

Frédéric Laly<sup>1,2\*</sup>, Alexandre Marpillat<sup>1</sup>, Vincent Crenn<sup>1</sup>, Simona Latchabady<sup>1</sup>, Julien Totems<sup>2</sup> et Patrick Chazette<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ADDAIR – 189 rue Audemars, 78530 Buc, France

<sup>2</sup> CEA/LSCE – Orme des Merisiers, 91190 Saint-Aubin, France

\*Courriel de l'orateur : frederic.laly@lsce.ipsl.fr

## TITLE

### Vertical distribution of aerosols in the Annecy valley using lidar measurements

## RESUME

La technique de mesure par lidar permet d'échantillonner de façon résolue différents paramètres atmosphériques comme la vapeur d'eau, la température ou encore de mesurer le contenu en aérosol atmosphérique. Une étude a été menée dans la vallée d'Annecy en juin 2019 où un lidar a fonctionné en continu en synergie avec d'autres moyens de mesure aéroportés, comme un granulomètre FIDAS ou une sonde météo. Une telle mise en œuvre a permis à la fois de déterminer les différentes propriétés des aérosols présents dans la vallée d'Annecy mais également de comprendre la circulation de ces aérosols dans la vallée.

## ABSTRACT

The lidar measurement technique enables various atmospheric parameters such as water vapour and temperature to be sampled with resolution, and atmospheric aerosol content to be measured. A study was carried out in the Annecy valley in June 2019, where a lidar operated continuously in synergy with other airborne measurement resources, such as a FIDAS granulometer or a weather probe. This type of implementation enabled us to determine the various properties of the aerosols present in the Annecy valley, and also to understand how these aerosols circulate in the valley.

**MOTS-CLES** : aérosol, lidar, étude de l'atmosphère / **KEYWORDS**: aerosol, lidar, atmospheric study

## 1. INTRODUCTION

La stratification verticale des aérosols dans la troposphère est peu documentée dans les régions montagneuses, en particulier dans les vallées alpines, qui sont influencées par les vents de vallée et de montagne. Afin d'améliorer notre connaissance des particules piégées dans la vallée d'Annecy, des mesures ont été réalisées par un lidar météorologique Raman au sol et un lidar Rayleigh-Mie à bord d'un avion ultraléger. Elles ont été mises en œuvre au-dessus du lac d'Annecy et de ses alentours en allant jusqu'à la vallée de l'Avre (Chazette and Totems, 2023). Les profils verticaux des propriétés optiques des aérosols ont été dérivés des mesures lidar à 355 nm au cours de la période comprise entre le 13 et le 22 juin 2019. Le contenu en aérosols de fond, avec une épaisseur optique d'aérosol de  $0,10 \pm 0,05$ , correspond à des conditions locales-régionales majoritairement influencées par la pollution anthropique. Les propriétés optiques des aérosols se révèlent particulièrement variables au cours du temps dans l'ensemble de la colonne atmosphérique, avec des rapports lidar moyens variant entre  $40 \pm 8$  et  $115 \pm 15$  sr, et des taux de dépolarisation particulaire entre  $2 \pm 1\%$  et  $35 \pm 2\%$ . De telles variabilités sont liées à des concentrations de particules terrigènes également très variables en fonction des conditions météorologiques synoptiques. L'air au-dessus de la vallée d'Annecy peut en effet être perturbé par les masses d'air qui ont recirculées au-dessus de la vallée, ainsi que par les contributions des vallées voisines. L'apport extérieur peut être beaucoup plus important avec des sources très distantes. Nous avons pu observer une anomalie importante des profils d'aérosols atmosphériques par la suite de l'arrivée d'une masse d'air exceptionnellement sèche (humidité relative  $\sim 30\%$ ), contenant des aérosols identifiés comme provenant du Grand Erg occidental avec des épaisseurs optiques  $\sim 0,5$  et des rapports lidar de  $65 \pm 10$  sr, valeurs en accord avec ce que l'on peut trouver dans la littérature scientifique (Dieudonné et al., 2015; Mallet et al., 2015) pour ce type de particules composées principalement d'argile. La présence d'aérosols d'origine Saharienne en région alpine a été avérée par des mesures sur les glaciers ou dans la neige (Sodemann et al., 2006) dont ils modifient l'albedo et peuvent amplifier la fonte en absorbant une partie des rayonnement solaire et tellurique par la présence d'oxydes de fer.

## 2. LE LIDAR RAMAN

Le lidar WALI (Weather and Aerosol Lidar, <https://metclim-lidars.aeris-data.fr/wali/>) est un système mobile développé au LSCE qui échantillonne la troposphère pour les aérosols (Chazette et al., 2016), la vapeur d'eau (Totems et al., 2019) et la température (Baron et al., 2022). Il fonctionne dans la partie ultraviolette du spectre,

à la longueur d'onde de  $\sim 355$  nm, avec un champ de vision de 2 mrad permettant un recouvrement complet des trajets d'émission et de réception au-delà de  $\sim 200$ -300 m. Plusieurs paramètres optiques de l'aérosol sont extraits de deux canaux à polarisation croisée couplés à un canal Raman sur le diazote de l'air à  $\sim 387$  nm (Royer et al., 2011) : i) le coefficient d'extinction de l'aérosol, ii) le rapport lidar (rapport des coefficients d'extinction et de rétrodiffusion de l'aérosol) qui dépend de la taille et de la composition chimique des particules, iii) le rapport de dépolarisation linéaire en volume, iv) le rapport de dépolarisation linéaire des particules qui permet d'identifier la présence de particules terrigènes et v) l'épaisseur optique de l'aérosol qui renseigne sur le contenu intégré d'aérosol dans la colonne d'air. Le rapport de mélange de la vapeur d'eau est également dérivé des canaux Raman à  $\sim 387$  et  $\sim 407$  nm pour le diazote et la vapeur d'eau, respectivement. La température est dérivée de deux canaux Raman rotationnels combinant les lignes Raman du diazote et du dioxygène à proximité de la ligne élastique de Cabannes centrée à 354,7 nm. L'humidité relative (RH) est calculée en utilisant la mesure du rapport de mélange et la température.

### 3. OBSERVATIONS

Le lidar a fonctionné en continu, même durant les périodes d'orage. Sur la Figure 1 est donné un exemple d'évolutions temporelles obtenues en lien direct avec la pollution particulaire. Les nuages denses vont atténuer le signal lidar et empêchent de voir au-dessus. Néanmoins, des mesures sont possibles sous la pluie (traits marrons/rouges verticaux) mais on a alors une extinction représentative du mélange entre les gouttes de pluie et les aérosols. On peut noter des similitudes de comportement entre l'humidité relative et le coefficient d'extinction. Ce dernier va en effet significativement augmenter en présence de forte valeur d'humidité quand les aérosols sont hydrophiles, et cela principalement dans les basses couches en allant jusqu'à la surface (voir par exemple, les 16 et 17 juin).

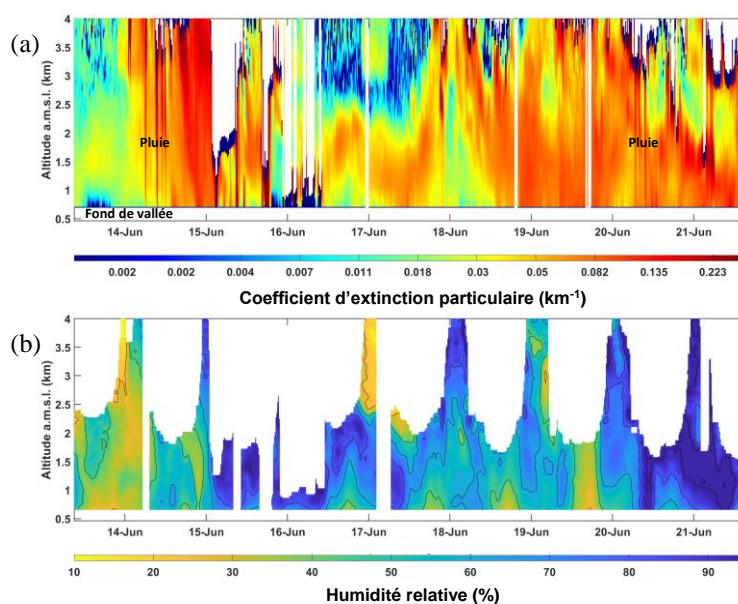


Figure 1. Evolution temporelle du profil vertical a) du coefficient d'extinction des aérosols et b) de l'humidité relative au-dessus de la vallée d'Annecy en juin 2019.

Le 14 juin après-midi, l'extinction est élevée (Figure 2a) montrant la présence d'une plus grande quantité d'aérosols et/ou de plus grosses particules. Ces fortes valeurs ont été observées par le lidar WALI comme par le lidar aéroporté (Chazette and Totems, 2023). Le taux de dépolarisation volumique (Figure 2b) présente effectivement un maximum au-dessus de 3 km d'altitude. Par ailleurs, sur l'aéroplane, un granulomètre FIDAS était également embarqué et a permis de mettre en évidence la présence de plus grosses particules au-dessus de  $\sim 1.5$  km.

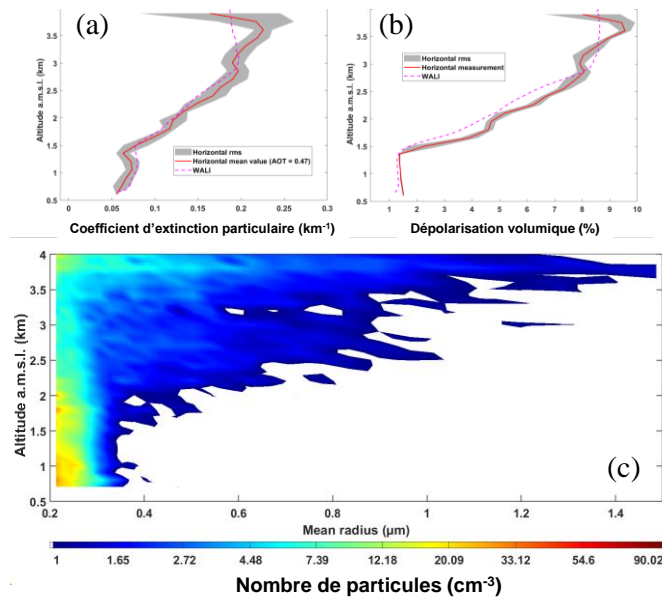


Figure 2. a) profils verticaux du coefficient d'extinction des aérosols et b) de la dépolarisation volumique. Ces profils sont déterminés à partir du lidar sol et du lidar aéroporté. Les incertitudes sur les mesures aéroportées sont indiquées par l'aire en grisée.

La structuration dynamique verticale au-dessus de la vallée d'Annecy explique la séparation observée entre ce qui est plus de l'aérosol de pollution sous ~1.5 km et la présence d'aérosols terrigènes au-dessus. La Figure 3 se repose sur les observations aéroportées et donne une idée de la répartition verticale des couches atmosphériques au-dessus de la vallée. La couche sous 1.5 km est principalement influencée par le lac et la pollution locale. Elle va également être alimentée au-cours de la journée par les vents de vallée montant qui vont transporter les polluants particuliers d'Annecy vers le petit lac. La couche entre 1.5 et 3 km est très sèche et correspond à des masses d'air asséchées au vent de la montagne qui redescendent vers la vallée. Dans le cas présent, elles sont chargées de particules terrigènes entrainées des altitudes supérieures, au-dessus de 3 km. Cette altitude de ~3 km correspond à l'élévation moyenne des montagnes qui représentent une frontière entre les transports régionaux et ceux à plus grande échelle.

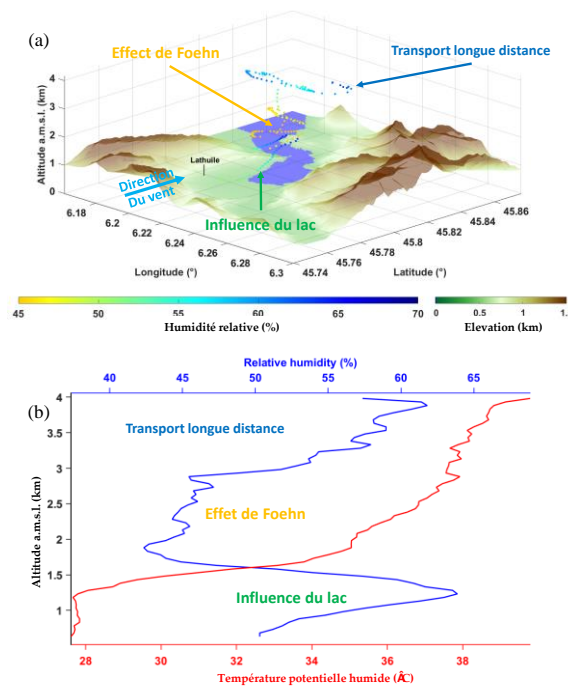


Figure 3. Structuration verticale des couches atmosphériques au-dessus de la vallée d'Annecy lors d'un évènement de transport de poussières sahariennes. a) mesures d'humidité relative effectuées lors d'un vol et b) structures verticales déduites des mesures lidar sol et aéroportée

#### 4. CONCLUSION

Des mesures lidar, il est possible de remonter aux propriétés optiques des aérosols atmosphériques. On peut également en déduire la concentration massique en particules en utilisant un étalonnage comme celui proposé dans Raut et Chazette (2009). Cet étalonnage devra tenir compte du caractère hygroscopique des aérosols afin d'avoir une répartition verticale des concentrations massiques représentatives des aérosols secs. Il est également possible d'identifier les grandes natures d'aérosols : origine marine, pollution ou feux de biomasse et terrigènes (Chazette et al., 2016), et cela par niveau d'altitude. Les mesures lidar ont été souvent utilisées par notre équipe pour suivre la pollution particulaire sur Londres (McMeeking et al., 2012), Paris (Baron et al., 2020) et sur le bassin parisien (Chazette et al., 2017), mais également pour des études climatiques en Afrique sahélienne (Raut and Chazette, 2008), en Arctique (Chazette et al., 2018) et en Inde (Chazette, 2003). La perspective, dans un contexte de changement climatique et la recherche d'un air de meilleure qualité passe par la mise en place de moyens d'adaptation qui doivent se reposer sur une prédictivité fiable des événements intenses de pollution. Cette prédictivité a d'ores et déjà été démontrée comme fortement améliorée via l'utilisation de la mesure lidar par les travaux conduits conjointement par l'Ecole des Ponts et Chaussée et le CEA (Wang et al., 2013). Elle attend les moyens d'être mise en place de manière opérationnelle et à ce que les organismes en charge de la surveillance et de la prévision de la qualité de l'air s'approprient ce type d'approche et en fassent bénéficier la population.

- Baron, A., Chazette, P., and Totems, J.: Remote sensing of two exceptional winter aerosol pollution events and representativeness of ground-based measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 2020.
- Baron, A., Chazette, P., and Totems, J.: Extreme temperature events monitored by Raman lidar: Consistency and complementarity with spaceborne observations and modelling, *Meteorol. Appl.*, 29, 1–26, <https://doi.org/10.1002/met.2062>, 2022.
- Chazette, P.: The monsoon aerosol extinction properties at Goa during INDOEX as measured with lidar, *J. Geophys. Res.*, 108, 4187, <https://doi.org/10.1029/2002JD002074>, 2003.
- Chazette, P. and Totems, J.: Lidar Profiling of Aerosol Vertical Distribution in the Urbanized French Alpine Valley of Annecy and Impact of a Saharan Dust Transport Event, *Remote Sens.*, 15, <https://doi.org/10.3390/rs15041070>, 2023.
- Chazette, P., Totems, J., Ancellet, G., Pelon, J., and Sicard, M.: Temporal consistency of lidar observations during aerosol transport events in the framework of the ChArMEx/ADRIMED campaign at Minorca in June 2013, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 2863–2875, <https://doi.org/10.5194/acp-16-2863-2016>, 2016.
- Chazette, P., Totems, J., and Shang, X.: Atmospheric aerosol variability above the Paris Area during the 2015 heat wave - Comparison with the 2003 and 2006 heat waves, *Atmos. Environ.*, 170, 216–233, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.055>, 2017.
- Chazette, P., Raut, J. C., and Totems, J.: Springtime aerosol load as observed from ground-based and airborne lidars over northern Norway, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 13075–13095, <https://doi.org/10.5194/acp-18-13075-2018>, 2018.
- Dieudonné, E., Chazette, P., Marnas, F., Totems, J., and Shang, X.: Lidar profiling of aerosol optical properties from Paris to Lake Baikal (Siberia), *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 5007–5026, <https://doi.org/doi:10.5194/acp-15-5007-2015>, 2015.
- Mallet, M., Dulac, F., Formenti, P., Nabat, P., Sciare, J., Roberts, G., Pelon, J., Ancellet, G., Tanré, D., Parol, F., Di Sarra, A., Alados, L., Arndt, J., Auriol, F., Blarel, L., Bourriane, T., Brogniez, G., Chazette, P., Chevaillier, S., Claeys, M., D'Anna, B., Denjean, C., Derimian, Y., Desboeufs, K., Di Iorio, T., Doussin, J.-F., Durand, P., Féron, A., Freney, E., Gaimoz, C., Goloub, P., Gómez-Amo, J. L., Granados-Muñoz, M. J., Grand, N., Hamonou, E., Jankowiak, I., Jeannot, M., Léon, J.-F., Maillé, M., Mailler, S., Meloni, D., Menut, L., Momboisse, G., Nicolas, J., Podvin, J., Pont, V., Rea, G., Renard, J.-B., Roblou, L., Schepanski, K., Schwarzenboeck, A., Sellegri, K., Sicard, M., Solmon, F., Somot, S., Torres, B., Totems, J., Triquet, S., Verdier, N., Verwaerde, C., Wenger, J., and Zapf, P.: Overview of the Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment/Aerosol Direct Radiative Forcing on the Mediterranean Climate (ChArMEx/ADRIMED) summer 2013 campaign, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 15, <https://doi.org/10.5194/acpd-15-19615-2015>, 2015.
- McMeeking, G. R. R., Bart, M., Chazette, P., Haywood, J. M. M., Hopkins, J. R. R., McQuaid, J. B. B., Morgan, W. T. T., Raut, J.-C., Ryder, C. L. L., Savage, N., Turnbull, K., and Coe, H.: Airborne measurements of trace gases and aerosols over the London metropolitan region, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 5163–5187, <https://doi.org/10.5194/acp-12-5163-2012>, 2012.
- Raut, J.-C. and Chazette, P.: Radiative budget in the presence of multi-layered aerosol structures in the framework of AMMA SOP-0, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 12461–12528, <https://doi.org/10.5194/acpd-8-12461-2008>, 2008.
- Raut, J.-C. C. and Chazette, P.: Assessment of vertically-resolved PM10 from mobile lidar observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 8617–8638, <https://doi.org/10.5194/acp-9-8617-2009>, 2009.
- Royer, P., Chazette, P., Lardier, M., and Sauvage, L.: Aerosol content survey by mini N2-Raman lidar: Application to local and long-range transport aerosols, *Atmos. Environ.*, 45, 7487–7495, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.001>, 2011.
- Sodemann, H., Palmer, A. S., Schwierz, C., Schwikowski, M., and Wernli, H.: The transport history of two Saharan dust events archived in an Alpine ice core, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 667–688, <https://doi.org/10.5194/acp-6-667-2006>, 2006.
- Totems, J., Chazette, P., and Raut, J. J.-C.: Accuracy of current Arctic springtime water vapour estimates, assessed by Raman lidar, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 145, 1234–1249, <https://doi.org/10.1002/qj.3492>, 2019.
- Wang, Y., Sartelet, K. N. N., Bocquet, M., and Chazette, P.: Assimilation of ground versus lidar observations for PM10 forecasting, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 269–283, <https://doi.org/10.5194/acp-13-269-2013>, 2013.