

DÉTECTION ET ANALYSE AUTOMATIQUE des aérosols atmosphériques par lidar ultraviolet ou infrarouge


Jean-Pierre CARIOU, Ludovic THOBOIS, Philippe ROYER
Leosphere, 14-16 rue Jean Rostand, 91400 Orsay - jpcariou@leosphere.com

Le changement climatique récent est attribué entre autres à l'impact des particules atmosphériques d'origine naturelle ou des activités humaines d'après le dernier rapport du GIEC [1]. Les aérosols affectent également les propriétés des nuages et influencent le cycle de l'eau, pouvant intensifier les moussons. En avril 2010, le volcan Eyjafjallajökull a créé un panache de plusieurs milliers de kilomètres sur l'Europe et causé la fermeture de plusieurs aéroports internationaux, clouant au sol des millions de voyageurs et une perte économique globale de 1,7 milliards de dollars. Tous les jours, les aérosols transfrontaliers (panache de sable du Sahara, résidus de combustion des forêts canadiennes) affectent la santé des populations habitant notamment en zones urbaines ainsi que les activités économiques.

La surveillance des aérosols atmosphériques est donc nécessaire pour mieux prédire les épisodes extrêmes et ainsi anticiper leur conséquence sur les activités humaines. Les instruments LIDARs (*light detection and ranging*), instruments optiques actifs sont particulièrement adaptés au sondage à distance de la composition et des structures de l'atmosphère. Ils sont par ailleurs complémentaires des autres moyens d'observation comme les satellites et des modèles numériques même les plus détaillés.

Principes de fonctionnement

Inventés peu après les lasers, les lidars forment une large famille aux applications diverses. Leur principe commun est d'émettre une impulsion courte dans l'atmosphère et de recueillir l'énergie rétrodiffusée par les différentes couches atmosphériques traversées. L'analyse au cours du temps de la puissance reçue, du changement de polarisation ou de fréquence permet une mesure résolue en distance



PICO

DC-3 Series
DC-1 Series
HiQP Series

AS 9100 REV C

DC-DC CONVERTERS

NEW!

HIGH INPUT VOLTAGES UP TO 900 VDC.

DC-1 Series

- 120-370 VDC input voltage range
- 5-300 VDC regulated isolated outputs
- Up to 300 watts output power
- 114.3mm X 63.5mm X 12.7mm encapsulated package

DC-3 Series

- 300-900 VDC input voltage range
- 3.3-300 VDC regulated isolated outputs
- Up to 50 watts, single and dual outputs
- Thru hole and terminal strip models

HiQP Series

- 125-475 VDC input voltage range
- 24-200 VDC regulated isolated outputs
- Up to 50 watts output power
- 63.5mm X 39.37mm X 12.7mm encapsulated package

ALL MODELS AVAILABLE WITH EXPANDED OPERATING TEMPERATURES
SELECTED MILITARY SCREENING
CUSTOM DESIGNS

For full characteristics of these and the entire PICO product line, see PICO's Full line catalog at www.picoelectronics.com

Call 800-431-1064

PICO Electronics, Inc.

143 Sparks Ave, Pelham, NY 10803-1837, USA

Pico Representatives

Germany

ELBV/Electra Bauelemente Vertrieb
E-mail: info@elbv.de
Phone: 49 089 460205442
Fax: 49 089 460205442

England

Ginsbury Electronics Ltd
E-mail: rbennett@ginsbury.co.uk
Phone: 44 163 429800
Fax: 44 163 4290904

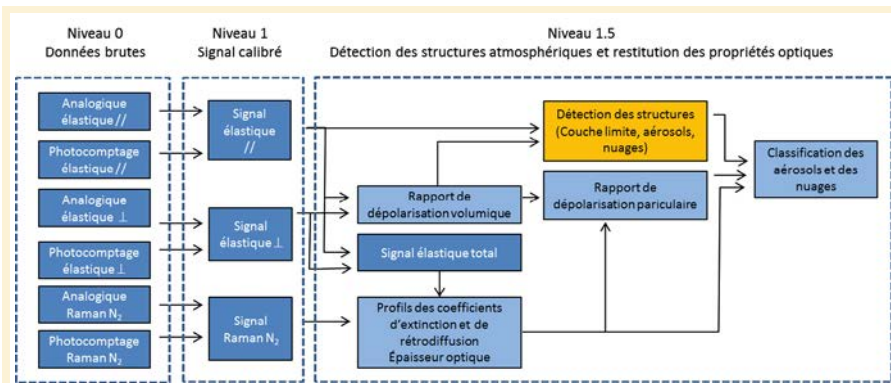


Figure 1. Logigramme des traitements successifs du R-MAN510.

de la concentration des différentes composantes de l'atmosphère, de leur vitesse et de la localisation des nuages et couches d'aérosols.

Deux grands principes sont utilisés. Le premier utilise la **détection directe**: le signal est proportionnel à la puissance optique collectée, intégrée dans une bande spectrale et un angle solide. Le second utilise la **détection cohérente** (ou hétérodyne): par interférométrie, le signal reçu reproduit le champ du signal optique, et donc son amplitude, sa phase et sa fréquence, donnant accès à la mesure de la vitesse du vent. Chaque principe utilise une technologie adaptée avec ses caractéristiques, ses avantages et ses inconvénients. Pour illustrer les principes et les performances de ces lidars, nous considérons deux exemples d'instruments:

- un lidar UV Raman à 0,355 μm à détection directe, tel le R-MAN510,
- un lidar IR à 1,54 μm à détection cohérente, tel le WINDCUBE200S.

Le tableau 1 indique les caractéristiques des 2 instruments.

Localisation des nuages et des aérosols

Principes

Pour le lidar UV, les signaux sont inversés par plusieurs algorithmes dont l'algorithme d'inversion de Fernald-Klett [2] afin de calculer les paramètres optiques de chaque couche d'aérosols: coefficient d'extinction, de rétrodiffusion, épaisseur optique, coefficient de dépolarisation (figure 1). L'inversion est contrainte par le rapport lidar (LR: rapport entre

l'extinction et le coefficient de rétrodiffusion) déterminé par le troisième canal de détection: la voie Raman [3]. Cette voie possède un filtre étroit à 387 nm et détecte la diffusion inélastique sur les molécules d'azote. Elle est donc insensible à la diffusion particulaire.

Les deux voies de détection élastiques mesurent le signal rétrodiffusé sur deux polarisations orthogonales. Le rapport de dépolarisation informe sur la sphéricité des particules et permet de distinguer les cristaux de glace des gouttelettes, ou les nuages de sable des nuages d'eau [4].

Pour le lidar IR, le signal rétrodiffusé est également exploité pour détecter les différentes couches de l'atmosphère qu'elles soient constituées de nuages ou d'aérosols. Pour certaines caractérisations, les mesures de vent sont aussi utilisées.

Détection des structures

Couche limite atmosphérique

La couche limite atmosphérique (CLA) représente la couche basse de l'atmosphère en interaction turbulente avec



	Détection directe	Détection cohérente
Longueur d'onde	0,355 μm	1,54 μm
Laser	laser solide pompé diodes	amplificateur fibré EDFA
Détecteur	photomultiplicateur	PIN InGaAs
Puissance moyenne	0,2 W	1 W
Sécurité oculaire	classe 1 M	classe 1 M
Mesure de la concentration des aérosols	absolue, avec calibration sur signal raman	relative
Mesure du vent	non	oui
Portée sur aérosols (200 mW, 1 s d'intégration, ouverture 15 cm)	>15km@355nm	>15km@1500nm
Architecture optique	bistatique, diamètre réception 150 mm	monostatique, diamètre réception 120 mm
Voies de mesure	3 voies, polarisation //, \perp , Raman N2	1 voie //
Sensibilité aux turbulences d'indice	nulle	moyenne
Sensibilité au fond de ciel (jour)	moyenne	nulle
Résolution spatiale	10 m	50 m
Résolution temporelle	30 s	1 s
Direction du faisceau	zénithale	hémisphérique par scanner
Référence	R-MAN510	WINDCUBE200S
Illustration		

Tableau 1. Caractéristiques des lidars UV et IR.

SÉRIES UC

OBJECTIFS ULTRA
COMPACTS **TECHSPEC®**Performance supérieure
pour petits capteursConçus par des experts en imagerie
Fabriqués par des perfectionnistes
vendus à des prix intéressantsCONTACTEZ NOS EXPERTS EN
IMAGERIE AUJOURD'HUI !**BORIS
ECKER**
Ingénieur
de solutions
en imagerie**NICHOLAS
SISCHKA**
Spécialiste
de solutions en
vision industrielle**GREG
HOLLOWS**
Directeur de
l'unité commerciale
d'imagerieVenez nous rencontrer :
Stand G27,
14 - 15 septembre
Paris Expo, Porte de Versailles

Bienvenue à EO

+33 (0) 8 20 20 75 55
sales@edmundoptics.fr

www.edmundoptics.fr/uc-series

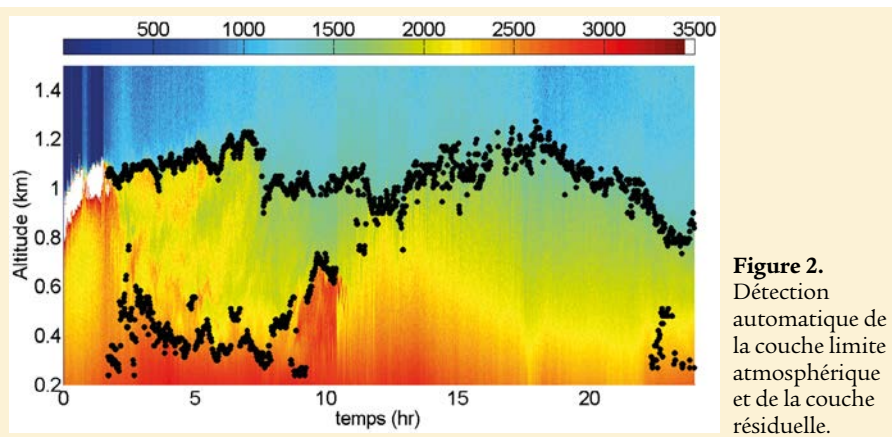


Figure 2.
Détection
automatique de
la couche limite
atmosphérique
et de la couche
résiduelle.

le sol. Elle concentre la majeure partie des aérosols et des polluants. Son épaisseur varie selon l'heure de la journée, de la saison et de la latitude du lieu, entre quelques dizaines de mètres de nuit sur l'océan à plus de 3 km de jour aux tropiques. Au sommet de la CLA, la turbulence augmente et la concentration des aérosols chute brusquement. Pour détecter ce sommet, l'algorithme de détection des lidars UV ou IR analyse le gradient vertical du signal élastique sur la voie parallèle et sa continuité au cours du temps. La figure 2 montre un exemple de détection par le R-MAN510 de la CLA le 1^{er} avril 2012. On observe un cycle typique de couche limite : pendant la nuit, la couche nocturne varie entre 400 et 500 m. Elle est surmontée par une couche

résiduelle qui s'étend jusqu'à 1100 à 1200 m de hauteur. Après 9 h (heure locale), la CLA augmente progressivement par la convection progressive et atteint son maximum à 1200 m vers 17-18 h.

Spécifiquement pour le lidar IR, la mesure du vent vertical à haute fréquence typiquement toutes les secondes permet de mesurer efficacement le sommet de la couche limite convective.

Nuages et couches d'aérosols

L'étape suivante est la détection de la base et du sommet des nuages et des couches d'aérosols. La méthode utilise également un seuillage automatique sur le gradient du rapport de rétrodiffusion atténué [6]. La figure 1 montre

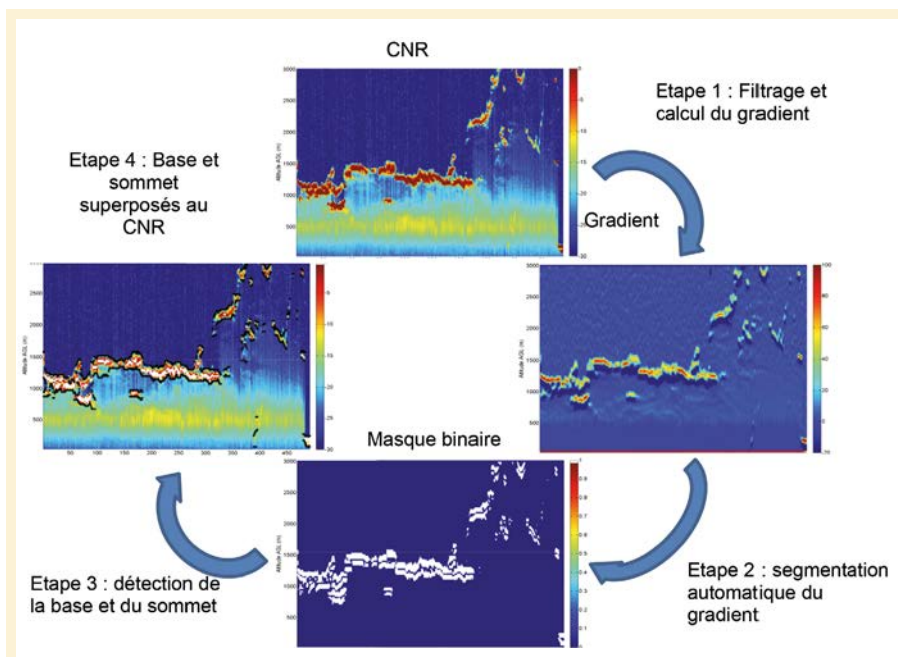


Figure 3. Détection automatique en 4 étapes de la base et du sommet des couches atmosphériques.

les 4 étapes de l'algorithme appliqué aux signaux du lidar IR et la *figure 2* compare les résultats simultanés de la mesure avec les lidars UV et IR. La différence de résolution spatiale n'est guère sensible à l'échelle de la portée. Les performances de détection et localisation des nuages sont très voisines, bien que le lidar UV montre un plus faible contraste en frontière de la couche limite, du fait de sa sensibilité importante à la diffusion des molécules en altitude, absente sur les signaux IR.

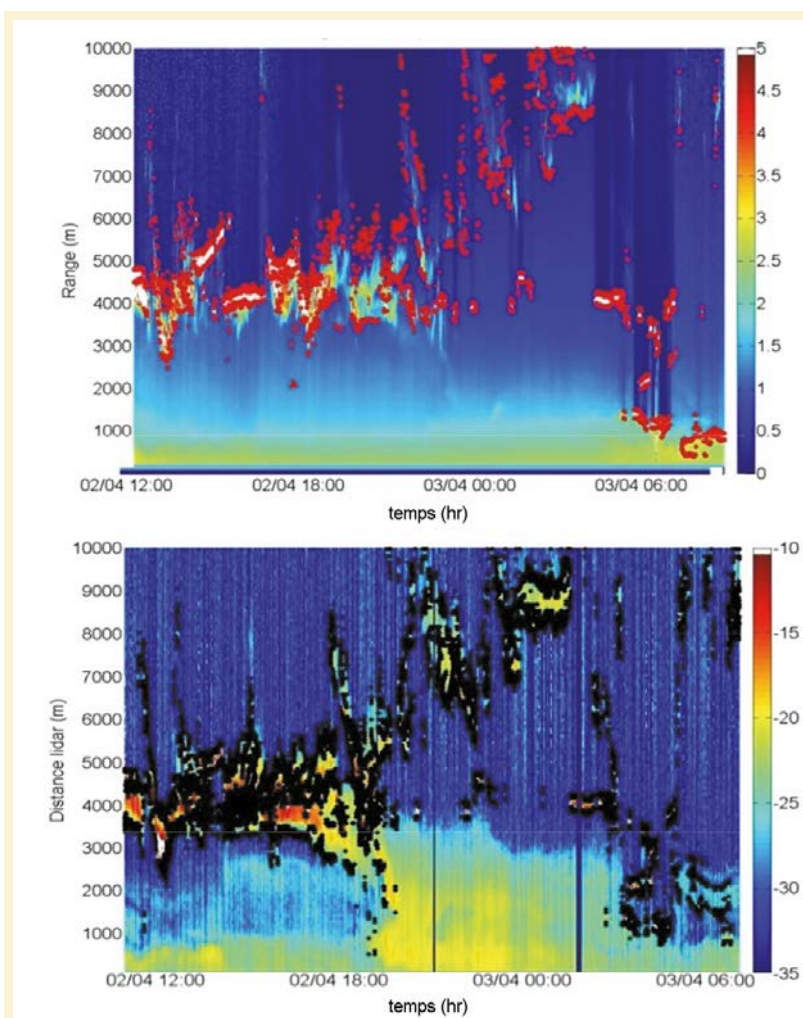
Mesure des paramètres optiques des aérosols

Une fois les structures détectées, les paramètres optiques sont mesurés pour chaque couche : extinction optique α_a , coefficient de rétrodiffusion, épaisseur optique AOD, rapport de rétrodiffusion DR, rapport de dépolarisation particulaire.

Sur le lidar UV, la voie Raman azote est utilisée pour contraindre la voie élastique afin d'extraire une valeur fiable du coefficient d'extinction.

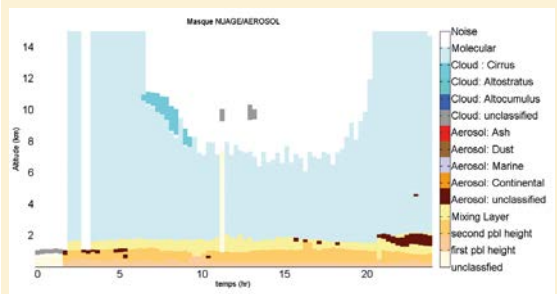
N'étant sensible qu'à la diffusion des molécules d'azote, dont la concentration est bien modélisée, la voie Raman permet d'étalonner la diffusion aérosolaire en absolu.

Sur le lidar IR, le coefficient de rétrodiffusion relatif atténué est calculé. Il correspond au signal reçu normalisé, corrigé par la réponse en distance du lidar. Alors que sur un lidar à détection directe la décroissance du signal est quadratique avec la distance, la dépendance est plus complexe sur un lidar cohérent, sensible à la courbure de l'onde et aux défauts de

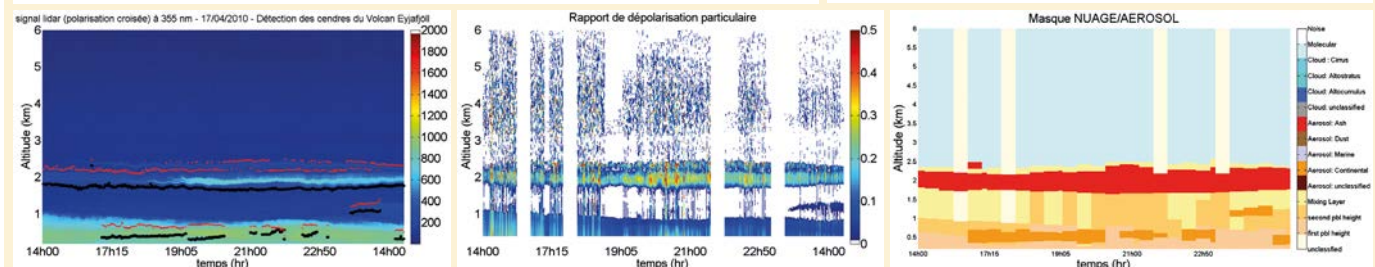
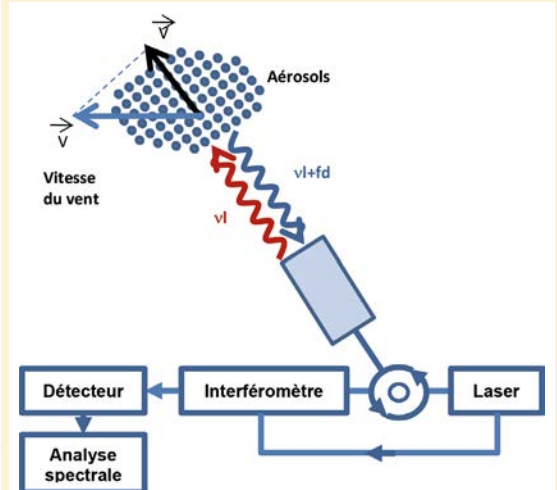


◀ **Figure 4.** Haut : base et sommet (rouge) d'une couche d'aérosols mesurée avec un lidar à 355 nm. Bas : séquence simultanée avec un lidar cohérent à 1550 nm.

▽ **Figure 5.** Classification des nuages et des aérosols sur le R-MAN 510 (donnée du 01/04/2012 à Palaiseau).



▽ **Figure 6.** Schéma de principe du lidar Doppler cohérent.



△ **Figure 7.** À gauche : cendres du volcan Eyjaföll sur la voie perpendiculaire avec détection automatique base/sommet des aérosols (base en noir, sommet en rouge), avril 2010. Au centre : rapport de dépolarisation particulaire. À droite : spéciation des aérosols.

small components
 MASSIVE IMPACT

Leosphere

Leosphere est une société française indépendante, créée en 2004. Située à Orsay (91), elle compte aujourd'hui 100 personnes, dont 25 en R&D. Leader mondial des lidars atmosphériques, elle réalise un chiffre d'affaire de 17 M€ (2015), dont 85% à l'export. Les technologies sont issues des centres de recherche (CEA/CNRS, ONERA) du plateau de Saclay. Avec ses lidars de mesure d'aérosols et de vitesse du vent, LEOSPHERE adresse les marchés de l'énergie éolienne, de la météorologie, de la qualité de l'air et de la sécurité aéroportuaire. www.leosphere.com

phase dus à la turbulence. Le protocole de mesure en IR inclut donc une mesure régulière de cette fonction instrumentale par un tir horizontal dans une couche atmosphérique homogène. Par combinaison avec l'épaisseur optique, il est alors possible de calculer le coefficient de rétrodiffusion absolu atténué.

L'étape future encore en développement sera de convertir les données optiques en concentration massique, grâce à la connaissance des propriétés microphysiques des particules, recueillies *in situ*.

Classification des aérosols et des nuages

Pour les lidars UV, le rapport lidar (LR) d'une part et le rapport de dépolarisation particulière (DR) d'autre part sont finalement utilisés pour classer automatiquement les aérosols en quatre catégories [7]: pollution continentale, aérosols marins, poussière et cendres volcaniques. Les nuages sont classés en quatre catégories: cirrus, altostratus, alto-cumulus, nuages bas, à partir de leur altitude et de leur épaisseur optique. Sur l'exemple de la *figure 5*, on distingue les aérosols de la couche limite (vert clair), les aérosols de la couche résiduelle (vert foncé), les nuages bas (bleu foncé) et hauts (bleu clair). Certains lidars IR disposent maintenant de deux voies de polarisation afin de pouvoir distinguer les aérosols sphériques et non sphériques.

Mesure de la vitesse du vent

Principe

Le lidar IR à détection cohérente émet des impulsions brèves et monofréquences dans l'atmosphère. Le signal détecté après rétrodiffusion sur les aérosols

de l'atmosphère est mélangé dans un interféromètre à une fraction de la source maître (oscillateur local) (*figure 6*). Le signal de battement, par effet Doppler, possède une fréquence proportionnelle à la vitesse radiale des aérosols et une puissance proportionnelle au coefficient de rétrodiffusion atténué. Le traitement d'analyse spectrale par un processeur FPGA, suivi d'une estimation spectrale par MLE (*maximum likelihood estimator*) produit la vitesse radiale du vent, sa dispersion, et l'intensité du signal. Pour retrouver les trois composantes du vecteur vent, une reconstruction est réalisée à partir de visées séquentielles dans 3 à 5 directions non coplanaires.

Architecture optique

Issu d'une souche technologique transférée de l'ONERA/DOTA, le lidar WINDCUBE200S (*figure 2*) utilise une chaîne laser MOPA (*master oscillator power amplifier*) comprenant un oscillateur local continu semi-conducteur à 1550 nm et un amplificateur fibré en mode impulsif. La résolution spatiale verticale de 50 à 100 m est associée à une largeur d'impulsion de 200 à 400 ns (*tableau 1*). L'ouverture du télescope est limitée à 150 mm par la cohérence transverse du faisceau après propagation dans l'atmosphère turbulente. Dans l'instrument tous les composants sont fibrés, conférant une grande souplesse d'architecture et une forte robustesse aux perturbations.

Cas du volcan islandais d'avril 2010

Les traitements automatiques de détection des structures et de spéciation des aérosols ont été appliqués aux données du volcan enregistrées par un lidar UV



High-Power Laser Optics

- Coatings for $\lambda=193-3000$ nm
- OEM products
- Coating technologies: IBS, IAD, PVD

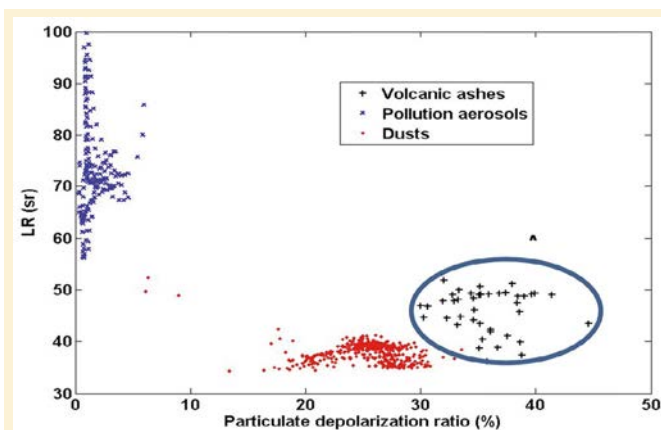


Figure 8. Mesures réalisées lors de l'éruption du volcan Eyjafjallajökull en 2010 rapportée sur un diagramme 2D du rapport lidar LR et du rapport de dépolarisation DR afin de classer les types d'aérosols observés.

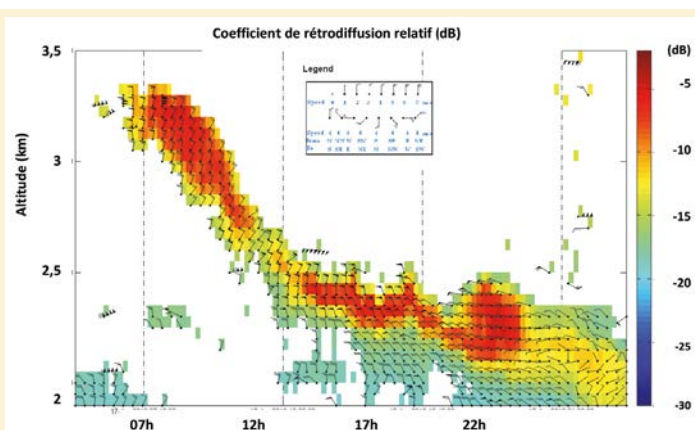


Figure 9. Nuage volcanique observé par un lidar Doppler le 17 avril 2010 (coefficient de rétrodiffusion relatif atténué superposé au champ de vent horizontal).

de recherche voisin du R-MAN510 développé en partenariat avec le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement [8]. Ce lidar a réalisé des mesures en continu à Saclay (91) durant l'épisode d'avril 2010 et les mesures ont été rapportées sur un diagramme utilisant les rapports lidar et de dépolarisation afin de classer les particules (figure 7). Les aérosols observés lors de cette période d'observation étaient des aérosols de pollution, des cristaux de glace ou des cendres volcaniques. Grâce à la combinaison du rapport de dépolarisation et du rapport lidar, la distinction entre ces trois classes d'aérosols est aisée (figure 8). En effet, les aérosols de pollution dépolarisent très peu la lumière mais ont un rapport lidar élevé. Les cristaux de glace (contenus dans les cirrus) ont par contre un fort rapport de dépolarisation mais un faible rapport lidar. Enfin les cendres volcaniques ont des rapports de dépolarisation supérieurs à 30% et des rapports lidar supérieurs à 40.

Suite à cette sérieuse alerte, la France s'est équipée d'un réseau de 5 lidars à détection directe à 0,532 μm et à 1,06 μm . Les 5 lidars français devraient être déployés d'ici l'été 2016 sur le territoire. Un sixième, mobile, sera installé à Toulouse mais pourra être déplacé en cas de crise volcanique. Ils alimenteront le modèle de dispersion atmosphérique de Météo-France MOCAGE. Au Royaume-Uni, le réseau Lidarnet opéré par le MetOffice possède 40 ceilomètres à détection directe dans le proche IR, version courte portée des lidars troposphériques,

complétés par quelques lidars troposphériques UV Raman.

Le lidar cohérent IR a également mesuré le nuage de cendres lors de son passage. La figure 9 indique la séquence de mesures du coefficient de rétrodiffusion relatif atténué, avec en superposition le champ de vent horizontal, permettant d'affiner la trajectographie du nuage. En 2013, l'Institut de météorologie Islandaise (IMO), sur la demande de l'agence aéronautique ISAVIA, s'est équipé de deux lidars Doppler IR de type WINDCUBE200S, munis spécialement de deux voies de polarisation. Ces instruments opérationnels participent maintenant à la surveillance des événements volcaniques autour de Reykjavik.

Une aide à la décision

Les lidars UV et IR contribuent à combler un manque dans la mesure et la classification des aérosols à partir du sol. Adaptés aux futurs réseaux de stations météo, ils fournissent automatiquement et en temps réel la détection et l'altitude des structures atmosphériques, les paramètres optiques de diffusion et d'extinction des aérosols, et une classification du type d'aérosols et de nuages. Leur rôle est d'améliorer la connaissance de l'impact des aérosols sur le climat et la santé humaine, et d'apporter une aide à la décision lors d'épisodes de dangers atmosphériques, comme les éruptions volcaniques.

RÉFÉRENCES

- [1] IPCC, *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [2] J.D. Klett, LIDAR inversions with variable backscatter/extinction values, *Appl. Opt.* **24**, 1638-1643, 1985
- [3] P. Royer, P. Chazette, M. Lardier, L. Sauvage, Aerosol content survey by mini N2-Raman LIDAR: Application to local and long-range transport aerosols, *Atmospheric Environment*, 2010
- [4] David et al., *UV-VIS Pol Lidar Particles Partitioning*, ACP-13-6757, 2013
- [5] S.P. Burton, R.A. Ferrare, C.A. Hostetler, J.W. Hair, R.R. Rogers, M.D. Obland, C.F. Butler, A.L. Cook, D.B. Harper, K.D. Froyd, Aerosol classification using airborne high spectral resolution lidar measurements - methodology and examples, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **4**, 5631-5688, 2011
- [6] Z. Wang, K. Sassen, Cloud Type and Macrophysical Property Retrieval Using Multiple Remote Sensors, *J. Appl. Meteorol.*, 2001
- [7] J.C. Raut, P. Chazette, Retrieval of aerosol complex refractive index from a synergy between LIDAR, sunphotometer and in situ measurements during LISAIR experiment, *Atmos. Chem. Phys.* **7**, 2797-2815, 2007
- [8] P. Chazette, A. Dabas, J. Sanak, M. Lardier, P. Royer, French airborne lidar measurements for Eyjafjallajökull ash plume survey, *Atmos. Chem. Phys.* **12**, 7059-7072, 2012