Détection et analyse automatique des aérosols atmosphériques par lidar Raman

Jean-Pierre CARIOU, Ludovic THOBOIS, Anthony BIZARD
Leosphere
jpcariou@leosphere.com

Figure 1. Lidar R-MAN510 de Leosphere.

Lorsque se réveille, en avril 2010, le volcan Eyjafjallajökull, un panache de plusieurs milliers de kilomètres s'étend sur l'Europe depuis l'Islande. L'Europe du Nord et bientôt l'Europe entière, en l'absence de données quantitatives fiables sur la concentration des cendres, se voit contrainte de fermer les aéroports internationaux, clouant au sol des millions de voyageurs. L'association internationale du transport aérien évalue les pertes économiques globales à 1,7 milliard de dollars. Cet épisode n'est qu'un exemple démonstratif des menaces que peuvent constituer les aérosols transfrontaliers qui survolent notre pays : panache de sable du Sahara, ou encore résidus de combustion des forêts canadiennes peuvent affecter notre santé ou notre économie. Leur surveillance est nécessaire et adaptée à la mesure par les lidars (*light detection and ranging*), instruments optiques actifs adaptés au sondage à distance de la composition et des structures de l'atmosphère.

Principe de fonctionnement

Inventés peu après les lasers, les lidars forment une large famille aux applications diverses. Leur principe commun, proche du télémètre laser, 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, de la polarisation ou de la fréquence permet une mesure résolue en distance de la concentration, de la nature ou de la vitesse des particules ou des gaz. Pour mieux comprendre le fonctionnement des lidars et leur application à la détection et à l'analyse automatique des aérosols atmosphériques, nous nous appuierons sur la présentation du lidar R-MAN510, nouveau lidar développé par la compagnie française Leosphere (*figure 1*).

Il a pour fonction la mesure de la diffusion et de l'extinction atmosphérique des aérosols en vue de localiser et d'identifier les différentes composantes de l'atmosphère et en particulier les nuages et les aérosols comme les cendres volcaniques. Associant une mesure dans les très basses couches à une très grande portée, le R-MAN510 identifie et classifie les structures d'aérosols et de nuages, grâce à ses canaux de mesure en polarisations croisées et en détection Raman.

Leosphere

Leosphere est une jeune société française indépendante, créée en 2004. Située à Orsay (91), elle compte aujourd'hui plus de 120 personnes et deux filiales. Leader mondial des lidars atmosphériques, elle réalise un chiffre d'affaire en forte croissance de 13 M€ (2012), 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.

Lidar Leosphere R-MAN510	
Source laser	Nd:YAG 355 nm – pompé diodes
Canaux de détection	– // et ⊥ élastiques (355 nm) – N_2 Raman (387 nm)
Acquisition	Analogique et comptage de photons
Temps d'intégration	30 s à 10 min
Résolution verticale	Minimum : 7,5 m – Standard : 15 à 60 m
Paramètres atmosphériques mesurés	– Coefficients de rétrodiffusion et d'extinction, rapport lidar – Altitude et structure des couches d'aérosols et nuages. Hauteur de la couche limite atmosphérique – Épaisseur optique et visibilité – Types de particules
Dimensions (H×L×l) **Masse**	1150 mm × 800 mm × 650 mm 105 kg

Caractéristiques du lidar R-MAN510

Le lidar R-MAN510 (*figure 2*) est construit autour d'un laser YAG, triplé à 355 nm et pompé par diodes laser, lui assurant une faible maintenance. Il possède trois voies de détection : une voie élastique à 355 nm en polarisation parallèle à l'émission, une voie à 355 nm en polarisation perpendiculaire et une voie à 387 nm correspondant au décalage Raman de l'azote. La résolution spatiale verticale de 15 à 60 m est associée à une résolution temporelle de 30 s pour les deux voies élastiques, et 10 minutes pour la voie Raman (*voir tableau*).

Architecture optique

Le lidar R-MAN510 possède une configuration bistatique (*figure 2*). Le faisceau émis à 355 nm est collimaté par un télescope pour réduire la divergence et la fluence en sortie sous le seuil de sécurité oculaire de la classe 1M. Le faisceau reçu est collecté par un télescope dioptrique de diamètre 150 mm. Le flux est séparé d'une part spectralement vers la voie Raman, puis en polarisation sur les deux voies élastiques.

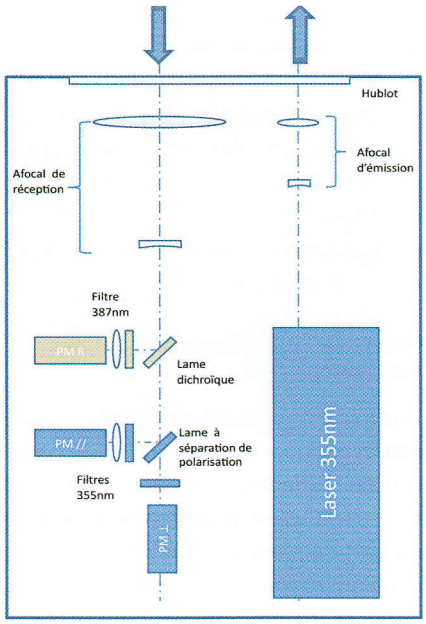


Figure 2. Architecture optique du R-MAN510.

Chacune des voies est filtrée spectralement et spatialement afin de réduire le fond de ciel de jour. L'architecture bistatique limite les saturations en basses couches par le recouvrement progressif des champs d'émission et de réception.

Acquisition

Les photomultiplicateurs sont utilisés sur les trois voies de détection en deux modes complémentaires. Pour les faibles signaux, chaque photon reçu fournit une impulsion distincte qu'une électronique rapide peut compter (mode photo-comptage). Pour les forts signaux, le mode analogique fournit un courant proportionnel au flux reçu. Les deux modes sont associés pour atteindre une dynamique linéaire sur 6 décades.

Traitement du signal

À partir des deux canaux de détection élastique, les structures verticales de l'atmosphère, comme les couches d'aérosols

ou les nuages, sont déterminées. Ensuite les signaux lidar sont inversés par plusieurs algorithmes dont l'algorithme d'inversion de Fernald-Klett [1] bien connu afin de calculer les paramètres optiques de chaque couche d'aérosols (coefficient d'extinction, de rétrodiffusion, épaisseur optique, coefficient de dépolarisation) (*figure 3*). Cependant, pour l'application de l'algorithme de Klett, il est nécessaire de contraindre l'inversion par le rapport lidar déterminé par le troisième canal de détection : la voie Raman [2].

Détection de structures

La couche limite atmosphérique (CLA) représente la couche basse de l'atmosphère en interaction turbulente avec 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 concentration des aérosols chute brusquement. Pour détecter ce sommet, l'algorithme de détection analyse le gradient vertical du signal élastique sur la voie parallèle et sa continuité au cours du temps. Ce filtrage bidimensionnel, après seuillage, fournit une estimation des positions des maxima des gradients correspondants aux hauteurs de couche limite. La *figure 4* montre un exemple de détection de la CLA le 1er avril 2012. On observe un cycle typique de couche limite, bien analysé par le gradient 2D. 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 9h (heure locale), la CLA augmente progressivement par la convection progressive et atteint son maximum à 1200 m vers 17-18h.

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. Comme la plupart des nuages sont plus denses que les couches d'aérosols, leur distinction est réalisée par le rapport entre la valeur de la rétrodiffusion atténuée au sommet de la structure et sa valeur à la base [3]. Un détecteur de fausse structure est également mis en place en comparant le niveau de bruit dans la structure et celui du moléculaire autour de la structure. Cet algorithme est appliqué sur les deux voies élastiques afin d'optimiser la détection des structures dépolarisantes (par exemple : cirrus, poussières, cendres volcaniques).

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.

La voie Raman est utilisée pour contraindre la voie élastique afin d'extraire une valeur fiable du coefficient d'extinction (*figure 5*). Afin de valider cette mesure, l'épaisseur optique correspondante a été comparée à celle obtenue avec un photomètre solaire pendant la même période (*figure 6*). La correspondance est bonne avec une erreur relative inférieure à 10 % [4].

La dernière étape est la détermination du rapport de dépolarisation volumique et particulaire à partir des deux voies élastiques en polarisations croisées. Une méthode de calibration détermine et corrige l'interférence entre les deux voies élastiques, afin d'améliorer la mesure absolue du rapport de dépolarisation des aérosols. Ce rapport donne une information cruciale sur la forme des aérosols et contribue à discriminer les types d'aérosols et de nuages.

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

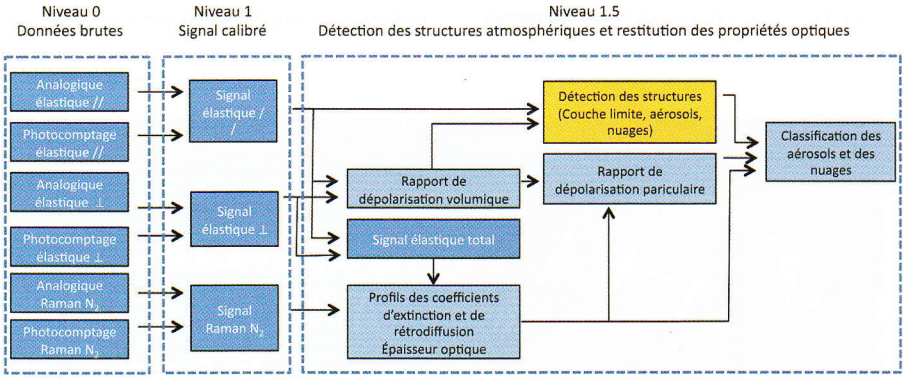


Figure 3. Logigramme des traitements successifs du R-MAN510.

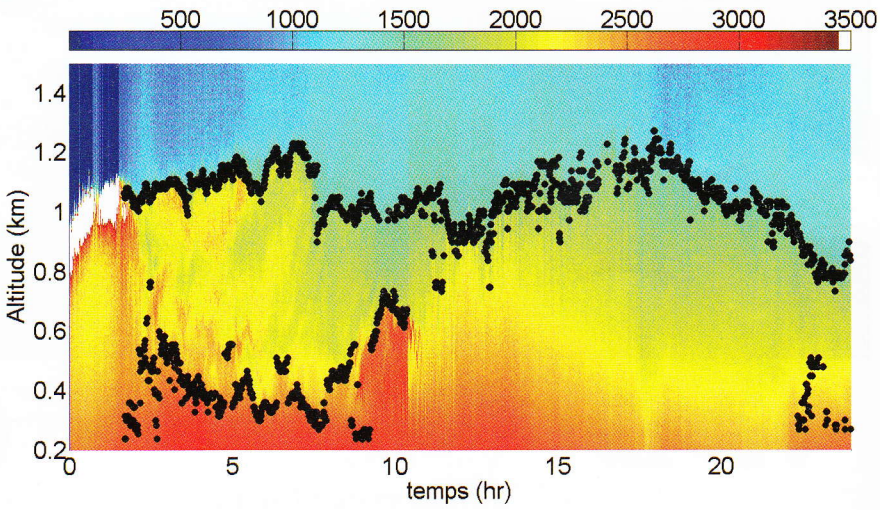


Figure 4. Détection automatique de la couche limite atmosphérique et de la couche résiduelle.

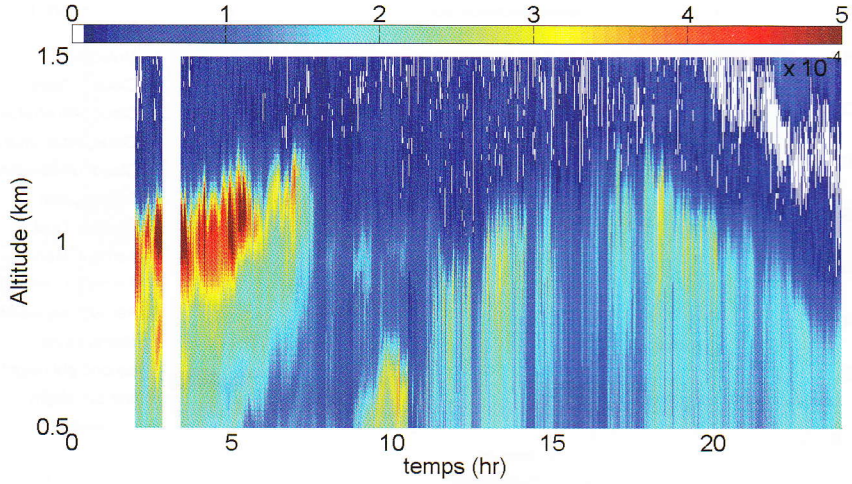


Figure 5. Coefficient d'extinction particulaire dans la couche limite atmosphérique.

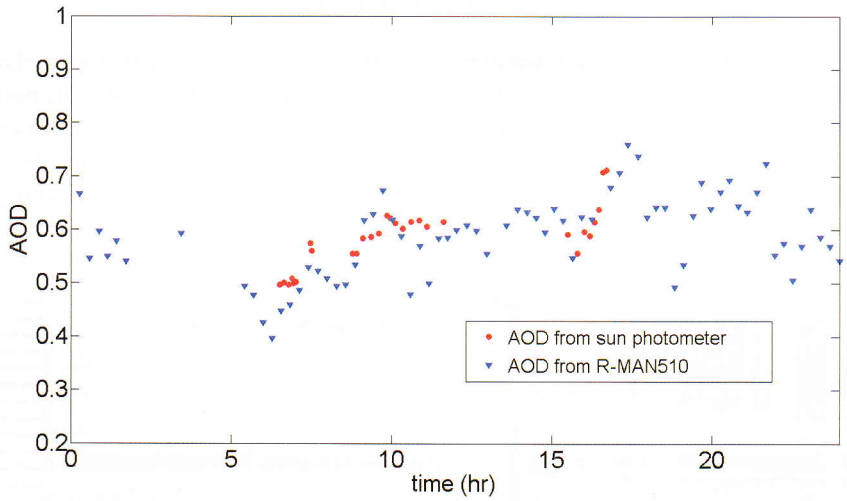


Figure 6. Comparaison de la mesure d'AOD avec un R-MAN510 et un photomètre solaire.

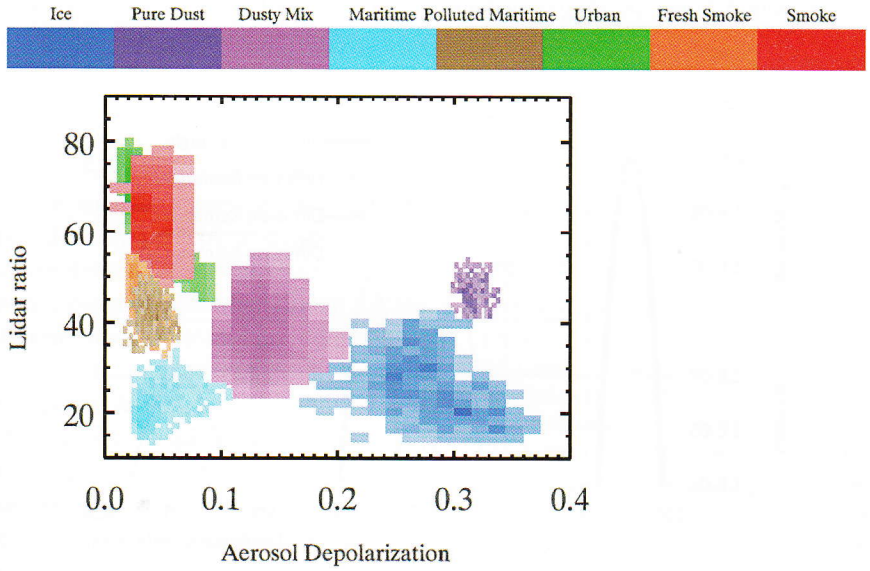
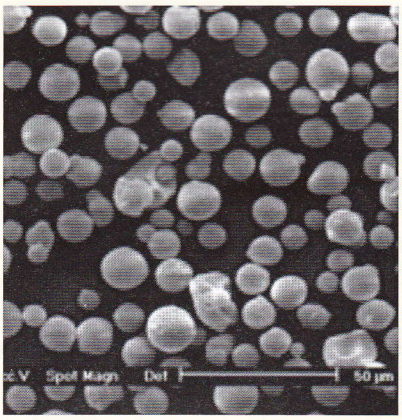
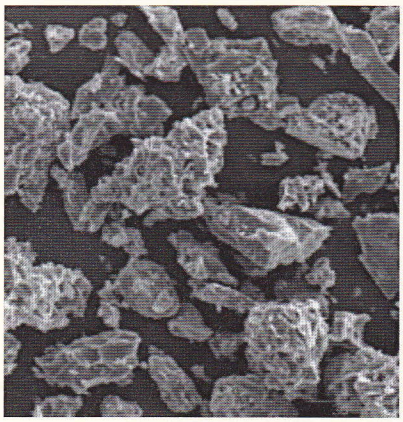


Figure 7. Classification d'aérosols utilisant le rapport lidar et le rapport de dépolarisation [5].

Mesure de dépolarisation

La lumière émise en polarisation linéaire subit une dépolarisation partielle après rétrodiffusion sur les molécules et particules (théorie de Mie). Le taux de dépolarisation dépend de la forme des particules (*voir figure*). Les particules non sphériques (cendres, sables, cristaux de glace) dépolarisent davantage que les particules sphériques (gouttelettes d'eau) et permettent leur classification. La *figure 7* illustre le taux de dépolarisation de différents types d'aérosols.





Exemple de particules sphériques (pollution continentale) et non sphériques (cendres volcaniques).

Classification des aérosols et des nuages

Le rapport lidar LR (rapport entre l'extinction et le coefficient de rétrodiffusion) d'une part et le rapport de dépolarisation particulaire DR d'autre part sont finalement utilisés pour classifier automatiquement les aérosols en quatre catégories [5] : pollution continentale, aérosols marins, poussière et cendres volcaniques (*figure 7*). Les nuages sont classés en quatre catégories : cirrus, altostratus, altocumulus,

nuages bas, à partir de leur altitude et de leur épaisseur optique. Sur l'exemple de la *figure 8*, 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). La *figure 8* illustre la classification d'une couche de sables désertiques grâce à la détection de structures sur les deux voies élastiques de dépolarisation croisée et au calcul du rapport de dépolarisation dans la structure.

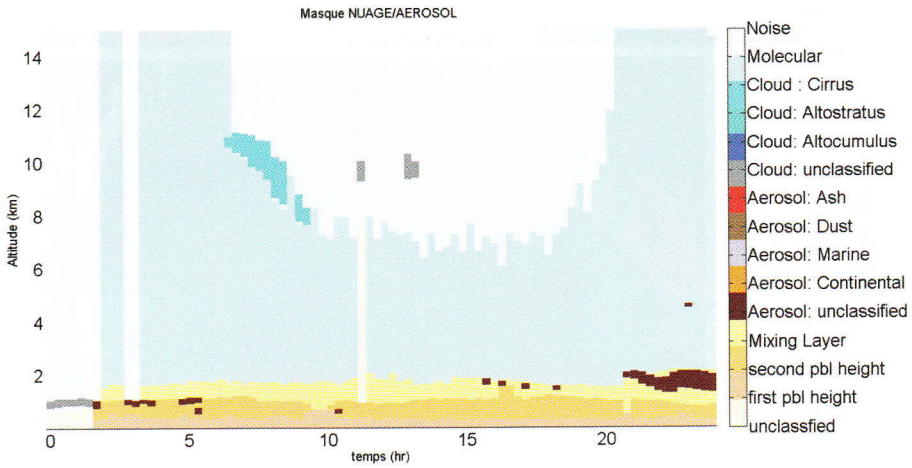


Figure 8. Classification des nuages et des aérosols sur le R-MAN 510 (données du 01/04/2012 à Palaiseau).

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 de recherche utilisant trois voies (deux voies élastiques avec deux polarisations et une voie Raman azote) développé en partenariat avec le LSCE (Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement) [6]. 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 classifier les particules (*figure 9*). Les aérosols observés lors de cette période d'observation étaient des aérosols de pollution, des cristaux de

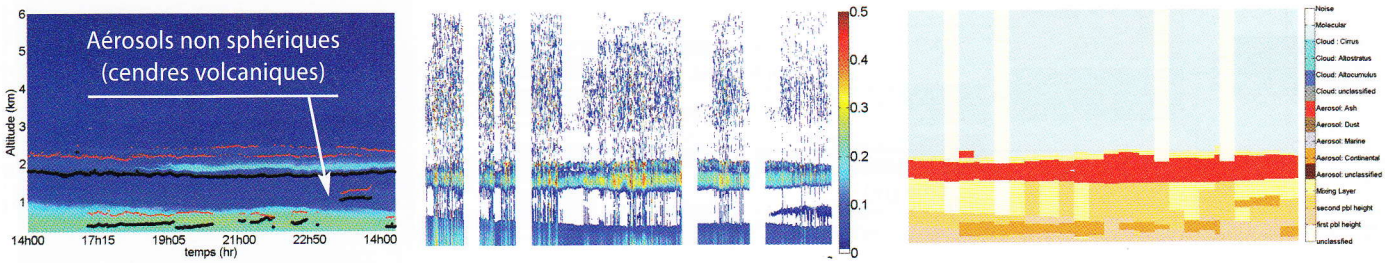
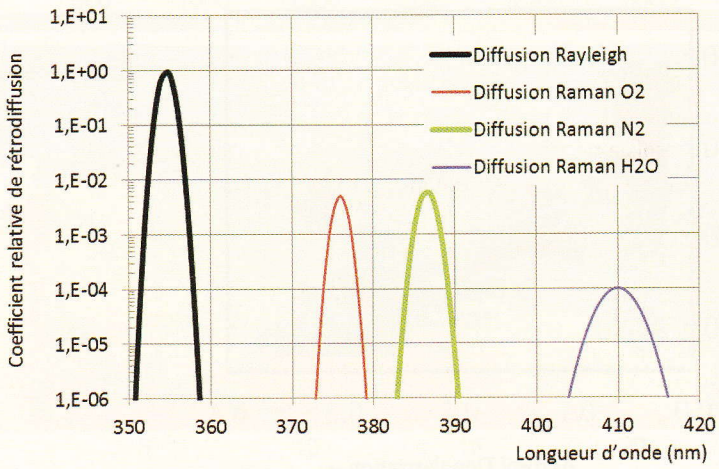


Figure 9. À gauche : cendres du volcan Eyjaföll sur la voie perpendiculaire avec détection automatique base/sommet des aérosols (base en noir, sommet en rouge), avril 2010. Au centre : rapport de dépolarisation particulaire. À droite : spéciation des aérosols.

Mesure Raman

La troisième voie de détection mesure la rétrodiffusion Raman sur les molécules N_2. Cette diffusion est inélastique : la molécule absorbe une partie de l'énergie du photon et réduit la fréquence du rayonnement diffusé. Le nombre d'onde associé à la transition vibrationnelle 0→1 vaut 2330,7 cm^{-1} pour la molécule N_2 ce qui correspond à une longueur d'onde Raman de 386,6 nm pour un laser émettant à 354,7 nm. Bien que 5 fois supérieure à la diffusion à 532 nm, elle reste 200 fois plus faible que la diffusion Rayleigh, limitant la portée de jour (*voir figure*). Cette voie supplémentaire permet cependant de mesurer l'extinction particulaire indépendamment de la diffusion et ainsi de mieux classifier les aérosols.



Position et rétrodiffusion relative des signaux Raman sur les composantes atmosphériques

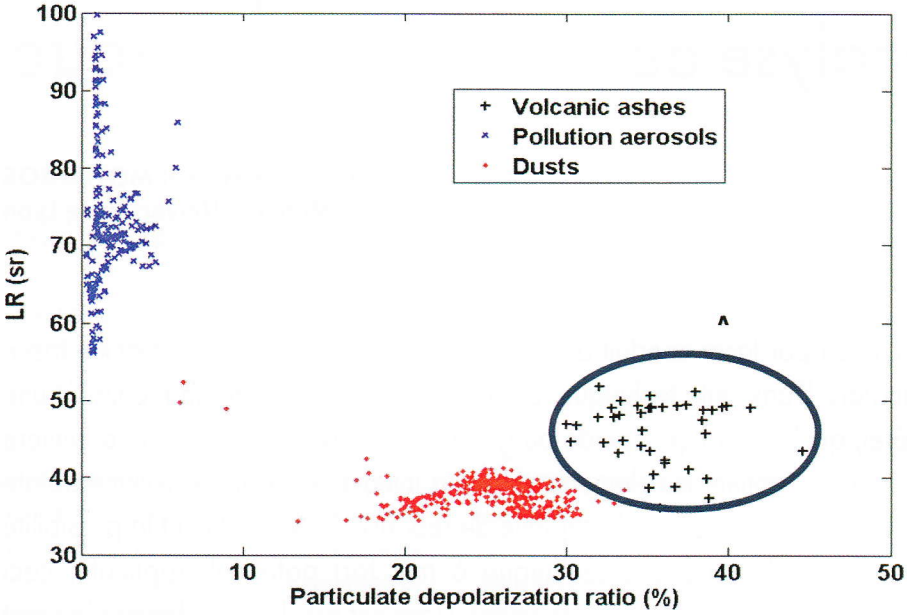


Figure 10. Mesures réalisées lors de l'éruption du volcan Eyjafjallajökull en 2010 rapportées sur un diagramme 2D du rapport lidar LR et du rapport de dépolarisation DR afin de classer les types d'aérosols observés.

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 10*). 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.

Une aide à la décision

Le lidar R-MAN510 contribue à combler un manque dans la mesure et la classification des aérosols à partir du sol. Ce lidar utilise deux voies élastiques en polarisation croisée et une voie Raman azote. Adapté aux futurs réseaux de stations météo, il fournit 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.

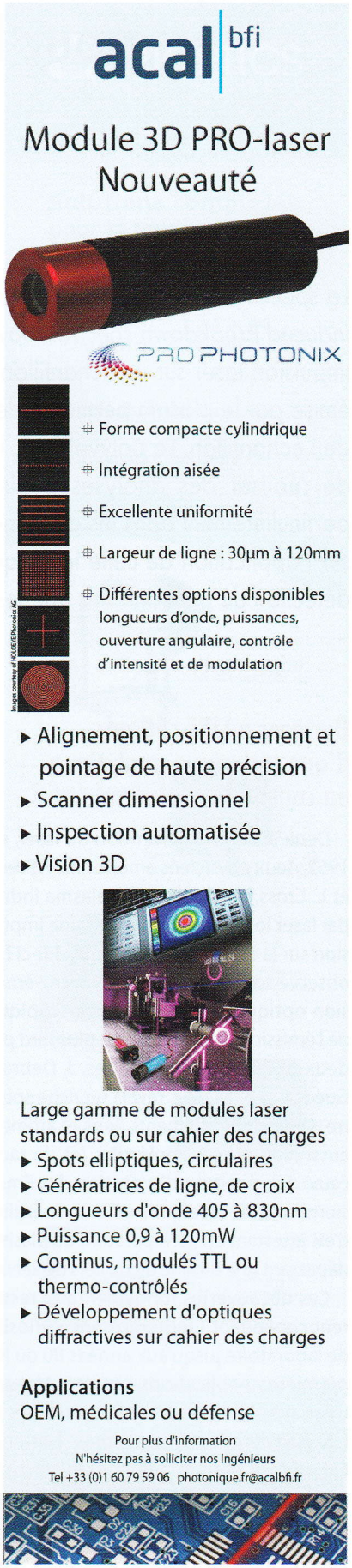
Références

[1] Klett J.D., LIDAR inversions with variable backscatter/extinction values, App. Opt. 24, 1638-1643, 1985

[2] Royer P., 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

[3] Wang Z., K. Sassen, Cloud type and macrophysical property retrieval using multiple remote sensors, Journal of Applied Meteorology, 2001

[4] Raut J.C., 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

[5] Burton S.P., 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] Chazette P., A. Dabas, J. Sanak, M. Lardier, P. Royer, French airborne lidar measurements for Eyjafjallajökull ash plume survey, Atmos. Chem. Phys. 12, 7059-7072, 2012