



**HAL**  
open science

## Le Laboratoire d'optique atmosphérique (LOA)

Philippe Dubuisson, Celine Cornet, Philippe Goloub, Isabelle Chiapello,  
Olivier Pujol

► **To cite this version:**

Philippe Dubuisson, Celine Cornet, Philippe Goloub, Isabelle Chiapello, Olivier Pujol. Le Laboratoire d'optique atmosphérique (LOA). La Météorologie, 2021, La Météorologie, pp.047. 10.37053/lameteorologie-2021-0068 . hal-04548701

**HAL Id: hal-04548701**

**<https://hal.univ-lille.fr/hal-04548701>**

Submitted on 17 Apr 2024

**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.

# Le Laboratoire d'optique atmosphérique (LOA)

**Philippe Dubuisson, Céline Cornet, Philippe Goloub, Isabelle Chiapello, Olivier Pujol**

Laboratoire d'optique atmosphérique, Université de Lille / CNRS, Villeneuve d'Ascq

philippe.dubuisson@univ-lille.fr

**E**n créant une petite équipe de recherche, Jacqueline Lenoble, nommée en 1961 professeure à l'université de Lille, n'imaginait sans doute pas qu'elle fêterait en 2012 les 50 ans du LOA (figure 1), laboratoire actuellement reconnu tant au niveau national qu'international. Dès sa création, le LOA s'est consacré à l'étude du transfert radiatif dans les atmosphères planétaires, avec deux aspects essentiels : le rayonnement en tant que source d'énergie pour les systèmes atmosphériques et comme source privilégiée d'information sur l'atmosphère et la surface de la planète. Situé à l'origine à la faculté des sciences de Lille autour de quelques chercheurs, le LOA s'est implanté en 1967 sur le campus de l'université de Lille 1 à Villeneuve d'Ascq.

Le laboratoire compte aujourd'hui près de 70 personnes, dont 40 personnels permanents, le complément étant constitué de doctorants,

post-doctorants ou personnels sous contrat. Les thèmes de recherche portent sur l'étude et la surveillance des composants de l'atmosphère terrestre, principalement les nuages et les aérosols, qu'ils soient d'origine anthropique (particules de pollution urbaine, feux de biomasse, etc.) ou naturelle (poussières désertiques, aérosols volcaniques ou marins, etc.), ainsi que certains gaz (ozone, vapeur d'eau, dioxyde de soufre, etc.). Dans un contexte environnemental largement influencé par les activités humaines, les objectifs des recherches portent sur la détermination de la répartition spatio-temporelle des nuages, des aérosols et de certains de leurs précurseurs gazeux, la caractérisation de leurs propriétés microphysiques (taille, forme), chimiques, hygroscopiques, optiques et radiatives, afin d'en déduire leur impact sur le rayonnement atmosphérique et le bilan radiatif de l'atmosphère. En effet, les nuages, aérosols et gaz interagissent avec les rayonnements

solaire et tellurique (infrarouge thermique) et jouent ainsi un rôle majeur dans le bilan énergétique de la Terre. L'étude des variations du climat nécessite donc de connaître les propriétés de ces différents composants atmosphériques et de mieux comprendre la complexité de leurs interactions avec le rayonnement. Ces connaissances sont également requises pour surveiller, modéliser et améliorer la prévision d'événements atmosphériques pouvant influencer les activités humaines, tels que des épisodes de forte pollution ou le développement de nuages convectifs à l'origine de précipitations intenses.

Pour répondre à ces différents objectifs, le LOA rassemble des compétences sur l'observation de l'atmosphère (depuis le sol, l'espace ou d'avion), l'inversion des mesures de télédétection pour caractériser les milieux et l'étude de la propagation du rayonnement dans l'atmosphère. En complément



Figure 1. Le 29 juin 2012, des membres anciens et actuels du LOA se retrouvaient sur le campus de l'université de Lille autour de Jacqueline Lenoble, professeure émérite (debout, sur la droite), afin de fêter les 50 ans du Laboratoire.

de cette expertise historique, l'activité récente du LOA se tourne vers l'utilisation de modèles atmosphériques permettant de décrire le cycle des aérosols et des nuages à l'échelle régionale.

## Petite histoire du LOA

Dans les années 1960, les activités de recherche du LOA se sont bâties sous la direction de Jacqueline Lenoble autour de cinq thématiques majeures :

- la résolution numérique de l'équation de transfert radiatif ;
- les mesures d'optique atmosphérique depuis le laboratoire et leur inversion ;
- l'optique marine ;
- l'échauffement radiatif de l'atmosphère ;
- l'étude des atmosphères planétaires, en particulier de Vénus.

Ces thèmes ont conduit à de nombreuses applications scientifiques et collaborations, portant par exemple sur l'étude d'autres planètes du système solaire, les interactions avec la dynamique atmosphérique, la télédétection de la végétation, la mesure à distance de la température des océans ou la détection du brouillard. Certaines de ces applications ont ensuite eu un large développement numérique ou instrumental, menant à d'importants résultats scientifiques.

Les années 1970 ont vu l'accentuation des thématiques de recherche liées au développement des mesures de télédétection. Cette technique s'est en effet révélée fondamentale pour améliorer nos connaissances des processus météorologiques et climatiques mettant en jeu les aérosols et les nuages. En particulier, l'étude des aérosols, qui émerge à cette époque, restera l'un des thèmes de recherche majeurs du LOA.

Vers la fin des années 1980, la prise de conscience environnementale a poussé le LOA à recentrer ses activités sur l'atmosphère terrestre, autour de cinq grands thèmes :

- la stratosphère, en particulier pour l'étude de l'ozone et des aérosols à partir de mesures spatiales et d'instruments embarqués sous ballon stratosphérique ;
- les nuages, leurs propriétés optiques, microphysiques et macrophysiques, et leur prise en compte dans les modèles de climat ;

- le cycle de vie des aérosols et leur impact sur le climat ;
- les surfaces (glace de mer, couleur de l'eau) avec une spécificité sur l'utilisation de la polarisation du rayonnement solaire réfléchi, et une extension des travaux vers la végétation ;
- les codes de transfert radiatif, avec en particulier le code Sunray utilisé à l'époque pour les prévisions du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT).

Les activités instrumentales s'intensifient, avec le développement de nouveaux concepts et de réalisations instrumentales originales telles que Radibal (radiomètre ballon), et la mise en place de la première station de mesures atmosphériques sur le toit du laboratoire. L'organisation de l'International Radiation Symposium en août 1988 à Lille reste une date mémorable pour le LOA.

L'ensemble de ces activités continueront de se développer sous les directions de Maurice Herman, le premier doctorant du LOA (1987-1999), Yves Fouquart (1986-1987, puis 1999-2001), Didier Tanré (2002-2007), Frédéric Parol (2008-2019) et Philippe Dubuisson (depuis janvier 2020).

Dans les années 1990 viendront s'ajouter la télédétection des zones polaires et les observations spatiales de la biosphère. Cependant, le fait marquant de cette période reste le lancement du capteur spatial Polder sur la plate-forme japonaise *Adeos* en 1996. Le concept de ce capteur et de sa version aéroportée ont été mis au point au LOA, avant que sa version spatiale ne soit réalisée par le Cnes (Deschamps *et al.*, 1994). À partir de 1993, presque toutes les équipes sont impliquées dans la préparation de cette mission spatiale et son exploitation scientifique. Le succès est au rendez-vous avec trois instruments spatiaux Polder : Polder-1 et Polder-2 sur les plateformes spatiales japonaises *Adeos I* et *Adeos II* qui ont volé en 1996-1997 et 2002-2003, puis Polder-3 sur *Parasol*, un micro-satellite du Cnes positionné dans le *A-Train (Afternoon-Train)* de 2004 à 2013. Le capteur spatial Polder-3 en opération pendant plus de huit années sur *Parasol* a permis de consolider la notoriété internationale du LOA. Concept innovant, Polder est le premier instrument spatial à mesurer simultanément la polarisation et les

signatures multispectrales et directionnelles du rayonnement solaire renvoyé par l'atmosphère et les surfaces terrestres.

Les résultats scientifiques de cette mission ont été multiples et présentés notamment lors du congrès de l'*A-Train* à Lille en 2007 (symposium co-organisé par le Cnes et le LOA). Dès lors, le savoir-faire du laboratoire sur le traitement et l'interprétation des données satellitaires dédiées à la caractérisation de composants atmosphériques clefs, nuages et aérosols en particulier, est largement reconnu. En complément, le fort investissement du laboratoire et la volonté de diffuser largement les résultats ont contribué à l'émergence du pôle thématique national Icare, avant sa création en tant qu'unité mixte de service en 2006. Icare est aujourd'hui l'un des quatre centres du pôle Aeris de l'infrastructure de recherche Data Terra (Tanré *et al.*, 2018). La mission principale d'Icare est de favoriser la mise à disposition de données atmosphériques de toutes origines, avec en premier lieu celles issues des observations satellitaires et des plateformes de mesures. Sa création, en 2006, a été rendue possible par les fortes compétences du LOA, en particulier à la suite des lancements des instruments Polder/Parasol, et de l'implication de la région Nord-Pas-de-Calais et du Cnes. De nombreux projets sont menés avec Aeris/Icare, qui est un partenaire essentiel pour les recherches du LOA.

Durant cette période, la caractérisation et l'étude des aérosols depuis la surface, indispensable pour la validation des missions spatiales, n'est pas en reste, avec le démarrage du réseau Aeronet établi en collaboration avec le Goddard Space Flight Center de la Nasa. La composante française, Photons, devient service national d'observation (SNO) de l'Insu en 1998. Le réseau est dès l'origine constitué de photomètres solaires automatiques et autonomes, instruments construits en collaboration avec l'entreprise Cimel qui les commercialise et avec laquelle le LOA a conservé de fortes collaborations. Ce réseau a été plus récemment étendu au sondage atmosphérique par lidar. Le réseau compte aujourd'hui 400 stations permanentes et fêtera, en 2022, ses 30 ans d'existence. Les mesures fournies par Aeronet sont aujourd'hui une référence pour l'évaluation et la validation des observations satellitaires et simulations numériques d'aérosols.

## Bref panorama actuel du LOA

Depuis sa première reconnaissance par le CNRS comme équipe de recherche associée, le 1<sup>er</sup> janvier 1974, le LOA bénéficie d'un fort soutien du CNRS/Insu, de l'université de Lille, de la Région Hauts-de-France et du Cnes. Le LOA est une unité mixte de recherche associant l'université de Lille et le CNRS. Le LOA est rattaché à la section CNU 37 (Enveloppes fluides du système Terre et des autres planètes) et à la section 19 (Système Terre : enveloppes superficielles) du comité national CNRS et s'inscrit dans la branche d'activités scientifiques océan-atmosphère de l'Insu. Le laboratoire s'implique fortement dans les grands chantiers coordonnés par l'Insu (parmi les plus récents, on peut citer Amma depuis 2005 ou Charmex pour la période 2010-2015). Implanté sur le site de la Cité scientifique (figure 2), à Villeneuve d'Ascq, il fait partie de la Faculté des sciences et technologies au sein du Département de physique, avec lequel il entretient des liens forts. L'essentiel des membres du LOA sont des physiciens qui participent aux formations académiques de ce département (en licence et master).

Au 1<sup>er</sup> janvier 2021, l'effectif total du LOA est de 71 personnes, dont 43 personnels permanents, répartis comme 21 enseignants-chercheurs, 5 chercheurs CNRS et 17 personnels techniques. Le laboratoire compte également 3 ingénieurs en CDD, 17 doctorants, 6 post-doctorants et accueille deux personnels en CDI d'une entreprise parisienne (Cimel). Les activités de recherche du laboratoire s'organisent autour de deux équipes

scientifiques, l'équipe Interactions aérosols-rayonnement (IAR) et l'équipe Interactions rayonnement-nuages (IRN). Ces travaux de recherche sont facilités par les trois services communs et transversaux de soutien à la recherche : « instrumentation / observations », « informatique / traitement de données » et « gestion et secrétariat ». Comme pour toutes les UMR, les décisions importantes et stratégiques sont discutées au sein du Conseil de laboratoire.

Au niveau local et régional, le laboratoire est impliqué dans plusieurs structures de coordination de la recherche centrée sur l'environnement et l'étude du climat. Depuis 2010, le LOA se positionne dans l'Institut de recherches pluridisciplinaires en sciences de l'environnement (Irepse) de l'université de Lille, au titre de ses domaines d'intérêt ou d'application que sont l'évolution du climat, les changements de composition de l'atmosphère, le rôle des nuages dans le bilan d'énergie de la planète, la qualité de l'air et la pollution. Depuis 2012, le LOA s'appuie également sur le laboratoire d'excellence (labex) Cappa (Chemical and Physical Properties of the Atmosphere), dont il a fortement contribué à la création. L'objectif général de Cappa est de mieux comprendre les aérosols atmosphériques et leurs contributions au climat et la pollution. Enfin, le LOA s'est également impliqué fortement dans le projet du contrat de plan État-Région Climibio (2015-2020), un projet environnemental pluridisciplinaire regroupant 16 laboratoires de la région des Hauts-de-France. Climibio a pour but d'étudier l'évolution des milieux et du climat, et d'analyser leurs impacts sur la biodiversité, la qualité de l'air, la santé, la société et d'envisager

les perspectives et stratégies d'adaptation à ces changements. La suite de ce projet est attendue à partir de 2021.

## Aperçu des principales thématiques du laboratoire

Les activités de recherche du LOA se focalisent principalement sur l'étude des nuages et des aérosols, de leurs variabilités, cycles et impacts, autour des deux équipes de recherche qui sont également animées par des recherches transverses sur les interactions aérosols-nuages.

L'équipe Interactions aérosols-rayonnement (IAR) (responsable actuel Philippe Goloub) a pour objectif général de progresser dans la connaissance des aérosols, de leurs gaz précurseurs et de leurs impacts sur le rayonnement, les nuages, le climat et l'environnement (encadré 1). Le projet est structuré autour des trois thèmes suivants : Propriétés des aérosols et quantification d'espèces gazeuses ; Variabilité, tendances, événements extrêmes ; Cycles et impacts.

L'équipe Interactions rayonnement-nuages (IRN) (responsable actuelle Céline Cornet) a pour finalité l'amélioration des connaissances sur les nuages en interaction avec la vapeur d'eau, les aérosols et le rayonnement, de l'échelle locale à l'échelle globale (encadré 2). Les travaux s'articulent autour des trois thèmes suivants : Transfert radiatif et applications ; Exploitation des mesures de télédétection pour la caractérisation des nuages, de la vapeur d'eau et de leurs effets radiatifs ; Propriétés, variabilités et processus nuageux.

Dans le domaine spatial, l'héritage scientifique et technique des missions Polder, initiées il y a plus de 20 ans, devrait être capitalisé avec la mise en orbite de l'instrument 3MI (Multi-viewing Multi-channel Multipolarisation imager), instrument multivue, multicanal et multipolarisation. 3MI est développé par Eumetsat et l'ESA dans le cadre du projet *Metop-SG* (Eumetsat Polar System - Second Generation), une famille de satellites météorologiques qui seront placés sur orbite entre 2023 et 2038. Le LOA est très impliqué dans la préparation de



Figure 2. Vue partielle du campus de la cité scientifique (université de Lille). Le LOA occupe le dernier étage du bâtiment longiforme ; le site d'observation atmosphérique est situé sur le toit du laboratoire à l'extrême gauche du bâtiment (entouré en rouge).

## 1. L'équipe IAR – Propriétés et effets des aérosols au-dessus des nuages

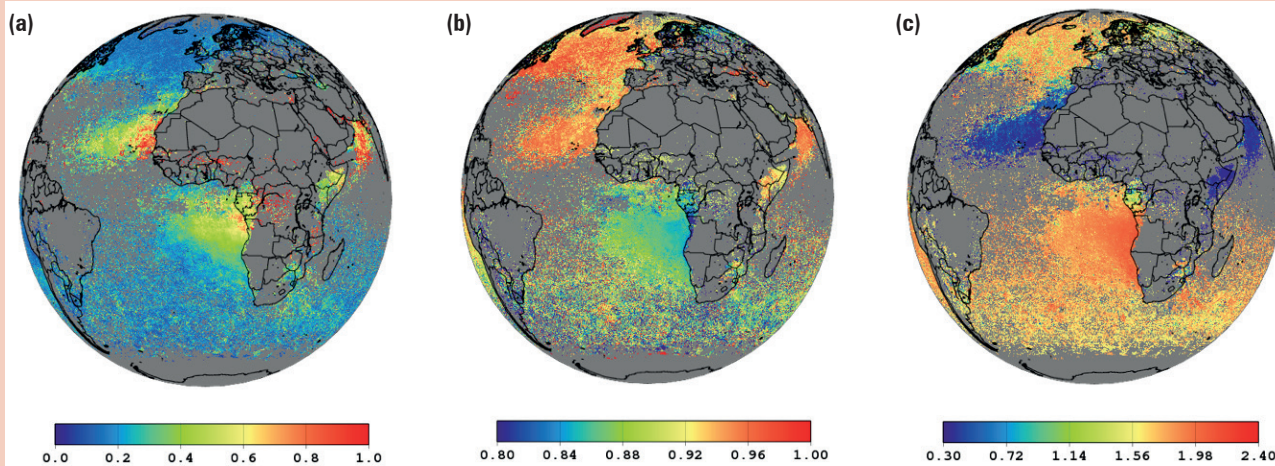
Un des axes importants de l'équipe est de concevoir, développer, évaluer, mettre en œuvre et valoriser de nouvelles approches, aussi bien expérimentales qu'algorithmiques, pour caractériser, de manière plus détaillée et avec une meilleure précision les propriétés physiques et optiques des particules dans l'atmosphère (concentration, distribution en taille, indicateur morphologique, épaisseur optique, albédo de diffusion simple et indice complexe), y compris au-dessus des nuages. L'analyse des données spatiales, en particulier dans le cadre de la constellation franco-américaine *A-Train*, a donné lieu à des avancées majeures sur la connaissance

des propriétés des aérosols telles que leur abondance, leurs propriétés dimensionnelles, leur absorption en atmosphère claire comme en atmosphère nuageuse, à l'échelle planétaire.

À titre d'exemple, l'analyse des résultats obtenus dans le sud-est de l'océan Atlantique (figure) permettra de mieux connaître l'impact de l'absorption des aérosols sur la dynamique atmosphérique, sur la microphysique des nuages, tout en évaluant et améliorant le comportement des modèles (Waquet *et al.*, 2013 ; Peers *et al.*, 2016). Ces études originales préparent et ouvrent la voie à des analyses plus approfondies,

plus fines, à partir des séries temporelles longues qu'apporteront les missions d'observations spatiales dédiées, en particulier plusieurs missions opérationnelles (3MI/*Metop-SG*). L'élargissement à l'échelle planétaire considérera des régions sensibles telles que l'Arctique et l'océan Pacifique nord. L'impact d'événements intenses de feux de forêt, à l'instar des incendies en Australie en 2019/2020 pouvant injecter des aérosols jusque dans la stratosphère, sera aussi étudié.

Pour plus de détails : <https://www-loa.univ-lille1.fr/recherche/aerosols.html?p=axes-recherche>



Valeurs moyennes sur la période juin-juillet-août 2008 : (a) épaisseur optique à 550 nm, (b) albédo de diffusion simple à 550 nm et (c) exposant d'Ångström des aérosols détectés au-dessus des nuages. Données issues de l'algorithme Aero-AC (Aerosol Above Clouds algorithm) développé pour Polder/Parasol (Waquet *et al.*, 2020).

3MI. D'un point de vue instrumental, le laboratoire a développé sa version aéroportée, Osiris, qui a permis de consolider les choix instrumentaux et de préparer les algorithmes de traitement et l'inversion des futures mesures de 3MI. L'investissement des équipes du laboratoire se poursuivra après le lancement de 3MI, en particulier avec l'exploitation scientifique des mesures. Le LOA s'impliquera également dans l'exploitation scientifique de *MetImage* et *Iasi-NG*, instruments qui partageront la même plateforme que 3MI. Au-delà de l'exploitation individuelle, le défi sera également de développer l'analyse en synergie des mesures issues de ces capteurs, pour progresser vers une description plus précise et complète des composés atmosphériques étudiés. Signe de la reconnaissance des travaux du LOA dans le domaine de la télédétection satellitaire, plusieurs chercheurs du laboratoire ont fait ou font partie des équipes scientifiques de différentes missions spatiales comme *Polder-3/Parasol*, *Modis/Terra* et *Aqua*, *Calipso*, *Iasi-NG*, *SGLI/GCOM*, *MicroCarb*, *Forum*, *C<sup>3</sup>iel*.

En parallèle, le LOA poursuit son implication dans le développement instrumental dédié au suivi des propriétés de l'atmosphère, en particulier avec le site d'observation atmosphérique du laboratoire, récemment baptisé *Atoll*, installé sur le toit du bâtiment (figure 3). Récemment, le LOA a étendu la gamme spectrale aux micro-ondes avec l'acquisition d'un radiomètre permettant une mesure du profil vertical en température et humidité relative. Le laboratoire pilote à distance une autre plateforme historique d'observations atmosphériques située à Dakar (Sénégal, avec l'Institut de recherche pour le développement) et contribue à d'autres plateformes d'observation et de surveillance (Observatoire de Haute-Provence, Observatoire de physique de l'atmosphère de La Réunion). Le LOA pilote le service national d'observation *Photons*, créé en 1993, et qui comprend aujourd'hui près de 100 stations. Le LOA contribue aussi, de manière très significative, au système d'observation international *NDACC*, un réseau international de surveillance sur le long terme de la stratosphère et de la haute troposphère. Le LOA

a la responsabilité de la composante UV du service national d'observation *NDACC-France*.

On doit mentionner l'implication importante du laboratoire dans l'infrastructure de recherche nationale *Actris*, qui a pour objectif de fédérer et d'harmoniser les observations des aérosols, de la vapeur d'eau et des nuages depuis la surface. Depuis 2005, le LOA développe, opère et exploite des systèmes de mesures des aérosols couplant lidar et photomètres, contribuant ainsi aux avancées des réseaux de surveillance internationaux *Aeronet* et *Earlinet*.

En complément de ces mesures fixes, le laboratoire s'investit également dans le développement d'instruments, déployés au sol ou embarqués sur véhicules, bateau et avion, lors de campagnes de terrain. Avec le soutien de *Cappa*, le LOA a conçu une plateforme mobile rapide *MAMS* (Mobile Aerosol Measurement System), une voiture instrumentée constituant un système compact prêt à être déployé pour l'exploration rapide de la variabilité spatiale

des aérosols en cas d'événements de pollution. Il s'agit aussi d'instruments dédiés aux campagnes de mesures ou encore servant de prototypes spatiaux tel que Plasma (photomètre léger aéroporté pour la surveillance des masses d'air) ou Osiris (version aéroportée de 3MI). Le laboratoire est également responsable de l'instrumentation de base de mesure du rayonnement passif des avions de recherche français, géré par l'UMS Safire.

Une partie des données de ces plateformes instrumentales est mise à disposition de la communauté scientifique dans la base de données nationale Aeris et l'ensemble est affiché en temps réel sur le site web du LOA.

Fort d'une compétence historique en modélisation du transfert radiatif dans l'atmosphère (encadré 3), le laboratoire a acquis une expertise internationalement reconnue en matière de développement de codes de transfert radiatif, ainsi qu'une maîtrise de leur utilisation pour les applications de télédétection, l'inversion des mesures (transfert radiatif inverse) et le calcul de l'influence des composants atmosphériques sur le

bilan radiatif. Ces modèles de transfert radiatif couvrent une vaste gamme spectrale qui s'étend des domaines ultraviolet et visible à l'infrarouge thermique et aux ondes millimétriques. En complément, le laboratoire s'est doté au cours des dernières années d'un volet de modélisation méso-échelle qui permet de décrire le cycle de vie des aérosols, nuages et gaz précurseurs et leurs impacts sur l'atmosphère à des échelles régionales à continentales.

L'ensemble des recherches menées au LOA s'appuie sur des équipes techniques très performantes en informatique et en instrumentation, qui permettent de mener des développements instrumentaux de pointe et de disposer d'outils informatiques efficaces pour le traitement numérique de données de télédétection spatiale, la résolution du transfert radiatif ou la diffusion des données. En mars 2021, une ingénieure du LOA, Frédérique Auriol, a reçu la médaille de Cristal du CNRS, en particulier pour ses travaux sur Osiris dont elle est la responsable technique, mettant par la même occasion en lumière le travail réalisé par l'ensemble des équipes techniques du LOA.



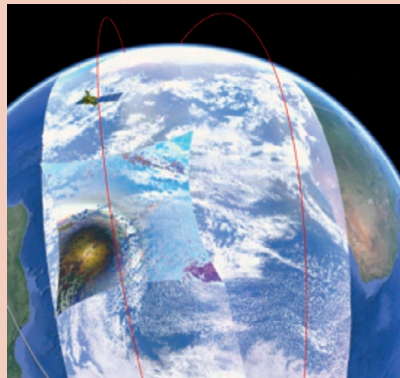
Figure 3. Site d'observation atmosphérique Atoll situé sur le toit du laboratoire à Villeneuve d'Ascq, comprenant un ensemble complet d'instruments de mesures optiques (fluxmètres, radiomètres, photomètres, spectromètres, lidars) couvrant l'ensemble du spectre électromagnétique (des UV aux micro-ondes) et d'instruments de mesures *in situ* pour la surveillance de la qualité de l'air (gaz et particules). Dans le cadre du Labex Cappa, le site accueille également plusieurs instruments de mesure *in situ* fournis par d'autres laboratoires, comme par exemple le spectromètre de masse ACSM de Sage (IMT Lille Douai) pour le suivi de la composition chimique des particules fines.

## Les interactions avec la formation et le monde industriel

Parallèlement aux activités de recherche, l'enseignement tient une place importante dans la vie du laboratoire, autant au travers de la formation des étudiants de l'université de Lille, que par leur accueil en stage et la formation académique des doctorants. La majorité des docteurs formés au laboratoire a actuellement un emploi en France ou à l'étranger et les personnels contractuels ingénieurs qui ont quitté le laboratoire ont généralement trouvé un emploi dans des domaines proches des activités du LOA (sociétés lilloises Hygeos ou Grasp-SAS, SSII informatiques, agences spatiales, etc.). Intégrés au Département de physique, les enseignants-chercheurs du LOA sont investis dans les actions de formation en licence et master, tant dans les disciplines fondamentales (physique, métrologie, traitement des données) que dans des filières ou options en physique de l'atmosphère, études du climat, météorologie, traitement du signal et des données. La majorité des enseignements dispensés par les personnels du laboratoire l'est en licence, mais l'implication en master, notamment de physique, s'est renforcée depuis la création de la filière Atmospheric Sciences associée au labex Cappa. Ce master est

### 2. L'équipe IRN – Caractérisation des propriétés des nuages depuis l'espace

La caractérisation des propriétés des nuages et de la vapeur d'eau à l'échelle planétaire est l'un des objectifs majeurs de l'équipe IRN. L'outil satellitaire, qui permet cette vision globale, est par conséquent au cœur des activités de l'équipe. La description de la variabilité des nuages et de la vapeur d'eau nécessite à la fois de faire évoluer les méthodes d'analyse afin de bénéficier des possibilités accrues de nouveaux instruments et de garantir la cohérence des séries temporelles obtenues. Pour contribuer à cette description climatologique, le développement d'approches dites « multicateur » est privilégié afin d'améliorer les restitutions ou obtenir de nouveaux paramètres. Dans ce contexte, l'équipe IRN contribue à la préparation et au développement de futures missions d'observation de l'atmosphère, en particulier pour les instruments 3MI, METImage et lasi-NG de la future mission météorologique européenne EPS-SG (Eumetsat Polar System - Second Generation), pour l'instrument Forum, sélectionné par l'ESA (European Space Agency) et dédié au bilan radiatif dans l'infrarouge lointain (Libois *et al.*, 2020), mais aussi pour la mission franco-israélienne C<sup>3</sup>iel (Cluster for Cloud evolution Climate and Lightning) dédiée à l'étude des nuages convectifs. Avec des objectifs plus spécifiques concernant par exemple les interactions aérosols-nuages, des campagnes de mesures aéroportées embarquant le radiomètre Osiris développé



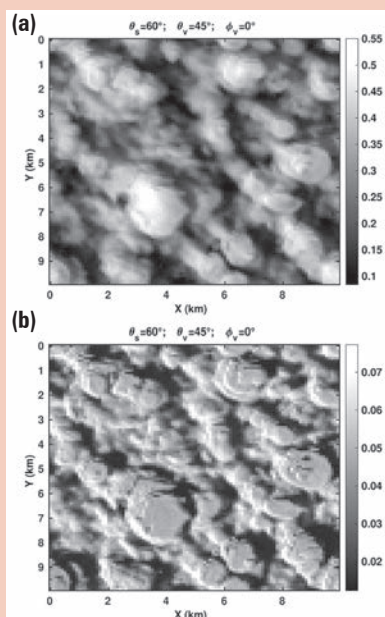
Exemple de simulation de l'observation du futur radiomètre 3MI le long de deux orbites, permettant des études préparatoires à la mission. La superposition de la luminance polarisée sur l'orbite de gauche fait apparaître l'arc nuageux typique des nuages composés d'eau liquide.

au LOA sont également mises en place. De manière complémentaire, des mesures au sol, grâce aux instruments du laboratoire (lidar, FTIR, fluxmètres, radiomètre micro-ondes) permettent aussi de progresser sur la caractérisation des nuages, de la vapeur d'eau et de participer à la validation des instruments spatiaux.

Pour plus de détails : <https://www-loa.univ-lille1.fr/recherche/nuages.html?p=axes-recherche>

### 3. Le transfert radiatif au LOA

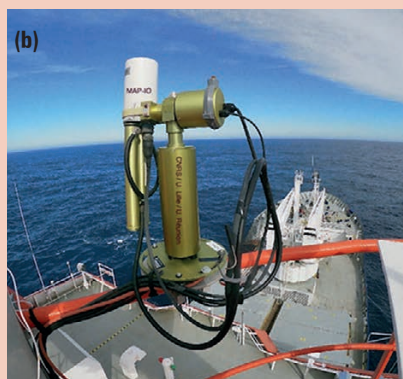
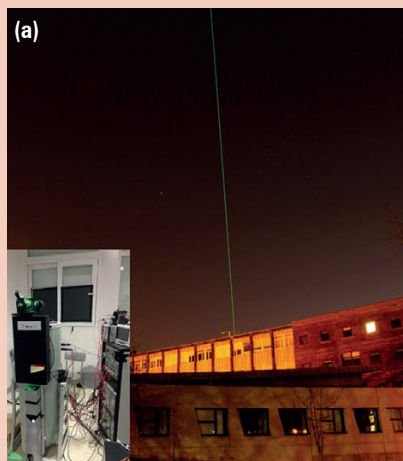
Le développement et l'amélioration des codes numériques de transfert radiatif uni- et tridimensionnel, qui décrivent l'interaction du rayonnement électromagnétique avec les composants gazeux ou particulaires de l'atmosphère, sont des thèmes de recherche historiques au LOA. Ces codes sont indispensables pour simuler le signal que reçoit un capteur (aéroporté ou satellitaire) ou pour estimer le bilan radiatif atmosphérique. Ils permettent par exemple de réaliser des études de sensibilité aux paramètres atmosphériques et instrumentaux, ou d'élaborer, d'évaluer et d'améliorer des algorithmes de traitement des mesures des capteurs. Ces activités sont, par définition, transversales au laboratoire, ces codes pouvant être appliqués à différents cas d'études, avec aérosols, nuages et vapeur d'eau. Les aspects tels que la prise en compte de la polarisation, de la multidirectionnalité, des effets 3D des constituants atmosphériques et en particulier les nuages (figure), de la synergie spectrale ou de la haute résolution spectrale sont primordiaux afin d'accompagner les projets liés aux nouveaux instruments de télédétection. En complément, des méthodes et codes dédiés au calcul des propriétés optiques des particules atmosphériques sont également disponibles, notamment pour les particules non sphériques telles que les cristaux de glace. Un ensemble de codes et de données, très majoritairement développés par le LOA, sont regroupés au sein de la base Artdeco (Atmospheric Radiative Transfer Database for Earth and Climate Observation) disponible pour la communauté et diffusée par Aeris/Icare (<https://www.icare.univ-lille.fr/artdeco/>).



Exemple d'un champ de réflectances (a) totales ou (b) polarisées, exprimées en pourcents, simulé à partir du code 3DMCPOL du LOA pour un nuage hétérogène de type stratocumulus dont les propriétés ont été calculées à l'aide d'un modèle nuageux stochastique. Source : Cornet *et al.* (2010).

### 4. Le Labcom Agora-Lab

Le LOA et la société Cimel ont renforcé leur collaboration historique, initiée dès l'origine du réseau Aeronet, dans le domaine de la télédétection de l'atmosphère, principalement des aérosols à partir de la surface, en mettant en place un laboratoire commun de recherche, le Labcom Agora-Lab. La collaboration entre ces partenaires a déjà donné lieu à des publications et plusieurs thèses Cifre. Elle a permis le développement d'instrumentation optique innovante en lien étroit



(a) Lidar Mie-Raman polarisé Lilas en opération sur la plateforme d'observation lilloise Atoll, (b) photomètre automatique mobile en opération sur le *Marion Dufresne* (<https://lacy.univ-reunion.fr/map-io>). Lilas : [https://www-loa.univ-lille1.fr/instrumentation/develop\\_lab0.html?p=lilas](https://www-loa.univ-lille1.fr/instrumentation/develop_lab0.html?p=lilas) Sources : Hu *et al.* (2019) et Popovici *et al.* (2018).

avec les problématiques de recherche de l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS. Intégré dans un large écosystème de partenariats, Agora-Lab a comme mission l'innovation en matière de systèmes de mesure par télédétection (instruments, algorithmes, synergies) à travers un programme de recherche couvrant les étapes de conception de prototypes, d'expérimentation aux échelles du laboratoire, du terrain et de réseaux, et de validations techniques, scientifiques et applicatives. Le lidar Lilas qui a commencé des observations systématiques en 2013 est un premier exemple de coréalisation. Depuis son acquisition, le LOA a beaucoup enrichi le système (Hu *et al.*, 2019) et développé son automatisation dans le cadre du réseau Earlinet/Actris, ce qui lui a permis de détecter et documenter un grand nombre d'événements aérosols en région Hauts-de-France et dans le cadre de campagnes en Afrique et en Chine. Un nouveau lidar de recherche (Life), s'inspirant du modèle Lilas, et intégrant la mesure de fluorescence, sera prochainement développé en partenariat avec Cimel dans le cadre du projet l'Equipex Obs4clim. Le développement de la version mobile du photomètre solaire/lunaire automatique Cimel CE318T équipant par ailleurs le réseau Aeronet est un second exemple de coréalisation. Ce dispositif a été intégré début 2021 sur le *Marion Dufresne* dans le cadre du projet MAP-IO (Marion Dufresne Atmospheric Program in Indian Ocean). Cet instrument automatique et autonome fournit l'épaisseur optique et la luminosité atmosphérique spectrales pendant le trajet du bateau.

D'autres projets impliquant le développement de photomètres et/ou lidar (Popovici *et al.*, 2018) sont en cours et contribueront à la fois à faire progresser les thématiques scientifiques actuelles et à apporter des solutions innovantes.

une formation internationale (graduate program, seize nationalités représentées depuis sa création en 2013) visant à former des spécialistes en physique et chimie de l'atmosphère. Les enseignants-chercheurs du laboratoire sont aussi fortement impliqués dans l'organisation et la vie des formations du Département de physique. Nombre d'entre eux sont responsables de formations ou d'unités d'enseignement, et cela à tous les niveaux de formation.

Les interactions des membres du laboratoire relèvent également d'actions de diffusion de la culture scientifique (conférences, participation à des manifestations de type « Fête de la science », salons, accueils d'élèves du primaire, du secondaire, contribution à la formation continue des professeurs des écoles, etc.). Toutes les catégories de personnels y contribuent, en fonction du type de manifestation et de sollicitation.

Un autre grand volet des activités du LOA comprend la valorisation des produits de la recherche, qui contribue largement à la diffusion de l'expertise et au transfert des connaissances. Le laboratoire entretient en effet un partenariat étroit avec le monde industriel. À titre d'exemple, on peut mentionner la collaboration historique qu'entretient le LOA avec la société Cimel, initiée dans les années 1990 au travers du réseau Aeronet/Photons dont Cimel commercialise les photomètres, et poursuivie depuis par de nombreux projets (photomètre lunaire, micro-lidar, etc.). La création en 2020 d'un laboratoire commun de recherche (Agora-Lab, encadré 4) a permis de valoriser cette

collaboration historique. Le laboratoire collabore aussi fréquemment avec des entreprises régionales, comme Hygeos, ou européennes, tel que CS Group, Thalès, Catalyst, etc. Les activités de recherche menées sur le développement de l'algorithme d'inversion Grasp ont abouti par exemple à la création en 2015 d'une start-up, Grasp-SAS, hébergée par l'université de Lille, dans les locaux du LOA, et qui compte aujourd'hui sept ingénieurs.

Au travers de ses activités, le LOA a développé une expertise unique dans le développement, la mise en œuvre et l'exploitation scientifique des mesures de rayonnement, au service d'une caractérisation toujours plus précise de notre environnement atmosphérique. Les succès du laboratoire s'appuient sur une collaboration étroite entre ingénieurs et chercheurs. Celle-ci permet de relever de nombreux défis, depuis l'étalonnage des capteurs jusqu'à la restitution de propriétés atmosphériques clés, en passant par la mise en œuvre de moyens de validation de ces propriétés observées depuis l'espace et le développement d'outils de traitement et de visualisation des données. Ce savoir-faire, appliqué au spatial, a favorisé la collaboration étroite avec différentes agences spatiales, principalement les agences française (Cnes) et européennes (Eumetsat, ESA), mais aussi avec les agences spatiales américaine (Nasa), japonaise (Jaxa) et plus récemment israélienne (ISA). À ce titre, le laboratoire reçoit depuis plusieurs années un soutien fort du Cnes pour l'accompagnement de ses projets relevant du spatial.

## Pour aller plus loin

LOA : <https://www-loa.univ-lille1.fr>  
Icare : <https://www.icare.univ-lille.fr>  
Labex Cappa : <http://www.labex-cappa.fr>  
Climibio : <http://climibio.univ-lille.fr>  
Faculté des sciences et technologies : <https://sciences-technologies.univ-lille.fr>  
Université de Lille : <https://www.univ-lille.fr>  
Actris : <https://www.actris.fr>  
CNRS-Insu : <https://www.insu.cnrs.fr>  
Cnes : <https://cnes.fr/fr>  
Région Hauts-de-France : <https://www.hauts-de-france.fr/mot/recherche/>

## Acronymes

**Actris**: Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure  
**Adeos**: Advanced Earth Observing Satellite  
**Aeris**: Applications for the Environment: Real-Time Information Synthesis  
**Aeronet**: Aerosol Robotic Network  
**Atoll**: Atmospheric Observations at Lille  
**CalioP**: Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation  
**Earlinet**: European Aerosol Research Lidar Network  
**Forum**: Far-infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring  
**Iasi-NG**: Infrared Atmospheric Sounding Interferometer-New Generation  
**Icare**: Cloud-Aerosol-Water-Radiation Interactions (UMS)  
**Osiris**: Optical Spectrograph and Infrared Imager System  
**Parasol**: Polarisation et anisotropie des réflectances au sommet de l'atmosphère  
**Plasma**: Photomètre léger aéroporté pour la surveillance des masses d'air  
**Photons**: Photométrie pour le traitement opérationnel de normalisation satellitaire  
**Polder**: Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance  
**Sage-IMT**: Sciences de l'atmosphère et génie de l'environnement du Département IMT Lille-Douai  
**Sage**: Stratospheric Aerosol and Gas Experiment  
**Spot**: Satellite pour l'observation de la Terre

## Bibliographie

- Cornet C., C.-Labonnote L., Szczap F., 2010. Three-dimensional polarized Monte Carlo atmospheric radiative transfer model (3DMCPOL): 3D effects on polarized visible reflectances of a cirrus cloud. *J. Quant. Spectros. Rad. Transfer*, 111, 174-186.
- Deschamps P.-Y., Bréon F.-M., Leroy M., Podaire A., Bricaud A., Buriez J.-C., Sèze G., 1994. The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 32, 598-615. doi: 10.1109/36.297978
- Hu Q. et al., 2019. Long-range-transported Canadian smoke plumes in the lower stratosphere over Northern France. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 1173-1193. doi: 10.5194/acp-19-1173-2019
- Libois Q., C.-Labonnote L., Camy-Peyret C., 2020. Forum mesurera l'infrarouge lointain émis par la Terre. *La Météorologie*, 108, 4-6. doi: 10.37053/lameteorologie-2020-0003
- Peers F., Bellouin N., Waquet F., Ducos F., Goloub P., Mollard J., Myhre G., Skeie R.B., Takemura T., Tanré D., Thieuleux F., Zhang K., 2016. Comparison of aerosol optical properties above clouds between POLDER and AeroCom models over the South East Atlantic Ocean during the fire season. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3991-4000. doi: 10.1002/2016GL068222
- Popovici I.E. et al., 2018. Description and applications of a mobile system performing on-road aerosol remote sensing and in situ measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 4671-4691. doi: 10.5194/amt-11-4671-2018
- Tanré D., Lifermann A., Desclotres J., 2018. Le pôle Icare : son historique, son fonctionnement, ses réalisations. *La Météorologie*, 102, 31-37. doi: 10.4267/2042/68210
- Waquet F., Cornet C., Deuzé J.-L., Dubovik O., Ducos F., Goloub P., Herman M., Lapyonok T., C.-Labonnote L., Riedi J., Tanré D., Thieuleux F., Vanbaucé C., 2013. Retrieval of aerosol microphysical and optical properties above liquid clouds from POLDER/PARASOL polarization measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 991-1016. doi: 10.5194/amt-6-991-2013
- Waquet et al., 2020. Aerosols above clouds products from Polder/Parasol satellite observations (Aero-AC products). doi: 10.25326/82.