiales. Un lidar cohérent (CO_2 +vent) nommé COWI, basé sur une source laser cristalline, est notamment développé dans les années 2000 (Gibert et al. 2006), puis progressivement perfectionné jusqu'à aujourd'hui (Gibert et al. 2018). Aux Etats-Unis, la mission ASCENDS (Active Sensing of CO_2 Emissions over Nights, Days, and Seasons) irrigue pendant près d'une décennie de nombreux développements technologiques et essais de lidars aéroportés dédiés au CO_2 . Dans la bande $2\ \mu\text{m}$, la NASA accomplit des progrès considérables sur les émetteurs laser à source cristalline (Koch et al. 2008) et sur les détecteurs (Beck et al. 2014). Des développements à base de technologie fibrée sont aussi réalisés à $1.57\ \mu\text{m}$ (Abshire et al. 2013, Dobler et al. 2013). Au Japon, des travaux sont également entrepris à $1.57\ \mu\text{m}$ (Kameyama et al. 2009) et à $2\ \mu\text{m}$ (Ishii et al. 2010).

Le méthane a également motivé de nombreux travaux notamment en Europe, dans le cadre de la mission MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission). MERLIN est un projet franco-allemand (CNES et DLR) visant à la réalisation du premier lidar IPDA/SSE en orbite. Il sera dédié au méthane, qui se révèle un gaz moins difficile à mesurer depuis l'espace que le CO₂. La mission est très bien décrite dans de nombreuses publications (par exemple [Ehret et al. 2017](#)). Elle embarque notamment une source laser cristalline à 1064 nm, suivie par un OPO réalisant la conversion de fréquence vers la double raie d'absorption du méthane à 1645 nm. Le développement de MERLIN s'accompagne au DLR de recherches sur un lidar aéroporté nommé CHARM-F, mesurant CO₂ et CH₄, et s'appuyant sur une technologie similaire ([Amediak et al. 2017](#)). Un lidar du même type est aussi développé par deux équipes différentes aux Etats-Unis ([Riris et al. 2012](#) ; [Refaat et al. 2013](#)).

d. Principaux travaux accomplis

Mes travaux dans ce domaine ont commencé en marge du projet ESA HEPILAS (2010-2013), pendant lequel mes collègues du Pôle Laser devaient réaliser une source laser fibrée à 1579 nm vérifiant un cahier des charges très précis...et très difficile. La source demandée ne se voulait pas directement adaptée à satisfaire les besoins d'observation depuis l'espace, mais fixait déjà des objectifs très élevés. En parallèle du projet, j'ai été missionné pour effectuer une analyse fine du cahier des charges, comprendre l'origine physique des spécifications, et formuler, autant que possible, des propositions pour rendre la source fibrée plus facile à réaliser tout en respectant le besoin observationnel de l'ESA.

J'ai réalisé pour cela, en 2011-2012, une étude de modélisation détaillée des performances d'un lidar spatial à détection directe et à 1579 nm, pour la détection du CO₂ et la télémétrie (IPDA/SSE). Je me suis d'abord basé sur le modèle LIDIASOL, que j'ai fait évoluer pour prendre en compte plusieurs spécificités d'un lidar spatial, notamment :

- La structuration verticale de l'atmosphère et la nécessité pour un lidar spatial d'en parcourir l'épaisseur entière, avec une variation continue du profil de pression, de température, de vapeur d'eau.... Cela implique des calculs plus lourds nécessitant des optimisations du code de calcul de la transmission atmosphérique.
- La prise en compte du double besoin IPDA/SSE, qui m'a incité à dresser également le bilan d'erreur aléatoire pour la fonction d'altimétrie par temps de vol, que n'intègre pas LIDIASOL.
- La nécessité de calculer les bilans d'erreur systématique du lidar, car les objectifs d'erreur systématique pour la mesure du CO₂ depuis l'espace sont à l'origine d'un grand nombre de spécifications assignées à la source laser. Les comprendre et les calculer étaient donc une nécessité pour formuler des propositions pertinentes de spécifications alternatives.

Le code réalisé, devenu très différent de LIDIASOL, a été baptisé LIDIASAT (Lidar Dial pour application Satellitaires). La Figure 78 illustre par exemple un des résultats de modélisation obtenus. Elle montre comment la position des fréquences ON et OFF permet, pour un lidar spatial à 1579 nm, de minimiser la contribution, à l'erreur systématique de la mesure IPDA du CO₂, apportée par une méconnaissance du profil atmosphérique de vapeur d'eau. Ce dernier intervient en effet dans deux termes correctifs différents, qu'il faut apporter à la mesure IPDA ([Caron, 2009](#)), de sorte qu'une méconnaissance à son sujet peut engendrer des erreurs systématiques. A 1579 nm cependant, la

Figure 78 indique qu'il existe des positions de fréquence ON et OFF telles que les deux termes correctifs se compensent (Cézard et al. 2016), annulant ainsi l'erreur systématique induite. Cette éventualité avait été suggérée par des chercheurs de l'ESA (Caron, 2009), et cela explique probablement la raison pour laquelle la source HEPILAS avait été spécifiée par l'ESA à cette longueur d'onde atypique de 1579 nm (alors que la plupart des études de lidar IPDA-CO₂ autour de 1.5 μm se positionnent vers 1570-1572 nm). Ce choix ne fut pas sans conséquence pour la source HEPILAS puisque l'efficacité d'amplification des ions Erbium diminue rapidement entre 1570 et 1580 nm. L'analyse que j'ai effectuée grâce au code LIDIASAT permettait donc de questionner la pertinence des spécifications en fonction de leurs impacts (facilitants ou handicapants) sur la source fibrée.

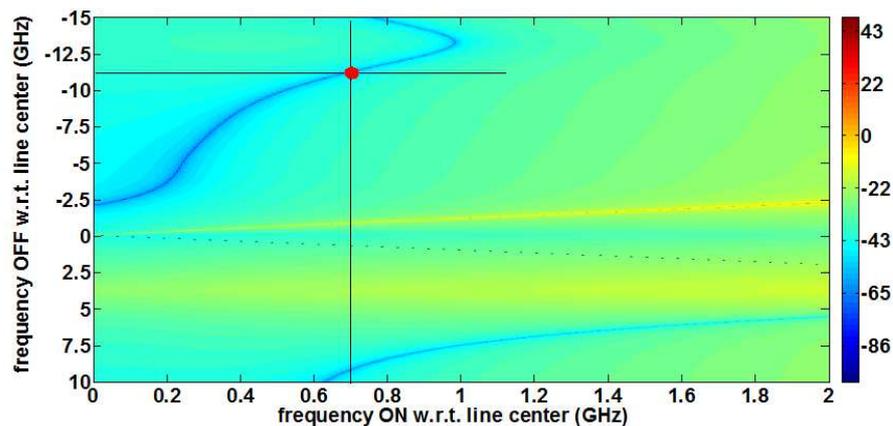


Figure 78 – Erreur systématique relative en dB induite par une méconnaissance de 5% sur un profil de vapeur d'eau de type tropical (20 g/kg au sol). Les lignes bleues indiquent les lieux d'annulation de la sensibilité de la mesure CO₂ à cette méconnaissance. (Source : Cézard et al. 2016)

Au-delà de questionner les spécifications, le but était aussi de formuler des propositions alternatives. J'ai déposé à ce sujet dès 2012 une enveloppe Soleau, avec mon collègue Guillaume Canat (responsable du projet HEPILAS), pour proposer des formats de modulations des impulsions laser permettant de simplifier la réalisation de la source fibrée sans dégrader la précision des mesures IPDA/SSE (Cézard & Canat 2012). En raison des nombreux autres projets menés en parallèle, cette idée a néanmoins dû attendre plusieurs années, avant d'être finalement convertie en dépôt de brevet en 2020 (démarche en cours). Elle a également motivé depuis 2018 deux études en RT-CNES, dont il est trop tôt pour dresser ici le bilan.

Mes travaux sur les lidars fibrés pour la détection de gaz depuis l'espace se sont poursuivis en 2012, en coordonnant la rédaction de la proposition AFRODIT (All-fiber Frequency Reference for DIAL Testbed) pour l'ESA. Le but était de réaliser un système d'asservissement pour stabiliser la fréquence d'un laser semi-conducteur à 2μm, avec une excellente précision (100 kHz sur 10 secondes). Réaliser le code LIDIASAT m'avait donné une bonne culture et une bonne compréhension des enjeux de mesure associés aux demandes de l'ESA dans ce domaine. J'ai néanmoins dû fournir un important travail complémentaire de recherche et de synthèse sur les différentes techniques d'asservissement. Au final, la proposition AFRODIT n'a pas été acceptée, mais elle a reçu une excellente note technique. Surtout, elle m'a permis de me former aux techniques de modulation et asservissement de fréquence de laser semi-conducteurs.

A la suite de cette expérience, j'ai réalisé des recherches complémentaires sur ces techniques d'asservissement de fréquence. Au cours d'un stage (Arlotti 2014), nous avons initié un banc expérimental de stabilisation de fréquence à 1.5 μm, que j'ai complété par la suite. A l'issue de ces travaux, j'ai produit un rapport interne de recherche étoffé sur cette thématique (édité tardivement,

Cézard et al., 2020). La Figure 79 montre par exemple un résultat d'expérience de stabilisation de fréquence de laser semi-conducteurs à 1539 nm, sur une raie d'absorption de l'acétylène. La Figure 80 illustre quant à elle un montage d'asservissement basé sur la technique FMS (Frequency Modulation Spectroscopy). Cette technique, impliquant une détection directe et une démodulation I/Q, fournit un signal d'asservissement ressemblant à la dérivée en fréquence de la transmission de la cellule de gaz. Les outils de simulation et le banc expérimental que j'ai réalisé à cette époque, avec le stagiaire et avec l'appui de collègues, forment aujourd'hui un point d'appui important pour des travaux d'actualité. Ils ont notamment été réutilisés en 2020, dans le cadre du stage de Marion Manzoni, dédié à la stabilisation en fréquence du lidar VEGA à 1645 nm, que j'ai co-encadré avec Matthieu Valla (Manzoni, 2020).

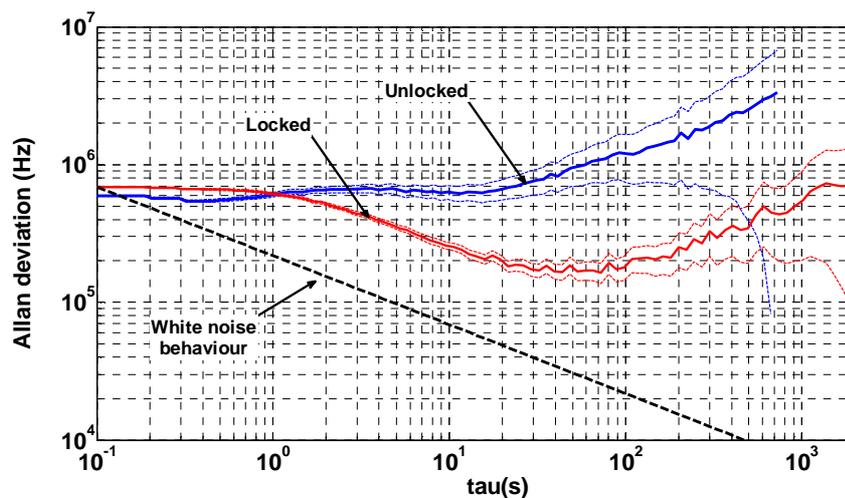


Figure 79 – Déviation d'Allan de la fréquence de battement de deux diodes laser DFB à 1539 nm, chacune étant asservie en fréquence sur la raie d'absorption d'une cellule fibrée renfermant de l'acétylène (C_2H_2). (Source : Cézard et al. 2020)



Signal FMS en détection I/Q

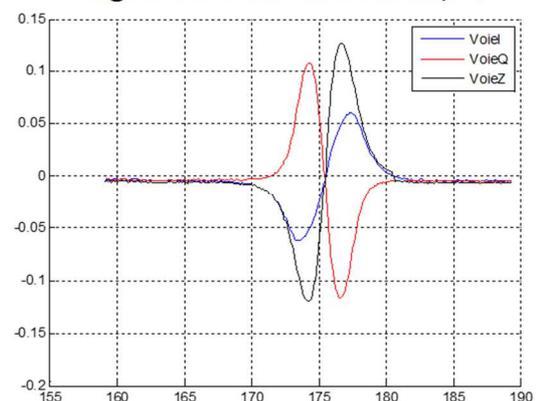


Figure 80 – Gauche : Montage en technologie RF (Radiofréquence) pour la modulation et démodulation I/Q d'un signal d'asservissement de type FMS (Frequency Modulation Spectroscopy). Droite : signaux FMS observés sur les canaux I, Q, et $Z=(I^2+Q^2)^{1/2}$, qui correspondent tout à fait aux attendus théoriques. (Source : Cézard et al. 2020)

Ces expériences de spectroscopie à modulation de fréquence m'ont progressivement incité à questionner de nouvelles éventualités de systèmes lidars, utilisant des techniques de modulation originales. En particulier, je me suis intéressé à la technique de modulation et démodulation cohérente nommée CLADS (Chirped Laser Dispersion Spectroscopy). Cette technique est basée sur l'application d'une rampe de fréquence rapide au laser maître, suivi d'une détection cohérente de la

signature spectrale du gaz non pas en amplitude mais en phase (Wysocki et al. 2010). En vertu de la relation de Kramers-Krönig, un milieu gazeux produit en effet non seulement une atténuation en amplitude, mais aussi une dispersion d'indice de réfraction. Cette dernière produit une dispersion de phase, qu'un système lidar en détection cohérente peut révéler. Au cours d'un stage (Baraçal de Mecê, 2015), nous avons étudié les fondamentaux de cette technique, et réalisé des mesures expérimentales dans des cellules de gaz. De bons résultats ont été obtenus (Figure 81) dans des cellules de gaz d'acétylène (à 1539 nm) et de méthane (à 1645 nm), y compris à pression atmosphérique, ce qui indiquait une applicabilité potentielle pour un lidar. En revanche, les tests lidars, même à courte portée, ont révélé des difficultés liées en particulier au bruit de phase du laser-maître, et probablement au bruit de détection puisque la rampe rapide de fréquence exige une grande bande passante de détection.

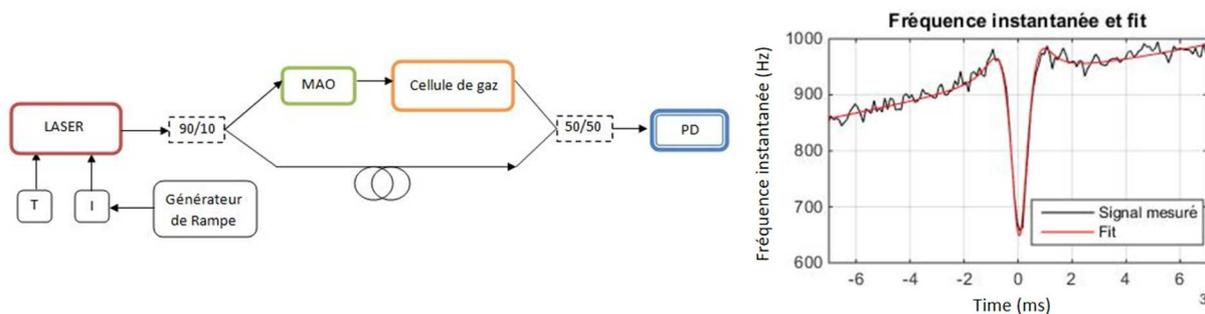


Figure 81 – Droite : Principe d'une expérience de spectroscopie CLADS, Gauche : signal théorique et expérimental obtenu sur une cellule d'acétylène à basse pression. (Source : Baraçal de Mecê, 2015)

Cette activité de recherche sur la technique CLADS n'était pas spécifiquement en lien avec les applications spatiales. Elle s'intégrait plutôt dans une démarche d'exploration générale des techniques de spectroscopie exploitant avantageusement les atouts des sources laser fibrées de type MOPA (cf. chap.3.2.c), et présentant un potentiel d'applications lidar (et lidar spatial entre autres). Néanmoins, même si je n'ai pas poursuivi cette piste, les travaux sur la CLADS m'ont amené par la suite à collaborer aux recherches menées au DOTA/Toulouse sur la spectroscopie cohérente à mini-peigne de fréquence (ou short-combs), un sujet qui s'en révéla assez proche.

Menées à l'Onera par François Lemaître, les recherches sur la spectroscopie cohérente à mini-peigne de fréquence faisaient l'objet depuis déjà plusieurs années de travaux en RT-CNES, en raison de son applicabilité potentiellement avantageuse pour le sondage du CO₂ depuis l'espace (Hébert & Lemaître, 2018). Cette technique rencontrait toutefois le même problème de bruit de phase que celui auquel j'avais été confronté avec la technique CLADS. J'ai alors proposé une méthode pour contourner ce problème, que F. Lemaître a pu tester avec succès sur son démonstrateur lidar à mini-peigne de fréquence. Nous avons alors déposé un brevet sur cette technique particulière (Hébert, Lemaître & Cezard, 2018). Avec mon transfert à Toulouse fin 2019, le lidar à mini-peigne de fréquence pour la spectroscopie est devenu pour moi un important sujet de recherche. Cette technique exploite le procédé de modulation de phase pour émettre simultanément plusieurs fréquences de sondage d'une raie d'absorption, avec un écart de fréquence stable et contrôlé. Après traversée du faisceau modulé dans l'atmosphère, la détection cohérente permet de mesurer simultanément l'amplitude (comme dans un lidar DIAL multi-fréquence) et aussi la phase (comme dans un lidar CLADS) de toutes les fréquences de sondage dans le domaine radio-fréquence. En utilisant aussi le principe de *dual-comb spectroscopy* (DCS), ou spectroscopie à double-peigne, illustré en Figure 82, la bande d'analyse radio-fréquence peut-être ramenée à quelques dizaines de MHz, même si la raie atmosphérique sondée fait plusieurs GHz de large (Picqué & Hänsch 2019).

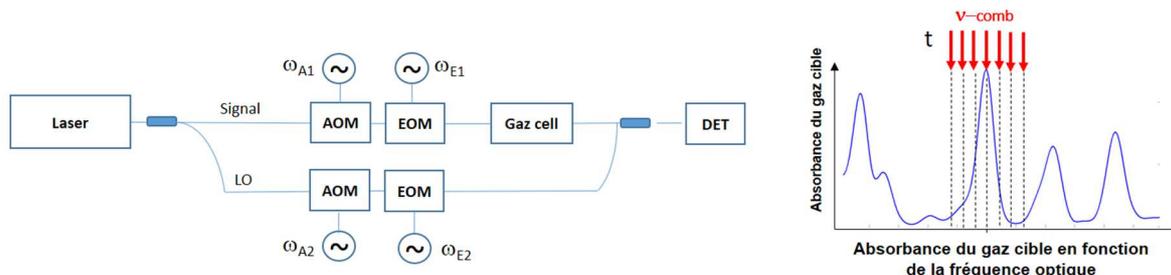


Figure 82 – Gauche : schéma de principe d’une expérience de spectroscopie DCS (AOM/EOM : Acousto/Electro –Optic Modulator, LO : Local Oscillator). Droite : principe du sondage multifréquence simultané permis par la technique DCS.

L’avantage principal du mini-peigne de fréquence est de permettre un sondage multifréquence simultané de l’atmosphère (et non séquentiel comme dans un lidar DIAL classique), ce qui ouvre la perspective, dans les systèmes spatiaux, d’utiliser une méthode d’étalonnage spectral en lieu et place d’un dispositif d’asservissement de fréquence (dispositifs complexes à réaliser), et de limiter certains biais de mesure en permettant aux différentes fréquences de sondage de traverser exactement le même milieu atmosphérique. De nombreux essais de lidar DCS ont été réalisés ces dernières années à l’Onera, ouvrant également des perspectives pour l’altimétrie et la double mesure IPDA/SSE. Sur la base des résultats obtenus, le CNES a récemment mené l’étude d’une mission en phase 0 nommée SCALE (Short-Comb Atmospheric Lidar Experiment), basée sur ce principe.

Ma contribution à cet axe de recherche, au-delà du brevet commun déposé, s’est accentuée à partir de fin 2019. J’ai non seulement pris part aux expériences les plus récentes, mais aussi commencé à mener des recherches complémentaires sur un certain nombre de points. J’ai notamment encadré un stage portant sur une technique alternative de génération du peigne de fréquence (Patiño, 2020) et lancé la thèse de William Patiño (thèse Onera/Cnes ayant commencé fin 2020), dédiée à la réalisation de mesures de CO₂ et de télémétrie par lidar DCS. Nous étudions aussi, avec mes collègues de Palaiseau, et dans le cadre de plusieurs actions de RT-CNES, l’impact des amplificateurs fibrés sur les propriétés des peignes de fréquence (et vice versa). Il est néanmoins trop tôt pour développer ici le résultat de toutes ces actions de recherches.

Jusqu’à présent, tous les travaux évoqués dans cette section sont relatifs à la bande 1.5 μm. Cette bande présente un fort intérêt pour tester de nouvelles architectures et techniques de spectroscopie modulée, car les composants commerciaux sont nombreux, relativement bons marchés, et souvent très performants. Les bandes 1.57-1.58 μm (pour le CO₂) et 1.64-1.66 μm (pour le CH₄), pour lesquelles toutes ces techniques sont applicables, présentent également en soi un fort intérêt pour le sondage spatial. Toutefois, pour le CO₂, la bande spectrale qui présente le plus grand intérêt du point de vue observationnel est la bande 2 μm. Il m’a donc semblé important de lancer également des travaux dans cette direction.

En 2017, j’ai ainsi mis en place la thèse de **Julien Lahyani**, en collaboration avec le laboratoire LMD de Polytechnique et le CNES. Cette thèse, commencée fin 2018 et que je co-encadre avec Julien Le Gouët (Onera) et Fabien Gibert (LMD), avec pour directeur Jean-Michel Hartman (LMD), vise au développement d’un laser à source dite « hybride » à 2 μm et d’un démonstrateur lidar pour la télédétection du CO₂. L’objectif de ce lidar à source hybride, nommé **HELENA** (Hybrid Emitter Lidar Experiment for Environmental Applications), est d’une part de joindre les avantages des lasers fibrés

(souplesse des formes temporelles et spectrales, robustesse, efficacité électrique) et de l'amplification cristalline (puissance optique), et d'autre part de démontrer de bonnes performances pour la mesure du CO₂ troposphérique avec ce nouveau laser.

Le point de départ de ces travaux a été de repartir de la source fibrée à 2 μm réalisée en 2014 au laboratoire au cours de la thèse de Erik Lucas (Lucas et al. 2014). Conçue initialement pour le pompage d'OPO, j'avais proposé à l'époque de positionner la source précisément à 2051 nm en vue de futures applications à la télémétrie du CO₂. Cette raie R30 à 2051 nm du spectre vibrationnel d'absorption du CO₂ est illustrée sur la Figure 83.

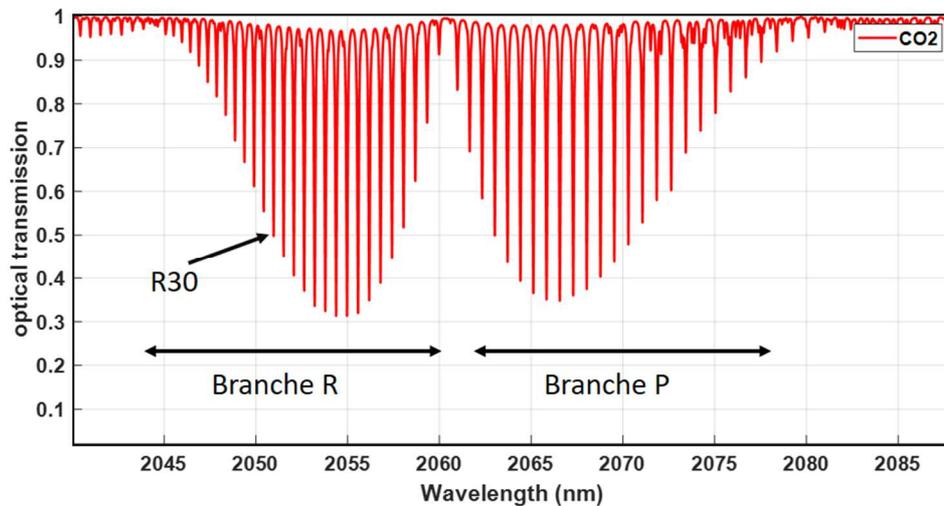


Figure 83 : spectre de transmission du CO₂ atmosphérique (400 ppm) entre 2040 et 2090 nm

Après analyse, il s'est avéré que la source réalisée en 2014 souffrait néanmoins de plusieurs défauts importants, susceptibles de dégrader fortement la qualité des mesures d'un lidar CO₂ (bruit d'intensité, fluctuations thermiques...). Un travail conséquent d'optimisation et de caractérisation de la source a donc été mené afin de la rendre compatible avec nos objectifs de mesure lidar. La Figure 84 illustre le *design* de la source laser actuelle, qui a fait l'objet d'une très récente soumission à publication (Lahyani et al. 2020). Elle délivre une puissance moyenne très intéressante de 2.4 W (120 μJ par impulsion avec un taux de répétition de 20 kHz).

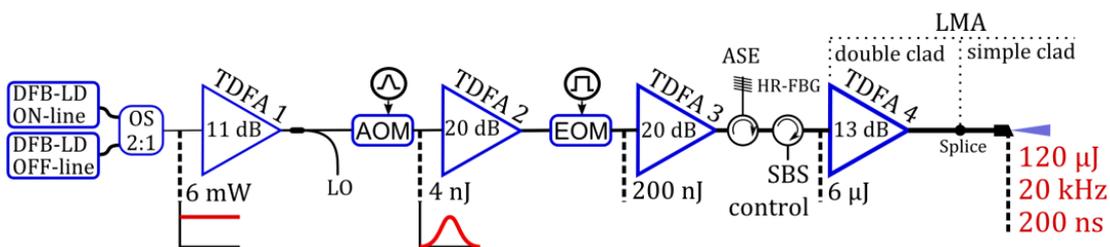


Figure 84 – Schéma de la source fibrée du lidar HELENA à 2051 nm ; Acronymes : DFB-LD: Distributed Feedback Laser Diode, OS: Optical Switch, LO: Local Oscillator, TDEFA: Thulium Doped Fiber Amplifier, AOM: Acousto-Optic Modulator, EOM: Electro-Optic Modulator, ASE: Amplified Spontaneous Emission, HR-FBG: High Reflectivity Fiber Bragg Grating, SBS: Stimulated Brillouin Scattering, LMA: Large Mode Area. (Source : Lahyani et al. 2020)

Cette source a été intégrée en 2020 dans une architecture lidar utilisant une détection cohérente. Ce faisant, le lidar HELENA est devenu, après VEGA pour le méthane, le second lidar fibré bi-fonction DIAL-Doppler développé par notre unité de recherche. Il s'agit là aussi d'une première, puisqu'il n'existe actuellement pas dans le monde (à notre connaissance) de lidar fibré similaire. En

réutilisant les outils de traitement de signal développés pour le lidar VEGA, des premières mesures du CO₂ atmosphérique ont pu être rapidement réalisées en 2020, avec des résultats qui, bien qu'encore imparfaits en terme de biais, sont très encourageants en terme de précision. Le lidar HELENA poursuit actuellement son développement, afin de réaliser l'étape d'hybridation du laser fibré avec un amplificateur cristallin de complexité réduite, et de tester les performances de ce lidar amplifié pour la télédétection du CO₂ et du vent.

e. Mise en perspectives des recherches menées

Bien que mes travaux sur le thème des lidars spatiaux pour la mesure des GES aient commencé il y a déjà près d'une décennie, la lecture du paragraphe précédent a sûrement laissé transparaître le fait qu'ils n'ont pu se dérouler qu'à vitesse relativement réduite pendant plusieurs années. Entre 2012 et 2018, mener de front les activités de recherche sur les supercontinuum, les lidars à NesCOPO, le lidar Raman CALISTO, et le lidar Dial-Doppler VEGA, n'a pas permis d'avancer plus vite sur la thématique spatiale proprement dite. Les choses ont néanmoins évolué, et depuis 2018, ces activités ont pu reprendre une dynamique importante, avec de nombreuses perspectives.

En effet, à la lumière des développements variés que nous avons conduits, et des brevets récemment déposés, ou en cours de dépôt, sur de nouvelles techniques de modulation, il est maintenant indispensable, pour bien orienter les futures actions de recherche, de « projeter par la pensée » ces nouveaux concepts dans l'espace et d'évaluer les performances prévisionnelles que ces derniers pourraient permettre d'atteindre. L'outil de modélisation LIDIASAT, qu'il conviendra de faire évoluer en conséquence, mais qui a déjà été validé par comparaison avec des modèles publiés, sera pour cela un point de départ tout indiqué.

Le concept de lidar à mini-peigne de fréquences pour les mesures IPDA/SSE est particulièrement prometteur. Son développement va être poursuivi à l'Onera via divers moyens (thèse en cours, projets sur fonds propres, RT-CNES), ainsi qu'au CNES, qui va donner suite à l'étude SCALE à travers un projet expérimental dédié (PEX). Les deux organismes pourront ainsi se soutenir mutuellement dans leurs travaux. Bien que les démonstrateurs actuels sur ces activités soient de TRL peu élevés, les technologies employées ont un potentiel de progression en TRL très rapide, et ouvrent des perspectives d'innovation dont nous n'avons assurément pas encore « fait le tour ».

Le lidar HELENA à 2 μ m est une autre source de perspectives enthousiasmante pour les lidars spatiaux. Si un gain important est obtenu par l'étage d'amplification cristalline, sans ajout rédhibitoire de complexité instrumentale, ce lidar hybride pourrait bien être l'une des technologies clés de demain pour le sondage atmosphérique du CO₂, depuis le sol comme depuis l'espace. De plus, de très nombreux composants fibrés existent aussi à 2 μ m (même s'ils sont un peu plus rares et moins performants qu'à 1.5 μ m), de sorte que l'ensemble des techniques de modulation que nous explorons par ailleurs en bande 1.5 μ m pourraient aussi s'appliquer à 2 μ m. Il existe donc là un véritable potentiel de rupture technologique, pour le sondage des gaz à effet de serre, mais aussi probablement pour d'autres applications spatiales (lidars télémètres, lidars vent...).

Enfin, profitant de la présence à l'Onera d'équipes innovantes à la fois dans le domaine de l'observation active et passive, des réflexions ont été récemment initiées quant à l'emploi en synergie d'instruments actifs et passif pour l'amélioration des performances d'observation des GES depuis l'espace. Cette thématique naissante, soutenue en particulier dans le cadre de l'Initiative de

Recherche Stratégique (IRS) SpaceObs du Plateau de Saclay, est appelée à se développer dans le but de définir dans le futur une prochaine génération de missions d'observations des gaz à effet de serre.

f. Références

- **Abshire J. B.**, H. Riris, C. J. Weaver, J. Mao, G. R. Allan, W. E. Hasselbrack, and E. V. Browell, "Airborne measurements of CO₂ column absorption and range using a pulsed direct-detection integrated path differential absorption lidar," *Appl. Opt.* 52, 4446-4461 (2013)
- **Amediek A.**, G. Ehret, A. Fix, M. Wirth, C. Büdenbender, M. Quatrevalet, C. Kiemle, and C. Gerbig, "CHARM-F—a new airborne integrated-path differential-absorption lidar for carbon dioxide and methane observations: measurement performance and quantification of strong point source emissions," *Appl. Opt.* 56, 5182-5197 (2017)
- **Arlotti C.**, « Stabilisation de fréquence laser pour applications lidars DIAL », Rapport de stage de Master de Recherche Photonique de Rennes (2014).
- **Augere B.**, M. Valla, A. Durécu, A. Dolfi-Bouteyre, D. Goular, F. Gustave, C. Planchat, D. Fleury, T. Huet, C. Besson, "Three-Dimensional Wind Measurements with the Fibered Airborne Coherent Doppler Wind Lidar LIVE", *Atmosphere*, Vol.10, 549 (2019)
- **Baraçal de Mecê P.**, « Réalisation et test d'un banc en technologie fibrée de spectroscopie par dispersion à l'aide d'un laser à glissement de fréquence », mémoire de stage de master 2 de l'institut d'Optique Graduate School (2015)
- **Beck J.**, T. Welch, P. Mitra, K. Reiff, X. Sun, and J. Abshire, "A highly sensitive multi-element HgCdTe e-APD detector for IPDA lidar applications," *J. Electron. Mater.* 43, 2970–2977 (2014)
- **Caron J.** and Y. Durand, "Operating wavelengths optimization for a spaceborne lidar measuring atmospheric CO₂", *Appl. Opt.* 48, pp.5413-5422 (2009)
- **Cézard N.**, G. Canat, « Adaptation des formes spectrales et temporelles d'impulsions laser pour des applications Lidar à fonction duale IPDA - télémétrie en technologie laser fibré », INPI 2479 (2012)
- **Cézard N.**, L. Lombard, J. Le Gouët, D. Goular, A. Bresson, A. Dolfi-Bouteyre, G. Canat, « 1579 nm fiber laser source for spaceborne monitoring of carbon dioxide », *EPJ Web of Conferences* 11911, 17010 (2016).
- **Cézard N.**, « Étude d'un lidar spatial à fonction duale Dial-altimétrie pour la mesure du CO₂ dans l'atmosphère », Rapport interne de recherche RT1/19600 (2013)
- **Cézard N.**, « Stabilisation de fréquence de diodes laser en vue d'applications LIDAR DIAL pour la détection de gaz », Rapport interne de recherche RT1/30660 (2020)
- **Chen J.R.**, K. Numata, et S. T. Wu, « Error reduction methods for integrated-path differential-absorption lidar measurements », *Opt. Express*, vol. 20, no 14, p. 15589-15609 (2012)
- **Dobler J.T.**, F. W. Harrison, E. V. Browell, B. Lin, D. McGregor, S. Kooi, Y. Choi, and S. Ismail, "Atmospheric CO₂ column measurements with an airborne intensity-modulated continuous wave 1.57 μ m fiber laser lidar," *Appl. Opt.* 52, 2874-2892 (2013)
- **Ehret G.**, C.Kiemle, M.Wirth, A.Amediek, A.Fix, S.Houweling, "Space-borne remote sensing of CO₂, CH₄, and N₂O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis", *Appl.Phys.B* 90, 593-608 (2008).
- **Ehret G.**, Flamant, P.H, Alpers M., Millet B. Stephan C. Crebassol P. "The French-German climate mission MERLIN", in *Proceedings of the Coherent Laser radar Conference* (2013)
- **Ehret G.** et al., « MERLIN: A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane », *Remote Sens.*, vol. 9, no 10, p. 1052 (2017).
- **Gibert F.**, P.H. Flamant, D.Bruneau, C.Loith, "Two-micrometer heterodyne differential absorption lidar measurements of the atmospheric CO₂ mixing ratio in the boundary layer", *Appl.Opt.* 45 pp,4448-4458 (2006)
- **Gibert F.**, J. Pellegrino, D. Edouart, C. Cénac, L. Lombard, J. Le Gouët, T. Nuns, A. Cosentino, P. Spano, and G. Di Nepi, "2- μ m double-pulse single-frequency Tm: fiber laser pumped Ho:YLF laser for a spaceborne CO₂ lidar," *Appl. Opt.* 57, 10370-10379 (2018)

- **Hébert P-J.**, F.Lemaitre, [N. Cézard](#), « Lidar for heterodyne detection by a local oscillator and a dual probing beam, at one or several frequency(ies), and lidar detection method by dual heterodyning detection », US20190383940A1, (pending patent)
- **Hébert P-J.**, F.Lemaitre, "SCALE: validations and prospects for a novel type of sounding lidar using short frequency combs", in Proceedings of the International Conference on Space Optics – ICSO (2018)
- **Ishii S.**, K. Mizutani, H. Fukuoka, T. Ishikawa, B. Philippe, H. Iwai, T. Aoki, T. Itabe, A. Sato, and K. Asai, "Coherent 2 μm differential absorption and wind lidar with conductively cooled laser and two-axis scanning device," Appl. Opt. 49, 1809-1817 (2010)
- **Kameyama S.**, M. Imaki, Y. Hirano, S. Ueno, S. Kawakami, D. Sakaizawa, and M. Nakajima, "Development of 1.6 μm continuous-wave modulation hard-target differential absorption lidar system for CO₂ sensing," Opt. Lett. 34, 1513–1515 (2009).
- **Koch G.J.**, J. Y. Beyon, F. Gilbert, B. W. Barnes, S. Ismail, M. Petros, P. J. Petzar, J. Yu, E. A. Modlin, K. J. Davis, and U. N.Singh, "Side-line tunable laser transmitter for differential absorption lidar measurements of CO₂: design and application to atmospheric measurements," Appl. Opt. 47, 944–956 (2008)
- **Lahyani J.**, Le Gouët J., Gibert F., [Cézard N.](#) « 2.05- μm all-fiber laser source designed for CO₂ and wind coherent lidar measurement », submitted to Applied Optics (Dec. 2020)
- **Lucas E.**, L. Lombard, Y. Jaouën, S. Bordais, and G. Canat, "1 kW peak power, 110 ns single-frequency thulium doped fiber amplifier at 2050 nm," Appl. Opt. 53, 4413-4419 (2014)
- **Manzoni M.** "Optimisation d'un lidar fibré pour la mesure du méthane atmosphérique », mémoire de stage de Master Photonique de Strasbourg (2020)
- **Menzies B.T.**, et D. M. Tratt, «Differential laser absorption spectrometry for global profiling of tropospheric carbon dioxide: selection of optimum sounding frequencies for high-precision measurements,» Applied Optics, vol. 42, n° 133, pp. 6569-6577, 2003
- **W.C. Patiño**, "Numerical simulation of a short frequency comb source and prospects for Lidar remote sensing", internship report of Institut D'optique Graduate School (2020)
- **Picqué N.** and T.W. Hänsch. "Frequency comb spectroscopy", Review Article. Nature Photonics 13, 146-157 (2019)
- **Refaat T.F.**, Syed Ismail, Amin R. Nehrir, John W. Hair, James H. Crawford, Ira Leifer, and Timothy Shuman, "Performance evaluation of a 1.6- μm methane DIAL system from ground, aircraft and UAV platforms," Opt. Express 21, 30415-30432 (2013)
- **Riris H.**, K. Numata, S. Li, S. Wu, A. Ramanathan, M. Dawsey, J. Mao, R. Kawa, and J. B. Abshire, "Airborne measurements of atmospheric methane column abundance using a pulsed integrated-path differential absorption lidar," Appl. Opt. 51, 8296-8305 (2012)
- **Wysocki G.** and D. Weidmann, "Molecular dispersion spectroscopy for chemical sensing using chirped mid-infrared quantum cascade laser," Opt. Express 18, 26123-26140 (2010)

Chapitre 5 - Conclusions et Perspectives

1. Synthèse de mon parcours de recherche jusqu'en 2020

Mes recherches sur la caractérisation physico-chimique de l'atmosphère par Lidar m'ont permis jusqu'à présent d'acquérir des connaissances variées dans différents domaines de recherche. Je rappellerai ici les trois principaux d'entre eux, largement évoqués au cours de ce mémoire, mais j'en ajouterai aussi un quatrième dans cette synthèse.

- **En physique et optique atmosphérique.** En cherchant à mesurer des paramètres aussi variés que la vitesse de l'air, la température, la densité atmosphérique, ou encore la concentration de diverses espèces chimiques (méthane, vapeur d'eau, dioxyde de carbone, dihydrogène, COV, gaz toxiques...), je me suis appuyé sur des signaux presque aussi variés de diffusion Rayleigh, diffusion Mie, diffusion Raman, et absorption différentielle. J'ai également développé des codes versatiles de modélisation de systèmes lidars, comme LIDIASOL pour les applications sol et LIDIASAT pour les applications satellitaires.
- **En technologies optroniques.** J'ai en effet conçu, ou contribué à concevoir, une grande variété de systèmes optroniques novateurs, dans des gammes variées de longueur d'onde : lidars PADL (Rayleigh) et CALISTO (Raman) dans l'UV (355-420 nm), lidars MINI-PEIGNE (Dial), VEGA et HELENA (Dial/Doppler) dans le SWIR (1.5, 1.6 et 2 μ m), SEPIA et SHADOAS (Dial) dans le MWIR (3-4 μ m), MICLID dans le LWIR (7.5-10.7 μ m). L'ensemble de ces travaux m'a apporté une bonne culture générale dans de nombreux domaines relatifs aux technologies optroniques (lasers, optiques, modulateurs, détecteurs...).
- **En traitement de l'information.** J'ai acquis une base culturelle élargie sur les problèmes et méthodes de traitement des signaux de mesure lidar, pour la détection (tests de décision de Neyman-Pearson), pour l'estimation (estimateurs au maximum de vraisemblance), et pour l'identification (régression par pénalisation des modèles complexes). D'autre part, je me suis appuyé sur plusieurs outils issus de la théorie de l'information (bornes de Cramer-Rao, courbes ROC) pour évaluer les performances prévisionnelles d'une grande diversité de systèmes lidars.
- **En encadrement et orientation de travaux de recherche.** C'est le quatrième domaine que j'ajoute ici, qui n'est pas un domaine scientifique proprement dit, mais qui ne nécessite pas moins un apprentissage sur la durée. Depuis 2009, j'ai eu le plaisir d'encadrer ou co-encadrer 5 doctorants, 1 post-doctorant, 1 CDD, et 7 stagiaires... et je crois que ce fut un plaisir globalement partagé ! J'ai également dirigé avec succès deux projets scientifiques d'une certaine envergure, CALISTO (3 ingénieurs et 1 doctorant sur 3 ans) et VEGA (8 ingénieurs et 2 doctorants sur 6 ans). J'ai pris enfin beaucoup d'intérêt à préparer et donner, pendant 3 ans, en marge de mes activités au laboratoire, un cours spécialisé en *Systèmes Lidars* à des étudiants de Master Photonique (Polytech Paris Sud). Pour toutes ces raisons, il m'a semblé que le temps était venu de concrétiser l'expérience acquise ces dernières années, en présentant ce mémoire pour le titre d'Habilitation à Diriger des Recherches.

2. Impact des recherches menées

A un niveau plus collectif, je crois que l'ensemble de mes travaux a contribué jusqu'à présent à renforcer l'expérience et la crédibilité de l'ONERA sur plusieurs thématiques importantes :

- **La sécurité aéronautique** : mes travaux sur la télémessure par lidar Rayleigh des paramètres aérodynamiques de l'atmosphère et la détection de turbulences restent toujours d'actualité. Ils viennent aujourd'hui appuyer le montage de nouveaux projets de lidars Rayleigh embarqués, reprenant notamment le concept d'interféromètre à deux ondes. Dans ce domaine, il est intéressant de remarquer que le DLR en Allemagne, de même que des entreprises américaines comme Ball Aerospace, ont également investi dans cette approche ces dernières années.
- **La sécurité industrielle** : les démonstrateurs Lidars « emblématiques » que sont CALISTO (pour le dihydrogène) et VEGA (pour le méthane) reflètent à la fois la pertinence de la télédétection lidar (Raman et DIAL) pour les besoins de surveillance industrielle de gaz dangereux, toxiques ou explosifs, et la capacité de l'ONERA à répondre à ces enjeux de manière novatrice et efficace. Mes travaux dans cette thématique ont fait l'objet de plusieurs invitations en conférences en 2019 et 2020.
- **La défense** : le démonstrateur MICLID a démontré le potentiel de la technologie lidar pour la télédétection de gaz de combat, et mes travaux ont permis d'élaborer des stratégies d'émission de fréquence optimisant les performances en temps contraint de ce type d'instrument. Pour d'autres gaz très toxiques, on peut noter que la technique la plus pertinente pourrait être celle du lidar Raman, ce qui souligne encore l'intérêt d'avoir acquis une bonne connaissance et expérience à la fois des techniques DIAL et Raman.
- **L'environnement/climat/énergie** : dans un contexte de réchauffement climatique et de prise de conscience environnementale généralisée, il est important de positionner l'ONERA vis-à-vis de ces enjeux fédérateurs. Mes recherches sur les mesures de méthane (lidar VEGA) et de dioxyde de carbone (HELENA, MINI-PEIGNES) sont susceptibles d'y contribuer, sous l'angle de la surveillance des émissions diffuses de gaz à effet de serre. Mes travaux sur la télédétection de l'hydrogène (CALISTO) pourraient quant à eux trouver un terrain applicatif sur le secteur de l'énergie hydrogène, amené à se développer fortement dans le futur, comme en témoignent les récentes déclarations gouvernementales liées au plan de relance.
- **L'espace** : dans le domaine spatial, les développements que j'ai lancés ou auxquels je contribue, sur les technologies lidar en devenir comme le lidar hybride HELENA (thèse CNES), ou le lidar à mini-peigne de fréquences (R&T et thèse CNES), sont autant de travaux de recherche qui placent l'ONERA au cœur des enjeux sur la surveillance des gaz à effet de serre depuis l'espace. Mon implication dans le comité scientifique de suivi du projet MERLIN (CNES-DLR) ces dernières années, et ma participation en 2020 à la CDR (Critical Design Review) de ce lidar spatial, sont également des signaux forts de ce positionnement.

3. Perspectives : mes projets de recherches pour le futur

Pour conclure ce mémoire, je vais présenter quelles sont mes perspectives de recherches pour l'avenir. Un certain nombre d'entre elles ont déjà été évoquées au chapitre 4, à travers les différentes rubriques de « mises en perspectives », mais ce chapitre permettra de récapituler, et aussi d'ajouter quelques éléments.

Tout d'abord quelques mots sur mon environnement de recherche, qui a changé. Depuis 2020, j'ai en effet rejoint, pour des raisons familiales, le site Onera de Toulouse, où le Département d'Optique et Techniques Associées (DOTA) est également présent avec deux équipes :

- L'équipe POS (Propriétés Optiques des Scènes), qui se consacre à l'acquisition et à l'exploitation scientifique d'images de télédétection, allant du visible à l'infrarouge thermique, essentiellement en spectro-imagerie passive;
- L'équipe IODI (Interaction Onde-matière et systèmes laser pour la Détection directe et l'Imagerie), qui se consacre aux techniques de télédétection active pour la caractérisation de milieux diffusants et gazeux (lidars aérosols, lidars gaz à peignes de fréquence²⁴), et de cibles distantes en conditions de visibilité dégradées (téléométrie 3D, spectro-imagerie laser).

J'ai rejoint l'équipe IODI, dont les thématiques sont très proches de celles de ma précédente unité de recherche à Palaiseau. A court terme, les activités sur les lidars à mini-peigne de fréquence sont en effet en parfaite adéquation avec mes précédents travaux, tandis qu'à plus long terme, le thème des lidars aérosols promet d'offrir une excellente complémentarité thématique avec celle des lidars gaz atmosphériques. Compte-tenu de ces nouvelles opportunités, mais aussi des nombreuses activités que j'avais engagées à Palaiseau, dont plusieurs sont en plein développement, la feuille de route de mes activités de recherche pour les prochaines années sera la suivante :

- Accompagner, par un travail d'expertise scientifique, les recherches futures sur les lidars Rayleigh pour le contrôle de vol et la détection de turbulences, ainsi que sur les lidars Raman pour la détection de gaz (études qui seront menées à Palaiseau);
- Continuer à orienter, approfondir, et valoriser les activités de recherche sur les lidars DIAL à détection de gaz, sur les sites de Palaiseau (lidars DIAL-Doppler, avec le concours de mes collègues bien sûr) et de Toulouse (lidars gaz à peignes de fréquence notamment) ;
- Contribuer aux recherches menées à Toulouse sur de nouveaux instruments de télédétection de l'atmosphère (lidar aérosols notamment), ou de cibles distantes en conditions de visibilité dégradées.

Je vais donc revenir sur ces trois volets de ma feuille de route dans les sections suivantes, en développant plus particulièrement le second, qui est au cœur de mon projet à 5 ans. Je terminerai en présentant également un projet qui me tient à cœur, lié à l'animation, à l'échelle nationale, d'un nouveau *Club Lidar* au sein de la SFO (Société Française d'Optique).

²⁴ La thématique des lidars gaz à mini-peigne a été développée par Xavier Orlik (IODI), puis par François Lemaître (POS), et a donc un parcours un peu atypique, « à cheval » sur les deux unités.

a. Accompagnement scientifique sur les lidars Rayleigh (contrôle de vol et détection de turbulences) et lidars Raman (détection de gaz)

Ces activités, que j'ai initiées au sein de mon ancienne équipe à Palaiseau, connaissent aujourd'hui un essor important. Mes travaux antérieurs sur ces thématiques me permettront donc d'accompagner scientifiquement les prochains développements, sans exclure également, sur certains sujets ponctuels, un investissement personnel qui pourra être plus marqué.

Lidars Raman pour la détection de gaz

Le projet CALISTO-2, que j'ai co-élaboré avec l'Andra en 2017-2018 suite au succès du premier projet CALISTO, a débuté mi-2020, pour une durée de 3 ans (2020-2023). Le but est d'une part d'enrichir le démonstrateur lidar de nouvelles voies pour la mesure du dioxygène (O₂) et de la température, et d'autre part de réaliser des tests de mesures dans un environnement représentatif de l'application envisagée (la surveillance de colis de déchets radioactifs). S'il ne s'agit pas encore de disposer le lidar devant une rangée de containers radioactifs, il s'agira néanmoins de réaliser des mesures en milieu souterrain, au centre d'essai de Meuse Haute-Marne (CMHM) de l'Andra. Le démonstrateur CALISTO y rencontrera (à 500 m sous le sol !) des conditions de mesures représentatives de l'application finale en termes de température, humidité, empoussièrement... Ces tests, auxquels je participerai, seront importants pour pouvoir envisager des phases ultérieures de développement du lidar, voir un transfert vers l'industrie. Actuellement, je contribue à la conception et à la modélisation des performances des nouvelles voies de mesures du lidar (O₂/Température), tandis que la poursuite du développement expérimental du démonstrateur est assurée par David-Tomline Michel à Palaiseau, avec l'appui de plusieurs autres collègues (dont mon ancien doctorant Anasthase Liméry, récemment embauché en CDI, ce dont je me réjouis).

Au-delà du lidar CALISTO, le principe et les avantages du lidar Raman, en tant que technique de télédétection donnant accès à certaines informations atmosphériques, sont susceptibles de motiver de nouveaux développements à Palaiseau comme à Toulouse. En effet, le lidar Raman peut également s'avérer être une solution de mesure pertinente pour des applications telles que le contrôle de vol ou encore l'étude des aérosols. Les connaissances et expériences acquises sur cette technique pourront donc être réinvesties dans d'autres travaux de développement.

Lidars Rayleigh pour le contrôle de vol et la détection de turbulences

Cette thématique, qui fut à l'arrêt pendant quelques années, connaît depuis 2017 une nouvelle phase d'expansion. Plusieurs stages et travaux préparatoires ont eu lieu depuis trois ans, auxquels j'ai contribué avant 2020. De nouveaux projets de recherche, qu'il est trop tôt pour décrire ici mais auxquels je participerai en accompagnement scientifique, sont actuellement en cours de mise en place avec des partenaires industriels.

b. Lidars DIAL fibrés pour la détection de gaz

Ce thème constituera l'axe central de mes recherches pour les prochaines années. Il se rapporte à différentes activités menées à la fois dans mon ancienne équipe de Palaiseau (lidars Dial-Doppler VEGA et HELENA, activités liées au spatial) et dans mon nouvel environnement toulousain (lidar à mini-peigne de fréquence, également lié au spatial). Pour donner un cadre commun à ces différentes actions de recherches, j'ai contribué en 2018-2019 à l'élaboration d'un Projet de Recherche Fédérateur (PRF), nommé TELEMAR (Télédétection par Mesures Actives), sélectionné en

2019 par la direction Scientifique de l'Onera. Echelonné sur 4 ans (2020-2023), et mené sur fonds propres, le projet est globalement destiné à faire progresser les recherches de l'Onera dans plusieurs domaines de la télédétection optique, et notamment celui des lidars DIAL fibrés à travers le *Work Package* « Télédétection des gaz atmosphériques par Lidars Fibrés » dont je suis responsable. Ce *Work Package* inclut 3 tâches :

- Développement instrumental de lidars fibrés DIAL-Doppler (CH_4 , CO_2 , H_2O)
- Analyse en synergie des données de mesures gaz & vent
- Lidars fibrés et applications spatiales

L'activité sur les lidars fibrés DIAL-Doppler consiste en la poursuite du développement des démonstrateurs VEGA (CH_4 /vent) et HELENA (CO_2 /vent), ainsi qu'en une étude préparatoire en vue d'un futur lidar H_2O /vent.

Pour le lidar VEGA, les recherches porteront d'une part sur l'amélioration matérielle du démonstrateur, en recherchant notamment une montée en puissance laser, une amélioration de la stabilité spectrale, un gain supplémentaire en intégration, ainsi que la mise au point de méthodes de traitement des mesures en temps réel. A cette partie technique, qui se déroulera essentiellement à Palaiseau, s'ajouteront deux autres volets dans lesquels je m'investirai plus directement. Le premier concerne les campagnes de mesures. Il est en effet indispensable que le lidar VEGA continue à être éprouvé sur le terrain, et dans différents cadres applicatifs. A ce titre, une campagne sur un site industriel de stockage des déchets ménagers est en préparation pour 2021, en collaboration avec Suez, Total, et le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE). D'autres projets de campagnes de mesures sont également en discussion avec d'autres partenaires. Le second volet concerne le traitement et la valorisation des données de mesure. Les données produites par VEGA au cours des campagnes de Lacq en 2018 et 2019 sont extrêmement riches, et n'ont pas encore été toutes exploitées ni valorisées. A court terme (2021-2022), je reviendrai donc en détails sur l'analyse de ces données avec l'objectif d'une part de comparer la précision des mesures aux attentes théoriques, pour bien identifier les points de convergence et de divergence entre théorie et expérience, et d'autre part pour valoriser à leur juste niveau les très bons résultats obtenus sur les mesures de vent et de méthane. Ce travail pourra donner lieu à plusieurs publications en journal, et également faciliter un possible transfert du démonstrateur VEGA vers l'industrie.

S'agissant du **lidar HELENA**, les travaux de thèse de Julien Lahyani ont jusqu'à présent essentiellement porté sur la source laser fibrée à 2051 nm. De premiers essais lidars pour la mesure du CO_2 atmosphérique ont eu lieu en 2020, avec des résultats très encourageants, et je m'investirai avec le doctorant dans une analyse approfondie des résultats obtenus. L'analyse des performances du lidar HELENA est en effet très importante pour le positionnement de ce lidar d'avenir, tant pour des projets d'applications au sol (suivi d'émissions de points sources en milieu industriel, ou d'émissions diffuses à l'échelle de villes par exemple) que depuis l'espace. Cette analyse donnera lieu à publication. Le PRF TELEMAT permettra également l'amélioration matérielle du lidar HELENA, avec notamment l'ajout d'une boucle de stabilisation spectrale. Un travail sur la calibration du lidar, en partenariat avec l'Ineris, est aussi envisagé. La Figure 85 illustre l'état d'avancement actuel du lidar HELENA en 2020, ainsi que les premières mesures lidar réalisées, très encourageantes, avec une portée dépassant le kilomètre sur les signaux bruts.

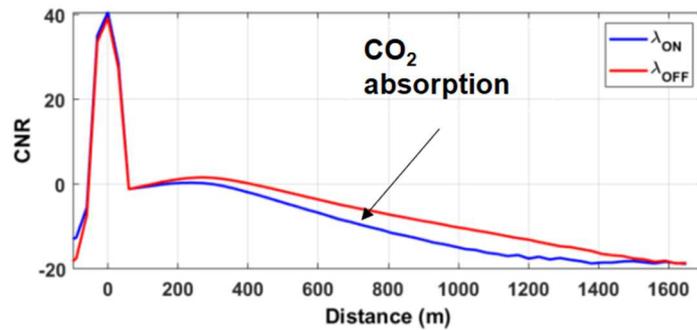


Figure 85 – Gauche : Photo du démonstrateur lidar HELENA en 2020 ; Droite : signaux lidar enregistrés à Palaiseau, avec une portée dépassant le kilomètre. L’absorption du CO₂ est clairement visible, creusant la différence d’intensité du signal diffusé aux fréquences ON (absorbée) et OFF (non absorbée) au fur et à mesure que le faisceau se propage. (Source : J. Lahyani, Onera)

Les travaux sur les lidars fibrés cohérents pour la mesure de vapeur d’eau sont plus prospectifs, mais pourraient s’avérer très prometteurs en termes applicatifs. La vapeur d’eau est en effet une variable atmosphérique extrêmement importante dans de nombreux domaines comme la météorologie et l’aéronautique (conditions de formations de contrails, de givrage...), ou encore la maîtrise de l’environnement optronique d’une scène. La mesure de vapeur d’eau serait également très complémentaire des mesures lidar conduites à Toulouse sur les aérosols (impact de l’humidité sur les propriétés radiatives des aérosols, interaction suies/vapeur d’eau pour la formation des contrails...). Toutefois, comme signalé au chapitre 4, les travaux préparatoires que nous avons engagés sur l’élaboration d’un lidar fibré H₂O/vent à 1.5 μ m devront être repositionnés après la publication d’une équipe japonaise, parue mi-2020, sur un lidar tout à fait similaire.

Sur **l’analyse en synergie des données gaz & vent**, les travaux seront menés à deux niveaux différents. Tout d’abord, au niveau le plus local, il s’agira de développer la méthodologie, tout juste esquissée aujourd’hui, de couplage des données vent et gaz afin d’estimer le débit des émissions de points sources (qui peuvent être des fuites de CH₄ ou de CO₂ en milieu industriel). Des premiers travaux très encourageants ont été menés en 2020 à partir de données enregistrées par le lidar VEGA lors de la campagne de Lacq 2019. Il faut à présent confirmer la validité de ces mesures, conforter la méthodologie, et travailler au calcul de la précision de mesure du débit mesuré, ou du débit mesurable dans de futures campagnes impliquant les lidars DIAL-Doppler VEGA ou HELENA.

Un second axe de recherche sera d’évaluer la faisabilité de mesures de flux de gaz à travers de plus larges surfaces, par exemple pour la surveillance des émissions diffuses d’un site industriel de grande ampleur, d’une ville, ou même d’une région plus grande si l’on envisage un moyen de mesure aéroporté. Sur ce sujet, j’ai travaillé depuis plusieurs années à susciter un projet de collaboration permettant d’associer, en une campagne aéroportée commune, le lidar DIAL CHARMF développé au DLR (équipe de Andreas Fix) et le lidar Doppler fibré LIVE développé à l’Onera dans mon équipe de recherche de Palaiseau. Le premier est capable de mesurer la concentration (en mode IPDA) du méthane ou du dioxyde de carbone, tandis que le second est capable de mesurer le profil du vecteur vent depuis la hauteur de vol de l’avion (jusqu’à 7 km) jusqu’au sol, avec une précision très intéressante (de l’ordre de 1 m/s) dans les basses couches près du sol. Associer ces deux instruments dans le même aéronef pour une campagne aéroportée créerait donc une opportunité exceptionnelle, pour mesurer simultanément les données nécessaires à l’évaluation des flux de surface du CH₄ ou du CO₂. L’évaluation de ces flux est importante pour que les scientifiques du climat puissent établir (ou contraindre dans leurs modèles) les bilans de puits et source de GES d’une région donnée. En 2020,

J'ai donc proposé de mener une mission aéroportée conjointe avec le DLR dans le cadre de la **campagne MAGIC-2021**, portée par le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) et le CNES, proposition qui a récemment été retenue à travers un projet APR-CNES. Les lidars français et allemands LIVE & CHARMF seront ainsi associés pour la toute première fois lors d'une campagne aéroportée qui aura lieu mi-2021 en Suède. Bien entendu, le traitement des données de vol et l'évaluation des flux de gaz mesurés seront au cœur des recherches qui suivront sur ce thème. Les données recueillies serviront également de base afin de déterminer si un lidar bi-fonction Dial-Doppler, comme VEGA ou HELENA, serait capable d'obtenir seul des résultats de niveau scientifique intéressant, ce qui le cas échéant ouvrirait à ces instruments de nouvelles opportunités, et l'éventualité de campagnes aéroportées plus légères.

Enfin, les activités sur les **lidars et leurs applications spatiales** comprennent également plusieurs volets. Tout d'abord, les recherches menées sur les mesures de gaz et de télémétrie par lidar à mini-peigne de fréquence vont être poursuivies et amplifiées sur le site de Toulouse. J'ai encadré en 2020 le stage de William Patiño, qui se poursuit aujourd'hui en thèse (2020-2023), avec un co-financement Onera-CNES. Le but de la thèse sera de modéliser en détail les performances attendues avec ce type d'instrument, et de valider le modèle par des mesures du CO₂ atmosphérique et de la distance de cibles. Cela nous permettra ensuite d'évaluer le potentiel de cette technologie pour différentes applications lidar au sol ou en environnement embarqué (aéronef, satellite). La Figure 86 donne un aperçu du type de signal obtenu par un lidar à mini-peigne de fréquence utilisant le principe de Dual Comb Spectroscopy (DCS). En parallèle de cette thèse, il est envisagé que je participe également à l'accompagnement scientifique du CNES dans son Projet Expérimental (PEX) de développement d'un lidar aéroporté à mini-peigne de fréquence (2021-2022), qui fait suite à l'étude en phase 0 SCALE mentionnée au chapitre 4.6. Afin de préparer la montée en puissance optique de futurs lidars à mini-peignes, plusieurs études en RT-CNES sont également en cours en vue d'évaluer l'impact, sur la structure des peignes de fréquence, d'une amplification à haute puissance.

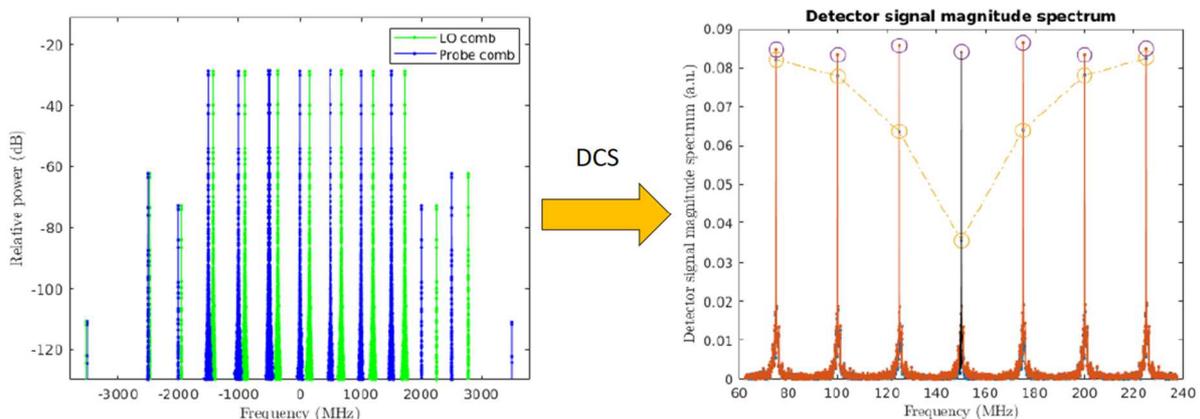


Figure 86 – Simulation d'une expérience de Dual Comb Spectroscopy (DCS) dans une cellule de gaz contenant de l'acétylène. A gauche les deux mini-peigne modélisés, à droite le signal escompté de DCS dans le domaine radiofréquence. (Source : Patiño 2020)

D'autres formats de modulation des impulsions lasers ont également été proposés et brevetés en 2020 (cf. chap.4.6). Dans le cadre du PRF TELEMAT, ces formats de modulation seront expérimentalement testés, avec mes collègues de Palaiseau, afin de mieux évaluer le potentiel et les limites du concept proposé.

Le troisième volet des recherches que je souhaite mener, sur les applications spatiales des lidars, concerne la simulation des performances prévisionnelles des systèmes que nous développons

depuis plusieurs années. Il est très important de chercher à évaluer quelles sont les précisions de mesure envisageables à partir du lidar HELENA à 2 μ m, mais aussi à partir des différents lidars modulés en cours de développement à 1.57 μ m (dont le système à mini-peignes), afin de participer aux prochaines propositions de missions spatiales, et d'orienter judicieusement nos recherches futures dans ce domaine. Le code LIDIASAT que j'ai développé sera un bon point de départ pour ces travaux.

Un dernier volet sera également abordé, en complément du troisième, et consistera en une analyse des complémentarités et des synergies possibles entre les nouveaux instruments de télédétection active et passive développés à l'Onera, pour l'observation des GES depuis l'espace. Cet axe de recherche, porté en premier lieu par Laurence Croizé au DOTA/Palaiseau (spécialiste des mesures des GES par moyens passifs), requerra une mise à disposition de moyens de modélisation de systèmes lidar spatiaux, à laquelle j'apporterai tout mon soutien. Une thèse a été proposée sur ce sujet en 2020, en partenariat avec le LSCE. L'objectif à terme est de contribuer à la définition de futures missions scientifiques d'observation des GES, par le biais de charges utiles plus légères lancées en constellations.

Pour synthétiser, voici les prochains sujets de (co)publications que j'envisage sur cette thématique dans les prochaines années (liste non exhaustive):

- Mesures de panaches industriels de méthane à l'aide du lidar VEGA (valorisation des résultats de campagne de Lacq en 2018 et 2019)
- Analyse des performances du lidar HELENA à 2 μ m pour la télédétection du CO₂ atmosphérique (dans le cadre de la thèse de Julien Lahyani)
- Résultats d'amplification cristalline de la source fibrée à 2 μ m du lidar HELENA (cadre de la thèse de Julien Lahyani)
- Méthodologie de mesure du débit d'un point source (CH₄, CO₂) à partir d'un unique lidar fibré bi-fonction DIAL/Doppler, avec étude de cas d'application au lidar VEGA
- Déroulement et exploitation de la campagne lidar aéroportée MAGIC-2021, menée conjointement avec les lidars CHARMF du DLR et LIVE de l'ONERA, en vue d'évaluer les flux de gaz à effet de serre à l'échelle régionale (1 ou 2 publications)
- Analyse théorique et expérimentale des performances d'un lidar spectroscopique à double peigne de fréquence (DCS) pour la mesure de CO₂ atmosphérique (dans le cadre de la thèse de William Patiño, 1 ou 2 publications)
- Démonstration d'une source laser impulsionnelle à mini-peigne de fréquence de haute-puissance crête, avec mes collègues de Palaiseau
- Analyse des performances prévisionnelles de systèmes lidars implémentant de nouvelles technique de modulation d'impulsions pour la mesure IPDA/SSE des GES depuis l'espace.
- Analyse des synergies instrumentales « actif-passif », associant lidar et système d'imagerie infrarouge pour l'amélioration des produits de mesures d'observation des GES depuis l'espace.

c. Nouveaux instruments de télédétection des aérosols et de cibles distantes en conditions de visibilité dégradées

Outre les travaux déjà mentionnés sur les lidars à peigne de fréquence, ma nouvelle unité de recherche à Toulouse (DOTA/IODI) travaille également au développement de nouveaux systèmes lidars, en particulier pour la caractérisation :

- Des aérosols atmosphériques, à l'aide notamment du lidar COLIBRI (Ceolato et al. 2020), à courte distance (<500 m) mais très haute résolution spatiale (<1m)
- De cibles solides distantes, à l'aide d'outils d'imagerie flash laser et de télémétrie laser 3D embarquée (Hespele et al. 2017), en particulier dans des conditions de visibilité dégradées (pluie, nuages, brouillard...). Un volet d'activité plus spécifique, et plus récent, concerne également le développement d'un lidar pour la détection d'objets immergés.

Ces thématiques présentent une grande proximité scientifique et technique avec celles qui m'ont mobilisé jusqu'à présent, et il sera naturellement envisagé qu'une partie de mes activités futures soit orientée à moyen terme sur un ou plusieurs de ces développements. Pour l'heure, la densité des travaux listés dans les deux sections précédentes, assortie aux conditions difficiles rencontrées en 2020 suite à la pandémie de Covid-19, n'ont pas encore permis de me projeter avec clarté dans ces nouvelles directions. Quelques pistes de réflexion sont néanmoins lancées.

Tout d'abord, comme nous l'avons déjà évoqué, l'étude des aérosols atmosphériques, notamment au moyen du lidar COLIBRI peut offrir une excellente complémentarité avec mes recherches actuelles sur les lidars gaz. Les particules fines, en particulier, font l'objet d'une attention de plus en plus soutenue, en raison de leur impact très important sur la qualité de l'air. Plusieurs sujets peuvent ainsi être imaginés, à aborder en commun avec les spécialistes de ce domaine au sein de l'unité IODI. Sur le plan technologique, le lidar COLIBRI pourrait probablement bénéficier d'améliorations, par exemple l'ajout d'une ou plusieurs voies de réception de diffusion Raman afin de permettre une auto-calibration du lidar, et une restitution plus précise des propriétés radiatives des aérosols. Sur un plan plus applicatif, l'association du lidar aérosol avec un lidar vent pourrait permettre de mesurer, via une méthodologie analogue à celle développée pour les gaz, des flux de particules (en g/s) issus de points sources ou de surfaces plus étendues. Son association avec le lidar Raman CALISTO, capable de mesurer le profil de vapeur d'eau (voir de la température) avec une résolution spatiale équivalente à celle de COLIBRI (< 1 m), serait également très intéressante, en termes d'investigation sur la microphysique à haute résolution spatiale des aérosols (certains étant hygroscopiques, leurs propriétés radiatives sont très dépendantes de la concentration en vapeur d'eau), ou encore sur la formation des contrails.

Par ailleurs, dans une démarche inverse de recherche de complémentarité, les développements menés actuellement sur les mini-peignes de fréquence pourraient aussi offrir des perspectives applicatives, non plus seulement pour la détection des gaz atmosphériques mais pour la caractérisation de cibles distantes. Différentes idées en ce sens sont aujourd'hui à l'étude, qui donneront lieu à des actions de recherche exploratoires, et éventuellement à des dépôts de brevets, dans les deux prochaines années.

d. Animation scientifique et enseignement

Je voudrais conclure ce mémoire en évoquant un projet qui est en train de prendre forme à l'heure où j'écris ces dernières lignes : celui de la création d'un Club Lidar au sein de la Société Française d'Optique (SFO), destiné à rassembler la communauté nationale des chercheurs, utilisateurs, et industriels œuvrant dans ce domaine.

Ce projet est parti du constat qu'il existait en France, sur ce sujet, un écosystème très riche, impliquant de nombreux acteurs issus de laboratoires académiques, EPIC et entreprises privées, mais

répartis dans des équipes de dimensions souvent assez petites. Plusieurs évènements fédérateurs ont pu être organisés par le passé, comme par exemple l'École d'été Géophysique organisée en 2010, 2013 et 2015 par le LMD et le CNRM, ou encore la Journée Nationale Lidar organisées par l'Onera et le LMD en 2017, avec toujours beaucoup de succès, mais sans parvenir à pérenniser ces initiatives sur la durée. L'idée de créer un Club Lidar à la SFO m'a semblé être une solution à expérimenter, afin de fédérer la communauté nationale autour d'une structure bien établie, de rassembler les énergies pour l'organisation d'évènements, et de capitaliser chaque expérience pour faciliter les suivantes.

A l'automne 2019, j'ai pris l'initiative de proposer à la SFO la création du Club Lidar avec le soutien de plusieurs laboratoires. Cette idée a été favorablement reçue, et l'annonce de la création du club a été faite le 15 Octobre 2020 lors de l'Assemblée Générale de la SFO, par son président Philippe Adam. Fin Décembre 2020, j'ai eu par conséquent le plaisir d'animer la première réunion du Club Lidar, qui rassemble pour l'heure un EPIC (ONERA, avec trois équipes de recherche de Palaiseau et de Toulouse), six laboratoires académiques (LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations spatiales, Guyancourt), LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique, Palaiseau), LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Saclay), CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse), ILM (Institut Lumière-Matière, Lyon), LPCA (Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère, Dunkerque)), et deux entreprises privées (Thales R&T (Palaiseau), Cimel (Paris)).

Les missions du Club Lidar seront notamment :

- de promouvoir les activités scientifiques et techniques de la communauté,
- d'organiser des journées nationales ou des sessions de colloques focalisées sur les systèmes lidars
- de contribuer à la formation des jeunes chercheurs dans ce domaine, via la tenue de formations, la création de contenus pédagogiques, et surtout via la réactivation d'une école d'été.

Mon projet de recherche pour les prochaines années inclut donc un investissement significatif au sein de cette nouvelle structure, non seulement à travers le pilotage initial du club, mais aussi à travers les projets de conférences et missions d'enseignements (écoles d'été) qui seront organisées au cours des prochaines années. Le premier rendez-vous est déjà pris, et le Club Lidar animera en juillet 2021 une session orale lors du Congrès de la SFO « Optique Dijon ».

e. Références

- **Ceolato R.**, A.E Bedoya-Velsquez, V.Mouysset, "Short-Range Elastic Backscatter Micro-Lidar for Quantitative Aerosol Profiling with High Range and Temporal Resolution", *Remote Sens.* 2020, 12, 3286 (2020)
- **Hespel L.**, N. Riviere, M. Fraces, P. E. Dupouy, A. Coyac, P. Barillot, S. Fauquex, A. Plyer, M. Tauvy, M. Jacquart, I. Vin, E. Nascimben, C. Perez, J. P. Velayguet, D. Gorce, "2D and 3D flash laser imaging for long-range surveillance in maritime border security: detection and identification for counter UAS applications," *Proc. SPIE 10191, Laser Radar Technology and Applications XXII*, 1019109 (5 May 2017);
- **Patiño W.**, "Numerical simulation of a short frequency comb source and prospects for Lidar remote sensing", internship report of Institut d'Optique Graduate School (2020)

Annexe 1 – Production scientifique

1. Publications dans des revues à comité de lecture

1. J. Lahyani, J. Le Gouët, F. Gibert, and **N. Cézard**, "2.05- μm all-fiber laser source designed for CO_2 and wind coherent lidar measurements", *Appl. Opt.* 60, C12-C19 (2021)
2. **N. Cézard** and J-M. Melkonian, "Long-wave infrared multi-wavelength IPDA lidar for standoff detection of chemical warfare agents: theoretical study," *Appl. Opt.* 59, 11167-11179 (2020)
3. J-M. Melkonian, J. Armougom, M. Raybaut, J-B. Dherbecourt, G. Gorju, **N. Cézard**, A. Godard, V. Pašiškevičius, R. Coetzee, and J. Kadlčák, "Long-wave infrared multi-wavelength optical source for standoff detection of chemical warfare agents," *Appl. Opt.* 59, 11156-11166 (2020)
4. **N. Cézard**, S. Le Méhauté, J. Le Gouët, M. Valla, D. Goular, D. Fleury, C. Planchat and A. Dolfi-Bouteyre, "Performance assessment of a coherent DIAL-Doppler fiber lidar at 1645 nm for remote sensing of methane and wind," *Opt. Expr.* 28, no. 15, pp. 22345-22357 (2020).
5. A. Liméry, **N. Cézard**, D. Fleury, D. Goular, C. Planchat, J. Bertrand, and A. Hauchecorne, "Raman lidar for hydrogen gas concentration monitoring and future radioactive waste management," *Opt. Expr.* 25, 30636-30641 (2017)
6. A. Hauchecorne, C. Cot, F. Dalaudier, J. Porteneuve, T. Gaudo, R. Wilson, C. Cénac, C. Laqui, P. Keckhut, J-M. Perrin, A. Dolfi, **N. Cézard**, L. Lombard, and C. Besson, "Tentative detection of clear-air turbulence using a ground-based Rayleigh lidar", *Appl. Opt.* 55, 3420-3428 (2016)
7. C. Besson, A. Dolfi-Bouteyre, G. Canat, **N. Cézard**, B. Augère, et al., « Doppler LIDAR Developments for Aeronautics. *Aerospace Lab*, Alain Appriou, p. 1-16 (2016).
8. J. Barrientos Barria, A. Dobroc, H. Coudert-Alteirac, M. Raybaut, **N. Cézard**, J.-B. Dherbecourt, T. Schmid, B. Faure, G. Souhaité, J. Pelon, J.-M. Melkonian, A. Godard, and M. Lefebvre, "Simultaneous remote monitoring of atmospheric methane and water vapor using an integrated path DIAL instrument based on a widely tunable optical parametric source," *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* 117(1), 509–518 (2014).
9. A. Dobroc and **N. Cézard**, "Performance assessment and signal processing for range-integrated concentration measurement of gas species using supercontinuum absorption spectroscopy," *Appl. Opt.* 51, 8470-8480 (2012)
10. J. Fade, S. Lefebvre, and **N. Cézard**, "Minimum Description Length approach for unsupervised spectral unmixing of multiple interfering gas species," *Opt. Express* 19, 13862-13872 (2011)
11. **N. Cézard**, A. Dolfi-Bouteyre, J-P. Huignard, and P-H. Flamant, "Performance evaluation of a dual fringe-imaging Michelson interferometer for air parameter measurements with a 355 nm Rayleigh-Mie lidar," *Appl. Opt.* 48, 2321-2332 (2009)
12. **N. Cézard**, C. Besson, A. Dolfi-Bouteyre, L. Lombard, « *Airflow Characterization by Rayleigh-Mie Lidars*, » *AerospaceLab*, 2009, p. 1-4.

2. Publications de proceedings de conférence

1. **N. Cézard**, J. Le Gouët, M. Valla, A. Dolfi-Bouteyre, C. Juery, O. Duclaux, "VEGA: A CH_4 /Wind Coherent Fiber Lidar at 1645 nm for Methane Remote Sensing with Industrial and

- Environmental Applications”, in Proceedings of the European Lidar Conference (to be published) – ELC (2020)
2. **N. Cézard**, J. Dherbecourt, M. Raybaut, and A. Dolfi-Bouteyre, "Development of gas sensing Lidars for industrial and climate issues," in *Optical Sensors and Sensing Congress*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2020), paper LM4A.3.
 3. (Invité) **N. Cézard**, S. Le Méhauté, J. Le Gouet, A. Dolfi-Bouteyre, and C. Besson, "Coherent Fiber Lidar at 1645 nm for simultaneous measurements of methane, wind speed, and aerosols," in *Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C)*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper LM4B.5 (2019)
 4. (Invité) J. B. Dherbecourt, J. M. Melkonian, R. Santagata, J. Armougom, T. Hamoudi, Q. Berthomé, P. Nicolas, C. Blanchard, V. Lebat, N. Tanguy, A. Godard, M. Raybaut, **N. Cézard**, B. Augère, C. Besson, A. Dolfi-Bouteyre, D. Fleury, D. Goular, S. Le Méhauté, J. Le Gouet, C. Planchat, M. Valla, and T. Huet, "DIAL Lidars for safety and security applications," in *Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C)*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper LM2B.2 (2019)
 5. S. Le Méhauté, P. Benoit, **N. Cézard**, D. Goular, C. Planchat, M. Valla, A. Dolfi-Bouteyre, X. Watremez, and H. Delbarre "All-fibered coherent-differential absorption lidar at 1.645 μm for simultaneous methane and wind-speed measurements", Proc. SPIE 10791, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XIV, 1079103 (2018).
 6. (Invité) **N. Cézard**, S. Le Méhauté, P. Benoit, D. Goular, D. Fleury, J. Le Gouët, C. Planchat, M. Valla, A. Dolfi-Bouteyre, X. Watremez, « Fiber-based coherent DIAL/Doppler Lidar at 1645 nm for remote sensing of methane plumes”, in Proc. of 19th Coherent Laser radar Conference, Paper Th10 (2018).
 7. C. Besson, A. Limery, P. Benoit, S. Le Méhauté, and **N. Cézard**, "New developments in active sensing at ONERA," in *Imaging and Applied Optics 2018 (3D, AO, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, LS&C, MATH, pcAOP)*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), paper SM3H.1 (2018)
 8. J. Armougom, J. Melkonian, M. Raybaut, J. Dherbecourt, A. Godard, **N. Cézard**, R. Coetzee, V. Pašiškevičius, and J. Kadlčák, "Standoff Detection of Hazardous Chemicals using a Longwave Infrared Parametric Source," in *Imaging and Applied Optics 2018 (3D, AO, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, LS&C, MATH, pcAOP)*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), paper LTu5C.6 (2018)
 9. **N. Cézard**, A. Liméry, J. Bertrand, S. Le Méhauté, P. Benoit, D. Fleury, D. Goular, C. Planchat, M. Valla, B. Augère, and A. Dolfi-Bouteyre "New lidar challenges for gas hazard management in industrial environments", Proc. SPIE 10429, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XIII, 1042903 (2017).
 10. **N. Cézard**, P. Benoit, G. Canat « 1.6 micron fiber laser source for CH₄ gas leak detection », EPJ Web of Conferences 11911, 05010 (2016)
 11. **N. Cézard**, L. Lombard, J. Le Gouët , D. Goular , A. Bresson , A. Dolfi-Bouteyre , G. Canat, « 1579 nm fiber laser source for spaceborne monitoring of carbon dioxide », EPJ Web of Conferences 11911, 17010 (2016).
 12. P. Benoit, **N. Cézard**, A. Durécu, A. Mussot, A. Kudlinski, and G. Canat "Single-frequency Raman fiber amplifier emitting 11 μJ 150 W peak-power at 1645 nm for remote methane sensing applications", Proc. SPIE 9728, Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications, 97281E (2016).

13. A. Liméry, **N. Cézard**, J. Bertrand, and A. Hauchecorne, "A multi-channel Raman Lidar in photon counting mode using SiPM technology," in *Imaging and Applied Optics 2016*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper LTh1G.4 (2016)
14. P. Benoit, **N. Cézard**, A. Mussot, A. Kudlinski, and G. Canat, "Nonlinear phase added by a Raman fiber amplifier to a single-frequency seed laser," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, OSA Technical Digest (2016) (Optical Society of America, 2016), paper SW4P.4 (2016)
15. C. Besson, B. Augere, G. Canat, **N. Cézard**, A. Dolfi-Bouteyre, D. Fleury, D. Goular, L. Lombard, C. Planchat, W. Renard, and M. Valla "New fiber laser for lidar developments in disaster management", Proc. SPIE 9250, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VIII; and Military Applications in Hyperspectral Imaging and High Spatial Resolution Sensing II, 92500H (2014).
16. **N. Cézard**, G. Canat, A. Dobroc, M. Duhant, W. Renard, and C. Besson, "Fast and wideband supercontinuum absorption spectroscopy in the mid-IR range," in *Imaging and Applied Optics 2014*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper LW4D.4 (2014)
17. J. B. Barria, A. Dobroc, H. Coudert-Alteirac, M. Raybaut, **N. Cézard**, J. Dherbecourt, B. Faure, G. Souhaité, J. Melkonian, A. Godard, M. Lefebvre, and J. Pelon, "3.3 - 3.7 μ m OPO/OPA optical source for multi-species 200m range Integrated Path Differential Absorption Lidar," in *Advanced Solid-State Lasers Congress*, P. McManamon, J. Watson, and O. Steinvall, eds., OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper LTh1B.4 (2013)
18. C. Besson, B. Augère, G. Canat, **N. Cézard**, A. Dolfi-Bouteyre, A. Dobroc, M. Duhant, D. Fleury, D. Goular, L. Lombard, C. Planchat, W. Renard, and M. Valla, "Atmospheric fiber lidars," in *Advanced Solid-State Lasers Congress*, P. McManamon, J. Watson, and O. Steinvall, eds., OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper LTh1B.1 (2013)
19. A. Dobroc and **N. Cézard**, "Signal Processing for Estimation of Gas Species using Supercontinuum Absorption Spectroscopy," in *Lasers, Sources, and Related Photonic Devices*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper LT1B.7 (2012)
20. **N. Cézard**, A. Dobroc, G. Canat, M. Duhant, W. Renard, C. Alhenc-Gelas, S. Lefebvre, and J. Fade "Supercontinuum laser absorption spectroscopy in the mid-infrared range for identification and concentration estimation of a multi-component atmospheric gas mixture", Proc. SPIE 8182, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VII, 81820V (2011).
21. J. Fade, **N. Cézard**. Supercontinuum Lidar absorption spectroscopy for gas detection and concentration estimation. In paper proceedings of *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 25*, Jul 2010, Saint-Petersburg, Russia (2010)
22. A. Hauchecorne, C. Cot, F. Dalaudier, J. Porteneuve, T. Gaudio, R. Wilson, C. Cénac, C. Laqui, P. Keckhut, J-M. Perrin, A. Dolfi, **N. Cézard**, L. Lombard, C. Besson, « Set-up of a ground-based Rayleigh Lidar to detect Clear Air Turbulences », In paper proceedings of *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 25*, Saint-Petersburg, Russia (2010)
23. **N. Cézard**, A.Dolfi-Bouteyre, J.P.Huignard, P.H.Flamant "Potential of the Michelson Interferometer fringe-imaging technique for Rayleigh-Mie spectral analysis", In paper proceedings of *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 24*, Boulder, USA (2008)
24. **N. Cézard**, A. Dolfi-Bouteyre, J-P. Huignard, and P-H. Flamant "Development of a short-range 355-nm Rayleigh-Mie lidar using a Michelson interferometer for wind speed measurements", Proc. SPIE 6750, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing III, 675008 (2007).

25. **N. Cézard**, A. Dolfi-Bouteyre, J.P. Huignard, P.H. Flamant, "A 355-nm Rayleigh-Mie lidar using two Michelson Interferometers as spectral analyzers for multi-purpose Near-field Measurements", In paper proceedings of *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 23*, Nara, Japan (2006)

3. Communications en conférence sans publication des proceedings

26. **N. Cézard**, S. Le Méhauté, P. Benoit, D. Fleury, D. Goular, J. Le Gouet, C. Planchat, A. Dolfi-Bouteyre, X. Watremez, « All-fiber DIAL/Doppler lidar at 1.65 micron for remote detection of methane leaks », *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 29*, Hefei, China (2019)
27. B. Augère, **N. Cézard**, A. Dolfi-Bouteyre, A. Durécu, D. Fleury, D. Goular, F. Gustave, C. Planchat, M. Valla, « Airborne wind vector measurements with the fibered coherent Doppler lidar LIVE », *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 29*, Hefei, China (2019)
28. A. Limery, **N. Cézard**, D. Fleury, D. Goular, C. Planchat, J. Bertrand, A. Hauchecorne, "Simultaneous hydrogen and water vapor measurement by Raman Lidar for future monitoring of radioactive waste disposal cells", *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 28*, Bucarest, Romania (2017)
29. P. Benoit, G. Canat, **N. Cézard**, A. Mussot, A. Kudlinski. Laser raman impulsif pour la mesure du méthane à 1645 nm. *34ème Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG 2014)*, Oct 2014, NICE, France (2014)
30. J. Fade, **N. Cézard**, S. Lefebvre, "Méthode non supervisée d'identification de composés gazeux pour la spectroscopie d'absorption", *Horizons de l'Optique*, Marseille (2011).

4. Présentations orales en conférences et workshops

Sont indiquées ici les communications orales effectivement réalisées (certaines communications en 1^{er} auteur ayant parfois été présentées par d'autres personnes, et inversement, certaines communications orales ayant été faites à la place du 1^{er} auteur)

31. (Invité) « Lidar activities at ONERA's Optics Department: applications to wind and gas sensing », Workshop ALTER-ETSIT on LIDAR Technology and Applications, virtual workshop organized by Madrid Polytechnical University (2020)
32. "Airborne wind vector measurements with the fibered coherent Doppler lidar LIVE", *International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 29*, Hefei, China (2019)
33. (Invité) "Fiber-based coherent DIAL/Doppler Lidar at 1645 nm for remote sensing of methane plumes", *Coherent Laser radar Conference CLRC 19*, Okinawa, Japan (2018)
34. "New lidar challenges for gas hazard management in industrial environments", *SPIE Remote Sensing Europe*, Warsaw, Poland (2017)
35. « Fast and wideband supercontinuum absorption spectroscopy in the mid-IR range », *LACSEA Conference*, Seattle, USA (2014)
36. « Supercontinuum laser absorption spectroscopy in the mid-infrared range for identification and concentration estimation of a multi-component atmospheric gas mixture », *SPIE Remote Sensing Europe*, Praha, Czech Republic, (2011)

37. "Potential of the Michelson Interferometer fringe-imaging technique for Rayleigh-Mie spectral analysis", International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 24, Boulder, USA (2008)
38. « Development of a short-range 355-nm Rayleigh-Mie lidar using a Michelson interferometer for wind speed measurements", SPIE Remote Sensing, Firenze, Italy, (2007).
39. "A 355-nm Rayleigh-Mie lidar using two Michelson Interferometers as spectral analyzers for multi-purpose Near-field Measurements", International Laser and Remote-sensing Conference ILRC 23, Nara, Japan (2006)

5. Thèse de 3eme cycle

40. **N. Cézard**, « Etude de faisabilité d'un lidar Rayleigh-Mie pour la mesure à courte distance de la vitesse de l'air, de sa température, et de sa densité », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique (2008)

6. Brevets

41. P.Hébert, F.Lemaitre, **N. Cézard**, « Lidar for heterodyne detection by a local oscillator and a dual probing beam, at one or several frequency(ies), and lidar detection method by dual heterodyning detection », US20190383940A1, (pending patent)

7. Enveloppes Soleau

42. **N. Cézard**, G. Canat, « Adaptation des formes spectrales et temporelles d'impulsions laser pour des applications Lidar à fonction duale IPDA - télémétrie en technologie laser fibré », INPI 2479 (2012)
43. **N. Cézard**, « Système de détection de gaz par couplage d'une caméra infrarouge passive et d'une source laser supercontinuum », INPI 2399 (2010)
44. **N. Cézard**, « Lidar anémométrique Rayleigh-Mie à interféromètre Mach-Zehnder fibré », INPI 2357 (2010)
45. **N. Cézard**, A. Dolfi-Bouteyre, J-P. Huignard, P. Feneyrou, « Double interféromètre de Michelson à champ compensé pour la mesure de paramètres atmosphériques », E-repository Marks & Clerk, ref 250529 (2006)

Annexe 2 - Curriculum Vitae

1. Titres universitaires

- 2008 Docteur en Sciences Physique de l'Ecole Polytechnique (X-Palaiseau).
Soutenance le 16 Mai 2008 – Mention très honorable
- 2004 Master de Recherche Optique et Radiofréquences de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) – Mention Très Bien
- 2003 Diplôme d'Ingénieur en Génie Physique de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA), à Toulouse

2. Expériences professionnelles de recherche

- 2007/20 Ingénieur-chercheur à l'ONERA dans l'unité SLS du DOTA
En charge d'études et recherches en conception de systèmes optroniques, en particulier des lidars pour la caractérisation des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère
- 2008 Ingénieur Junior 2
 - 2012 Ingénieur Sénior 1
 - 2018 Ingénieur Sénior 2
 - 2020 Maître de Recherche 1
- 2004-07 Thèse de Doctorat en convention CIFRE, entre la société Thales R&T (TRT), le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), et le Département d'Optique Théorique et Appliquée (DOTA) de l'ONERA
Sujet : *Etude de faisabilité d'un lidar Rayleigh-Mie pour la mesure à courte distance de la vitesse de l'air, de sa température, et de sa densité*
Direction : J.P. Huignard (TRT), P. Flamant (LMD), A. Dolfi-Bouteyre (ONERA)
- 2004 Stage de Master 2 à l'ONERA, dans l'unité SLS du DOTA
Sujet : *Etude de discriminateurs optiques de fréquence Doppler pour lidars Rayleigh*
Direction : Agnès Dolfi-Bouteyre
- 2003 Stage Ingénieur de fin d'études à CILAS (Compagnie Industrielle des Lasers)
Sujet : *Réalisation et test de lasers impulsions dans l'infrarouge*
Direction : Bruno Crépy
- 2003 Année de spécialisation en optique - Université Laval de Québec, Canada
Participation à un projet de recherche au Centre d'Optique, Photonique et Laser
Sujet : *Mesures d'impulsions laser à l'aide d'un autocorrélateur optique fonctionnant par absorption à deux photons autour de 1500 nm*
Direction : Réal Vallée
- 2002 Stage Ingénieur au Laboratoire de Spectrométrie Physique (LSP) à Grenoble
Sujet : *Caractérisation de matériaux pour l'optique non linéaire*
Direction : Patricia Segonds et Benoit Boulanger

3. Enseignements et dissémination scientifique

- 2020 Création du « Club Lidar » au sein de la Société Française d'Optique (SFO). Ce club vise à rassembler les acteurs nationaux du domaine, dans le but i) de promouvoir les activités de développement et d'exploitation de systèmes lidars en France, ii) de pérenniser et faciliter l'organisation de colloques nationaux, et iii) de contribuer à la formation des jeunes chercheurs du domaine. Fin 2020, le club est en cours de construction, et ses travaux débiteront en 2021.
- 2019 Co-organisateur avec L. Lombard, L. Croizé et M. Raybaut de deux journées thématiques sur le « Sondage atmosphérique par techniques optiques actives et passives ». Prévu en décembre 2019, cet évènement a dû être repoussé au dernier moment à une date ultérieure en raison des grèves de fin 2019. Puis il a été annulé en 2020 en raison de la crise du Covid19.
- 2017 Co-organisateur avec L. Lombard, M. Raybaut et F. Gibert de la première Journée Nationale Lidars (05/12/2017,) séminaire qui a rassemblé les principaux acteurs nationaux, académiques et industriels, développeurs ou utilisateurs de lidars.
- 2014/16 Enseignement en cours de Master 2 à Polytech Paris Sud, Université de Paris-Saclay. Titre : « Introduction aux Systèmes Lidars », Volume d'enseignement : 9h/an. Ce cours est issu d'une base antérieure à laquelle j'ai ajouté une grande part d'apports personnels (fascicule de 200 planches). Après 2016, j'ai confié cet enseignement et mon support de cours à un doctorant, puis à un collègue récemment embauché, afin qu'ils puissent s'auto-former par l'enseignement, en parallèle de la formation des étudiants. L'activité d'enseignement perdure aujourd'hui.
- 2014 Assistance technique au dimensionnement d'un TP de lidar cohérent vélocimétrique auprès de l'équipe enseignante de Polytech Paris Sud. Responsable de l'équipe pédagogique : René Farcy
- 2002 Mise au point du TP « Filtrage spatial par diffraction. Détramage et strioscopie » à l'Université Grenoble-Alpes. Responsable de l'équipe pédagogique : Sylvie Zanier

4. Activités liées à la recherche

a. *Comités et expertise*

- En 2020 Porteur du projet de création du Club Lidar à la SFO. Responsable de la formation du premier comité exécutif du Club et de son animation.
- En 2020 Membre et représentant de l'ONERA au sein de l'équipe franco-allemande en charge de la CDR (Critical Design Review) du lidar satellite MERLIN
- Depuis 2018 Membre invité par le CNES au *Working Group France* pour le suivi scientifique du développement du lidar satellite MERLIN (plusieurs réunions/an)
- Depuis 2017 Membre Contributeur au groupe « *Lidars for Greenhouse Gas detection* » de l'ESRE (European Space Research Establishments)

2017	Expertise de projet scientifique dans le cadre de l'appel à projets IRS 2017 de l'IDEX Communauté Université Grenoble Alpes
2012-14	Membre et représentant de l'ONERA au « Groupement de Laboratoires » organisés par l'Andra, sur la thématique « Méthode de mesure des émanations de dihydrogène »
2011	Membre Contributeur du « comité d'audit Lidar » des laboratoires de l'INSU
Depuis 2010	Reviewer pour différentes revues : Applied Optics, Applied Physics B, Journal of Applied Remote Sensing, Applied Spectroscopy, Journal of Optics and Laser Technology, Atmospheric Measurement Techniques

b. Participation à des jurys de thèse

- **Simon Le Méhauté**, *Etude et réalisation d'un Lidar DIAL cohérent fibré pour la mesure simultanée de la vitesse du vent et de la concentration de méthane*, Thèse de l'Université du Littoral Côte d'Opale, soutenue le 19 Juin 2020
- **Anasthase Limery**, *Étude et réalisation d'un lidar Raman pour la détection d'hydrogène et de vapeur d'eau dans une alvéole de stockage de colis radioactifs*, Thèse de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, soutenue le 27 Mars 2018
- **Alexandre Dobroc**, *Etude et réalisation de dispositifs optiques à large couverture spectrale pour la détection multi-gaz à distance*, Thèse de l'École Polytechnique, soutenue le 18 décembre 2013

c. Administration liée à la recherche

- **Chef de Projet CALISTO** (2010-2017), collaboration ONERA-ANDRA-UVSQ visant la pré-étude (2010) puis l'étude et réalisation d'un lidar Raman pour la télédétection du dihydrogène (2013-2017, 3 ingénieurs et un doctorant impliqués à l'ONERA sur 4 ans)
- **Chef de Projet VEGA** (2014-2019) dans le cadre du PRI NAOMI (ONERA-TOTAL). Responsable du dimensionnement et développement du lidar CH₄/Doppler VEGA (8 ingénieurs et 2 doctorants impliqués à l'ONERA sur 6 ans). Responsable de deux campagnes de mesures en 2017 et 2019
- **Projet de Recherche Fédérateur ONERA TELEMAC** (2020-2023) : Responsable du Work Package « Télédétection des gaz atmosphériques par lidars fibrés », qui mobilisera au moins 9 ingénieurs ONERA, et plusieurs doctorants et stagiaires sur une durée de 4 ans.
- **Responsable d'Etude SARA** (SAGEM, 2009) pour la détection à distance de rafales de vent en environnement embarqué
- **Co-responsable d'Etude des R&T CNES LIFIGASE-1/2** (2017-2021) avec L. Lombard
- Responsable du lancement de **cinq thèses**. Forte implication dans la formation et orientation de doctorants, stagiaires, et de collaborateurs Onera sur mes thématiques de recherche.

5. Encadrement

a. Encadrement de thèses

- **William Patino** - *Lidar à mini-peigne de fréquence pour la télédétection du CO₂ atmosphérique*, démarrée en Novembre 2020. Directeur et encadrant principal : Nicolas Cézard (par autorisation dérogatoire de l'école Doctorale SDU2E pour l'année 2020-21). Contribution personnelle au co-encadrement : 90%
- **Julien Lahyani** - *Lidar 2 μ m à source hybride fibré/solide pour la télédétection du CO₂ atmosphérique*, démarrée en Octobre 2018. Directeur de thèse J.M. Hartmann (LMD), Encadrants principaux N. Cézard, J. Le Gouët et F. Gibert. Contribution personnelle au co-encadrement : 33%
- **Simon Le Méhauté** - *Etude et réalisation d'un Lidar DIAL cohérent fibré pour la mesure simultanée de la vitesse du vent et de la concentration de méthane*, Thèse de doctorat de l'Université du Littoral Cote d'Opale, soutenue le 19 Juin 2020. Directeur de thèse H. Delbarre (LPCA), Encadrant principal N. Cézard, Contribution personnelle au co-encadrement : 90%
- **Anasthase Limery** - *Étude et réalisation d'un lidar Raman pour la détection d'hydrogène et de vapeur d'eau dans une alvéole de stockage de colis radioactifs*. Thèse de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, soutenue le 27 Mars 2018. Directeur de thèse A. Hauchecorne (LATMOS). Encadrant principal N. Cézard, Contribution personnelle au co-encadrement : 90%
- **Philippe Benoit** - *Conception et réalisation d'un amplificateur Raman fibré mono-fréquence à 1645 nm pour la mesure de méthane par LIDAR*. Thèse de l'Université de Lille 1, soutenue le 12 mai 2017. Directeur de thèse A.Mussot, Encadrant principal G.Canat, Contribution personnelle au co-encadrement : 10%
- **Alexandre Dobroc**, *Etude et réalisation de dispositifs optiques à large couverture spectrale pour la détection multi-gaz à distance*. Thèse de l'Ecole Polytechnique, soutenue le 18 décembre 2013. Directeur de thèse : M. Lefebvre, Encadrant principal : N. Cézard, Contribution au co-encadrement : 90%
- **Mathieu Duhant** – *Etudes des sources supercontinuum à fibres transparentes dans le moyen infrarouge*, Thèse de l'Université de Bourgogne, soutenue le 12 octobre 2012. Directeur de thèse F. Smektala, Encadrant principal : G. Canat, Contribution au co-encadrement : 10%

b. Encadrement de Post-doc et contrats en CDD

- **Julien Fade** (2010) - Lidar DIAL multi-espèces à supercontinuum et traitement de signal associé, Encadrant principal : N. Cézard, Contribution au co-encadrement : 90%
- **Philippe Benoit** (2018) – Intégration d'une source fibrée à 1645 nm au sein d'un système lidar DIAL/Doppler pour la télédétection du méthane et du vent. Encadrants principaux : N.Cézard et J.Le Gouët. Contribution au co-encadrement : 50%

c. Encadrements de stages Ingénieur et stages de master

- **William Patiño** (2020) – Institut d'Optique Graduate School – stage de Master (100% d'encadrement)

- **Francis Mauboussin** (2019) – Polytech Paris Sud – stage de Master (Encadrant principal Laurent Lombard, 30% de co-encadrement)
- **Léna Waszczuk** (2018) – ESPCI – stage Ingénieur (Encadrant principal Béatrice Augère, 25% de co-encadrement)
- **Julien Lahyani** (2018) – Polytech Paris Sud – stage de Master (Encadrant principal Laurent Lombard, 30% co-encadrement)
- **Pedro Baraçal de Mêce** (2015) - Institut d'Optique Graduate School – stage de Master (100% d'encadrement)
- **Mouna Petitjean** (2014) – Université Paris 7 – stage de Master Télédétection - (Encadrant principal Karine Caillaut, 50% de co-encadrement)
- **Clément Arlotti** (2014) – Université de Rennes – stage de Master Photonique (100% d'encadrement)
- **Sébastien Vanhelst** (2009) – Ensicaen – stage de Master, 100% d'encadrement

Systemes LIDAR pour la caracterisation à distance des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère

La caracterisation des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère est une nécessité pour bon nombre des missions de recherches de l'ONERA, dans les domaines de la Défense, de l'Aéronautique, de l'Espace, et de l'Environnement. Pour cela, la technique LIDAR (Light Detection and Ranging) dispose d'un potentiel remarquable. Il s'agit d'une technique de télédétection analogue au RADAR, mais adaptée au domaine optique, et donc basée sur une émission laser. La longueur d'onde émise étant très petite (<20 µm), elle est capable d'interagir avec les molécules de gaz et les aérosols atmosphériques. En captant la très faible fraction de lumière rétrodiffusée, il est possible d'accéder, par divers procédés, à un grand nombre de propriétés de l'atmosphère, comme la vitesse du vent, la température de l'air, sa densité, ou encore la nature et concentration des gaz et aérosols en présence.

Au cours de cette soutenance HDR, je présenterai différents travaux de recherche sur les lidars atmosphériques, que j'ai pu mener au Département d'Optique et Technique Associées (DOTA) de l'Onera, depuis 2004. La présentation abordera trois domaines scientifiques principaux (optique atmosphérique, technologies optroniques, et traitement de l'information), et illustrera plusieurs avancées obtenues, en particulier dans les domaines de la mesure de vent et d'espèces moléculaires d'importance majeures (CH₄, CO₂, H₂...). J'exposerai également les perspectives futures de mes travaux de recherche.

Mots-clés :

LIDAR ; ATMOSPHERE ; LASER

Lidar systems for remote sensing of physical and chemical atmospheric properties

Characterizing physical and chemical properties of the atmosphere is of paramount importance for many research missions at ONERA, especially for Defense, Aeronautics, Space, and Environment studies. The LIDAR technique (Light Detection and Ranging) offers remarkable potential for that purpose. This remote sensing technique is similar to RADAR, but it is based on laser emitters in the optical frequency domain. It can therefore interact with very small objects, such as gas molecules and atmospheric aerosols. Capturing the faint signal backscattered by those tracers, it is possible to measure many physical and chemical atmospheric properties, such as wind speed, temperature, density, as well as the nature and concentration of gas species and aerosols.

In this document, I present research activities that I have conducted on atmospheric Lidar systems at ONERA's Optics Departement (DOTA), since 2004. The document focuses on three major scientific domains (atmospheric optics, optronic technologies, signal processing), and showcases several results obtained during my research, especially concerning wind speed and chemical species remote sensing (CH₄, CO₂, H₂...).

Keywords :

LIDAR ; ATMOSPHERE ; LASER

