



Observer les gaz à effet de serre par lidar

Nicolas Cézard, Myriam Raybaut, Laurent Lombard, Jean-Baptiste Dherbecourt

► To cite this version:

Nicolas Cézard, Myriam Raybaut, Laurent Lombard, Jean-Baptiste Dherbecourt. Observer les gaz à effet de serre par lidar. La Lettre AAAF, 2021, 46, pp.45-48. <hal-03162249>

HAL Id: hal-03162249

<https://hal.science/hal-03162249v1>

Submitted on 8 Mar 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.



HAL Authorization

Observer les gaz à effet de serre par lidar

par Nicolas Cézard, Myriam Raybaut, Laurent Lombard et Jean-Baptiste Dherbecourt, ONERA

INTRODUCTION

Le phénomène de réchauffement climatique est directement induit par l'augmentation dans l'atmosphère de la concentration des gaz à effet de serre (GES), en tête desquels le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4). D'après les derniers chiffres de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), la concentration en CO_2 dans l'atmosphère a augmenté de 48% entre 1750 et 2020, passant de 278 ppm à 410 ppm (parties par million). Et le méthane fait encore « mieux », si l'on peut dire. Sa concentration atteint désormais 1877 ppb (partie par milliard), ce qui représente une hausse de +160% par rapport à son niveau de plateau préindustriel (722 ppb en 1750). L'OMM rappelle également que le dioxyde de carbone et le méthane sont responsables à eux seuls de plus de 80% du forçage radiatif mondial (voir Figure 1) depuis l'époque préindustrielle.

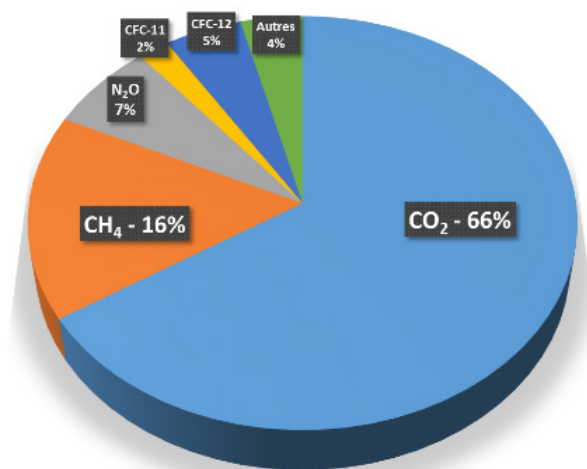


Figure 1 : Contributions des principaux GES persistants à l'augmentation du forçage radiatif mondial depuis l'époque préindustrielle, jusqu'en 2019 – d'après [1].

En Europe, la grande majorité des émissions de GES est liée à l'utilisation de l'énergie, dans tous les secteurs : production énergétique, transport, industrie, chauffage résidentiel, agriculture, stockage des déchets. Les sources de GES sont donc partout : dans nos villes et nos maisons, dans nos champs, nos étables, dans nos voitures, nos bateaux, nos avions, dans nos usines, et jusque dans nos décharges publiques. Partout, il faut tenter de « traquer » les émissions de GES, ce qui signifie les détecter et les quantifier, afin de pouvoir intervenir

de manière appropriée et réduire les émissions. En parallèle, une surveillance de la concentration des GES à l'échelle planétaire, depuis un satellite, est une nécessité pour mesurer les flux régionaux de GES, en termes de puits et sources, sur l'ensemble du globe. Observation locale et observation globale des GES dans l'atmosphère sont ainsi des objectifs à poursuivre simultanément.

PRINCIPE DU LIDAR POUR LA DÉTECTION DES GES

L'un des outils d'observation les plus appropriés pour la détection et la mesure à distance des GES atmosphériques est le LIDAR (Light Detection and Ranging). Cette technique, analogue au Radar mais fonctionnant dans le domaine des fréquences optiques, comprend un émetteur, générant des impulsions laser se propageant le long d'un faisceau très directif dans une direction d'observation donnée (voir Figure 2), et un récepteur optique de haute sensibilité, chargé de collecter le rayonnement, extrêmement faible, rétrodiffusé par les poussières en suspension dans l'atmosphère (aussi appelés aérosols).

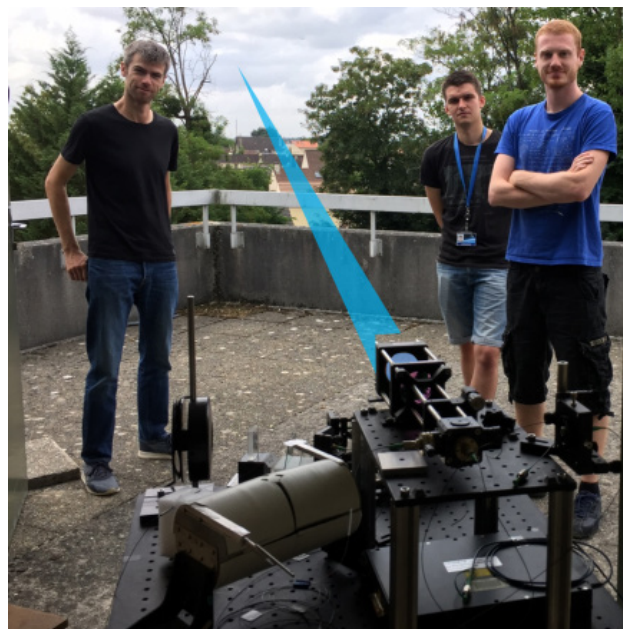


Figure 2 : Dispositif d'émission/réception du Lidar VEGA dédié à l'observation du méthane. Le faisceau, matérialisé ici pour l'illustration, est invisible et à sécurité oculaire dans la réalité. De gauche à droite, Nicolas Cézard, Simon Le Méhauté, et Philippe Benoit (ONERA, 2017).

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

OBSERVER LES GAZ À EFFET DE SERRE PAR LIDAR

En chronométrant le temps mis par la lumière pour effectuer l'aller-retour entre le laser et les aérosols diffusants, il est possible, d'une part, d'établir une correspondance entre l'instant de réception du signal et la distance des aérosols à l'origine du signal diffusé. Ceci permet à un LIDAR d'effectuer des mesures dites « résolues spatialement » (voir Figure 3).

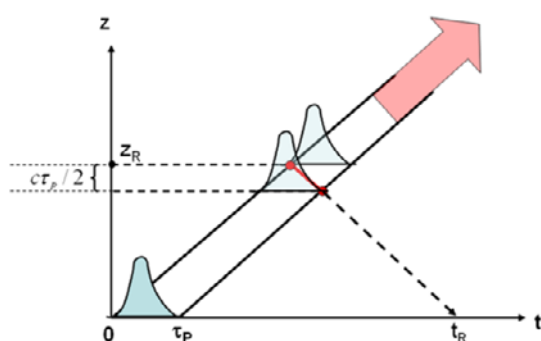


Figure 3 : Diagramme d'émission « espace-temps » d'un LIDAR. Une impulsion est émise dans l'intervalle de temps $[0, \tau_P]$ et un signal lidar est détecté à l'instant t_R . Ce signal provient d'un segment d'atmosphère de longueur $\Delta z = c\tau_P/2$ (résolution du lidar), localisé à la distance $z_R = ct_R/2$ (capacité télémétrique).

D'autre part, il est possible de détecter et quantifier par LIDAR la concentration de certaines espèces de gaz atmosphériques, en exploitant leurs propriétés spectroscopiques, c'est-à-dire leur capacité à absorber de la lumière à certaines fréquences (ou longueurs d'ondes) bien précises. C'est le principe du lidar DIAL (Differential Absorption Lidar), illustré Figure 4. L'émetteur doit alors générer des impulsions lasers à des fréquences dites ON

(absorbées par le gaz cible) et OFF (non absorbées). Le signal lidar rétrodiffusé à la fréquence ON est alors plus rapidement atténué que le signal OFF, au moment où il rencontre le gaz cible.

Les propriétés spectroscopiques des gaz imposent donc de réaliser des émetteurs laser fonctionnant à des longueurs d'ondes très précises. Le tableau indique quels sont les domaines de longueurs d'onde les plus adaptés pour la détection à longue distance du dioxyde de carbone, du méthane, et de la vapeur d'eau. La vapeur d'eau, principal fluide caloporteur dans l'atmosphère, entre en effet également dans la catégorie des GES, et bien que la gestion de ses émissions ne soit pas aussi problématique que pour le CO_2 et le CH_4 , il est tout aussi important d'en suivre la dynamique atmosphérique.

CO_2	CH_4	H_2O
1.57 μm	1.65 μm	0.93 μm , 1.53 μm
2.05 μm	2.30 μm	1.98 μm

Bandes de fréquences les plus couramment utilisées pour la mesure à longue distance des GES par LIDAR.

Outre leurs longueurs d'ondes d'émission, les systèmes lidars doivent également satisfaire de nombreuses exigences techniques, en fonction du besoin : énergie et durée des impulsions émises, cadence de répétition, qualité spectrale et spatiale du faisceau délivré, polarisation, sensibilité de détection, compacité, robustesse thermomécanique, traitement rapide des données, etc.

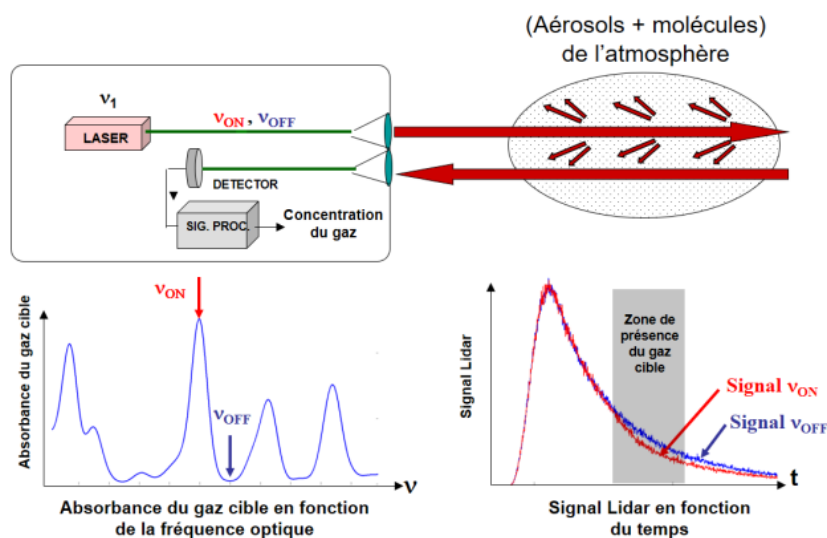


Figure 4 : Principe du lidar DIAL. La vitesse différentielle de décroissance du signal lidar aux longueurs d'onde ON et OFF est l'indicateur de la présence du gaz et de sa concentration.

LES LIDARS ONERA POUR LA DÉTECTION DES GES

Au fil de plusieurs décennies de recherches, l'ONERA a développé une expertise reconnue internationalement dans le domaine des lidars. Sur le seul sujet des lidars pour la détection des GES, une vaste « panoplie » de démonstrateurs innovants a progressivement vu le jour [2] depuis environ 2010, basés sur plusieurs technologies laser différentes (voir l'encart page 48).

Par exemple, dans le cadre d'un partenariat recherche-industrie entre l'ONERA et la société Total, deux lidars ont été développés (2013-2018), permettant des mesures de fuites de gaz en milieu industriel. Le lidar VEGA (voir Figure 2), basé sur une source laser fibrée à 1,65 μm , permet une mesure conjointe du vent et du CH_4 , tandis que le lidar GAZL (voir Figure 5), basé sur une source laser paramétrique, permet de mesurer le CH_4 à 1,65 μm et le CO_2 à 1,57 μm .



Figure 5 : Lidar GAZL déployé sur le terrain lors d'une campagne de mesure en 2018 (à gauche) et visualisation d'une mesure de panache d'un rejet contrôlé de méthane pour tester le dispositif (à droite), avec en abscisse le temps et en ordonnée la distance par rapport au lidar ; la concentration en méthane sur l'axe de visée en fonction de la distance est indiquée en couleurs (DPHY, 2018).

Dans la bande de fréquence située autour de 2 μm , qui peut être avantageuse pour certaines applications, d'autres développements sont en cours. Le projet

LEMON, financé par l'Union européenne et coordonné par l'ONERA, vise au développement d'un instrument sol et aéroporté pour la mesure multi-espèces du CO_2 et de la vapeur d'eau atmosphériques [3]. Il vise aussi à la montée en TRL (Technological Readiness Level) des sources paramétriques pour la détection future des GES depuis un satellite. Il s'agit de démontrer que le laser peut satisfaire les propriétés spectrales, énergétiques, et temporelles spécifiques à ces mesures spatiales. Il s'agit aussi, dans la continuité du projet GENUIN au profit de l'ESA (European Space Agency), de vérifier la tenue en environnement spatial (radiatif, vibratoire, thermique) des sous-systèmes clés. Le lidar WAVIL, développé en collaboration entre l'ONERA et le CNRS/LATMOS, sera quant à lui dédié principalement à la mesure de la vapeur d'eau et de son isotope HDO, afin de faire progresser les connaissances sur le cycle de l'eau à des échelles pertinentes pour la météorologie et le climat [4].

Utilisant une technologie laser alternative, dite hybride (c'est-à-dire basée sur des étages d'amplification fibrée puis cristalline), le lidar HELENA est également en cours de développement, pour la mesure du CO_2 et du vent à 2 μm , avec là aussi des perspectives d'applications aéroportées et spatiales.

Enfin, de nouvelles technologies, de TRL moins élevés, sont en cours d'expérimentation afin de faire gagner en performances les lidars de demain. C'est par exemple le cas de l'utilisation des peignes de fréquences pour la spectroscopie des GES par lidar, sujet d'actualité qui fait l'objet de thèses depuis quelques années à l'ONERA.

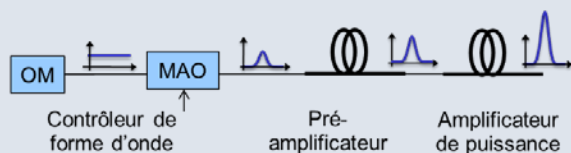
RÉFÉRENCES

- Bulletin sur les gaz à effet de serre – N°16: Bilan des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère, d'après les observations effectuées à l'échelle du globe en 2019 (<https://library.wmo.int/>)
- 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. <https://lemon-dial-project.eu/>
- J. Hamperl et al. "WaVIL: a Differential Absorption LIDAR for Water Vapor and Isotope HDO Observation in the Lower Troposphere – Instrument Design," in *Optical Sensors and Sensing Congress, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2020)*, paper LM4A.4.

QUELLES SOURCES POUR LES LIDARS DE DÉTECTION DES GES ?

Les sources laser développées à l'ONERA pour la détection de GES sont de deux types : les sources laser à fibre et les sources laser paramétriques. Ces sources sont bien adaptées à la génération d'impulsions alternativement ON et OFF dont les longueurs d'onde dépendent du gaz étudié.

Les sources laser à fibre développées à l'ONERA sont en général basées sur l'architecture MOPFA (voir Figure). Un oscillateur maître (OM) émet en continu un signal laser à la longueur d'onde ON ou OFF. Il est découpé en impulsions de fréquence et de durée contrôlables par un modulateur acousto-optique (MAO). Les impulsions sont amplifiées dans un ou plusieurs amplificateurs à fibre jusqu'à un niveau limité par les effets non linéaires dans la fibre (dont le diamètre de cœur est généralement de l'ordre de 10 μm). Pour aller au-delà de cette limite de puissance, l'ONERA développe différentes techniques d'amplification.

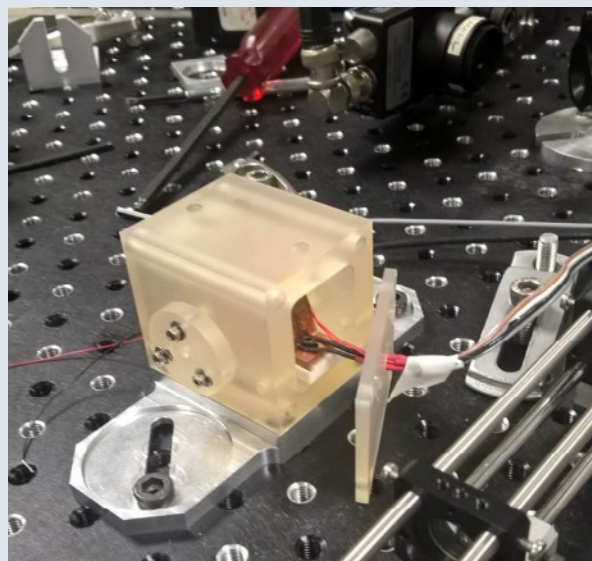


Architecture MOPFA (master oscillator - power fiber amplifier). OM : oscillateur maître, MAO : modulateur acousto-optique.

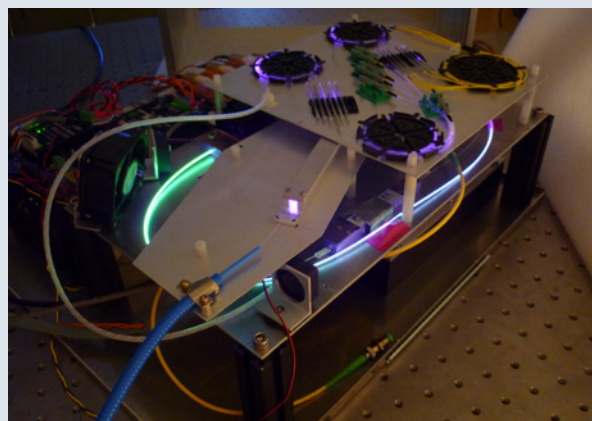
Le domaine de longueurs d'onde accessible en technologie fibrée est gouverné par les dopants insérés dans les fibres, à savoir 1,03-1,1 μm pour l'ytterbium, 1,4-1,6 μm pour l'erbium et 1,9-2,2 μm pour le thulium et l'holmium. Dans certains cas, il est possible d'exploiter des effets non linéaires, comme l'effet Raman, pour étendre la plage spectrale de fonctionnement. L'architecture fibrée est très versatile, compacte, efficace, robuste aux variations de température et aux vibrations. Elle est bien adaptée à des lidars destinés à être embarqués ou déployés sur le terrain.

Les sources paramétriques permettent la conversion efficace d'une onde laser de pompe vers des ondes filles. Leur principal intérêt est de pouvoir considérer des longueurs d'ondes inaccessibles par d'autres technologies, et de pouvoir accorder ces longueurs d'ondes

sur une plage permettant d'intéresser plusieurs espèces chimiques. C'est la solution source retenue par exemple pour la mesure du CH_4 pour la mission spatiale franco-allemande MERLIN, première mission spatiale pour la mesure lidar d'un gaz à effet de serre, qui sera lancée dans quelques années. À l'ONERA, les travaux portent sur des sources paramétriques de nouvelle génération très compactes et accordables. ■



Oscillateur Paramétrique Optique développé à l'ONERA dans le cadre du projet ESA GENUIN. La source est en Zérodur, matériau permettant une très bonne stabilité thermo-mécanique, et a démontré un très haut potentiel de tenue en environnement vibratoire pour les applications spatiales (DPHY – 2018).



Source fibrée forte puissance crête ONERA BOFIX