

## MESURES AEROPORTES DE LA CONCENTRATION ET DE LA TYPOLOGIE DES AEROSOLS ATMOSPHERIQUES PAR LE MINI-COMPTEUR D'AEROSOLS LOAC SOUS BALLONS ET DRONES : PRINCIPAUX RESULTATS

J.-B. Renard\*<sup>1</sup>, F. Dulac<sup>2</sup>, J. Allain<sup>3</sup>, G. Berthet<sup>1</sup>, Jean-Charles Dupont<sup>4</sup>, J. Giacomoni<sup>5</sup>, E. Perraudin<sup>6</sup>, N. Verdier<sup>7</sup> et E. Villenave<sup>6</sup>

<sup>1</sup>LPC2E-CNRS/Université d'Orléans, 45000 Orléans, France

<sup>2</sup>LSCE/CEA, 91191 Gif-sur-Yvette, France

<sup>3</sup>Affrètement Drone et Environnement, 34980 Saint Gély du Fesc, France

<sup>4</sup>SIRTA-LMD, 91128 Palaiseau, France

<sup>5</sup>Aerophile SAS, 75015 Paris, France

<sup>6</sup>EPOC/Université de Bordeaux, 33615 Pessac, France

<sup>7</sup>CNES, 31401 Toulouse, France

\*Courriel de l'orateur : jean-baptiste.renard@cnsr-orleans.fr

### TITLE

**Airborne measurements of the atmospheric aerosol concentrations and typologies with the light aerosol counter LOAC from balloons and drones: main results**

### ABSTRACT

The light aerosols counter LOAC allows us to obtain the concentration and the main typology of the aerosols between 0,2 and 100  $\mu\text{m}$ . Because of its low weight, LOAC can be used under all kinds of atmospheric balloons (tethered balloons, weather balloons, drifting balloons, stratospheric balloons) and onboard drones. LOAC has obtained original measurements of the aerosol content where traditional instrument cannot be operated. Since 2013, more than one hundred of flights have been conducted under free balloons. Above the Mediterranean Sea, LOAC has detected dust particles greater than 20  $\mu\text{m}$  in Saharan plume lifted several days ago. In Iceland, LOAC has performed measurements inside a volcanic plume in the gas-liquid transition zone from, and during an episode of lifted ashes by winds. LOAC is involved in the study of urban pollution up to an altitude of 300 m in Paris and Angers. Finally, LOAC can provide accurate measurement from a drone, as shown above a pine forest.

### RESUME

Le mini-compteur d'aérosols LOAC permet d'obtenir la concentration et la typologie principale des aérosols entre 0,2 et 100  $\mu\text{m}$ . Son faible poids permet de l'embarquer sur tous types de ballons atmosphériques (ballons captifs, ballons météorologiques, ballons dérivants, ballons stratosphériques) et à bord de drones. Depuis 2013, LOAC a permis d'obtenir des mesures inédites sur le contenu en aérosols, là où les instruments classiques ne peuvent accéder. Plus d'une centaine de vols a été effectués sous ballons libres. Au-dessus de la Méditerranée, LOAC a mis en évidence la présence de particules supérieures à 20  $\mu\text{m}$  dans des panaches de poussières sahariennes soulevés plusieurs jours auparavant. En Islande, il a effectué des mesures dans un panache volcanique dans la zone de condensation des gaz et lors d'un re-soulèvement de cendres volcanique. LOAC participe aussi aux études d'événements de pollution urbaine jusqu'à 300 m d'altitude dans Paris et Angers. Enfin, il peut effectuer des mesures précises à bord de drones, comme l'a montré une campagne de mesures au-dessus des pins dans les Landes.

**KEYWORDS:** balloon, drone, dust, volcano, pollution / **MOTS-CLÉS :** ballon, drone, poussière, volcan, pollution.

### 1. CONTEXTE DES MESURES

La mesure précise in situ de la taille, de la concentration et de la nature des aérosols au sein de l'atmosphère est nécessaire pour caractériser les sources, étudier les processus de transports horizontaux et verticaux, et déterminer l'évolution de la nature des particules durant leur cycle atmosphérique. Un grand nombre de mesures a été effectuées dans le passé depuis des avions, principalement dans la troposphère (e.g. Denjean et al., 2016) et depuis des gros ballons stratosphériques (Deshler *et al.*, 2003 ; Renard *et al.*, 2008). Ces mesures souffrent néanmoins de fortes contraintes. Le coût des heures de vols avion ou de lancements de ballons stratosphériques limitent le nombre de sessions de mesures possibles, le prélèvement depuis des avions peut engendrer un risque de perte des plus grosses particules, et les conditions opérationnelles limitent les régions de l'atmosphère étudiées (par exemple, quelques sites dans le monde pour le lancement des gros ballons, l'impossibilité de voler en avion dans les plus basses couches de l'atmosphère notamment en zone urbaine). Ainsi, il s'est avéré nécessaire de développer un mini-compteur d'aérosols de quelques centaines de gramme, ayant une consommation électrique faible, pouvant être

embarqué sous tous types de ballons et à bord de drones légers, et pouvant utiliser une télémesure pour envoyer les données.

## 2. L'INSTRUMENT LOAC

LOAC est un mini-compteur d'aérosols permettant de déterminer la concentration en aérosols dans 19 gammes de taille entre 0,2 et environ 100  $\mu\text{m}$ , principalement pour des particules irrégulières (Renard *et al.*, 2016a). L'originalité de l'instrument est d'effectuer à deux angles la mesure de la lumière diffusée par des particules passant dans un faisceau laser. Le premier, vers 15°, mesure la diffraction (qui ne dépend pas de l'indice de réfraction) et permet d'accéder à la taille des particules quelque soient leur nature. Le deuxième angle, vers 60°, mesure un flux diffusé qui dépend fortement de l'indice de réfraction des particules ; la combinaison avec la mesure à 12° permet d'accéder à la typologie dominante des particules si le milieu est plutôt homogène, par comparaison à des mesures de références obtenues en laboratoire.

Développé dans le cadre d'une ANR Ecotech et d'un partenariat public-privé, LOAC est maintenant un instrument commercial produit et commercialisé par les sociétés Environnement-SA et MeteoModem. Il est ainsi possible d'effectuer des campagnes de mesures avec un grand nombre d'exemplaires dont certains pourraient être perdus, notamment lors de lancements insulaires ou de vols au-dessus de l'océan.

LOAC a effectué depuis 2013 (Renard *et al.*, 2016b) des mesures en continu au sol et en vol à bord du ballon touristique Generali (Paris) et depuis 2016 au ballon Terra Botanica (Angers). Il a effectué en France et à l'étranger des vols ponctuels sous ballons captifs légers, plus d'une centaine de vols sous des ballons météorologiques pouvant atteindre la moyenne stratosphère, des vols sous des ballons troposphériques plafonnant et dérivant, et a été implanté dans des nacelles poly-instrumentées sous ballons stratosphériques ouverts. Des essais ont aussi été menés avec succès sous drones. La nacelle générique pèse 1 kg incluant la télémesure et les batteries. La figure 1 montre le LOAC sous différents ballons et à bord d'un drone.

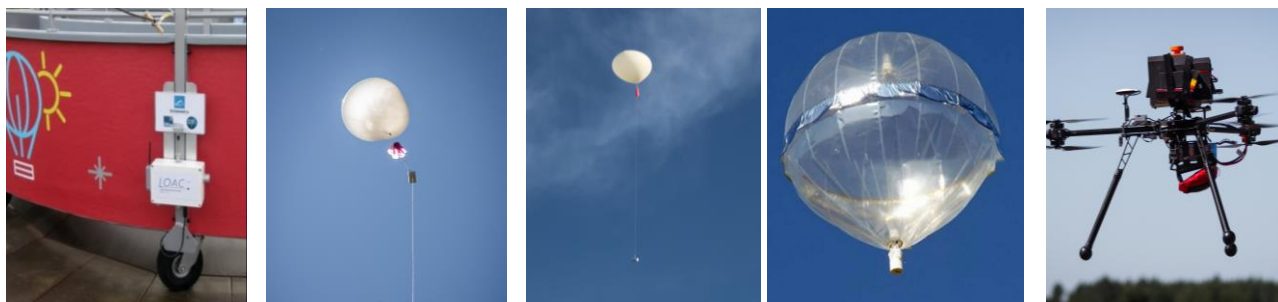


Figure 1 : De gauche à droite : LOAC à bord du ballon touristique de Paris, sous ballon captif, sous ballon météo, sous ballon troposphérique dérivant, et sous drone

## 3. PRINCIPAUX RESULTATS

La première utilisation d'envergure du LOAC a eu lieu lors de la campagne ChArMEX/ADRIMED pour l'étude des aérosols méditerranéens, dans le cadre du programme MISTRALS. 20 vols sous ballons météorologiques et 13 vols sous ballons troposphériques dérivants ont été effectués depuis Minorque et l'île du Levant à l'été 2013 (Mallet *et al.*, 2016). Il a ainsi été possible d'étudier l'extension verticale des panaches de poussières sahariennes (Figure 2) ainsi que leur évolution temporelle à altitude constante (Figure 3). Le résultat principal est la mise en évidence de particules supérieures à 20  $\mu\text{m}$  alors qu'elles avaient été soulevées plusieurs jours auparavant, ainsi que l'absence de sédimentation rapide (Renard *et al.*, 2017).

LOAC effectue depuis début 2014 un suivi du contenu en aérosols dans la haute troposphère jusqu'à la moyenne stratosphère, avec environ 20 vols par an depuis la base de lancement du CNES à Aire sur l'Adour (Landes). Des vols sont aussi effectués de manière ponctuelle à d'autres latitudes (île de la Réunion, Islande, Inde) afin d'étudier des phénomènes spécifiques, telles que la production des aérosols tropicaux, le vortex polaire, des panaches d'aérosols volcaniques injectés dans la basse stratosphère, et la mousson. Ces vols sous ballon météorologique ont aussi permis en Islande pour la première fois de traverser un panache volcanique dans la zone de condensation des gaz, ainsi qu'un épisode de re-soulèvement de cendres volcaniques.

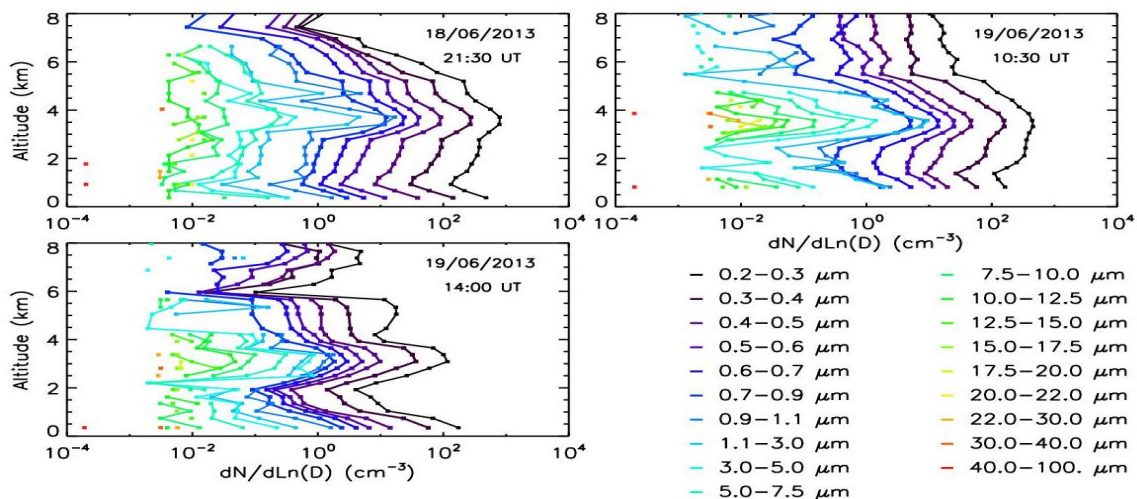


Figure 2 : Exemple de l'évolution verticale au cours du temps de la concentration en poussières sahariennes dans un panache lors de 3 vols sous ballons météorologiques entre le 18 et le 19 juin 2013 depuis Minorque, d'après Renard *et al.* (2017). La couche saharienne se situe entre 1-2 et 5-7 km d'altitude

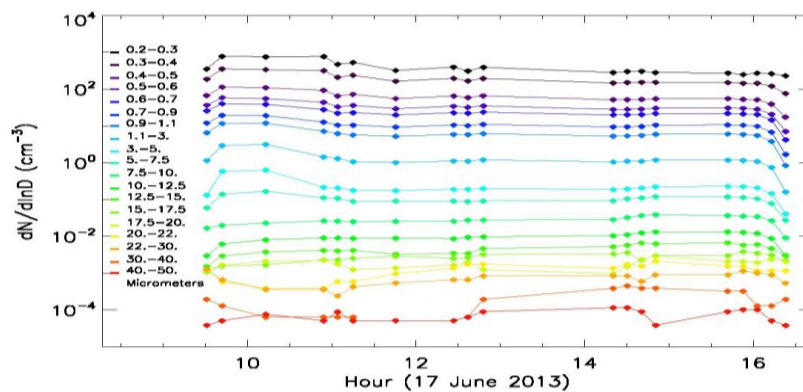


Figure 3 : Exemple de l'évolution temporelle de la concentration en poussières dans un panache à altitude constante (2 km), le 17 juin 2013 depuis Minorque d'après Renard *et al.* (2016b)

Les mesures au Ballon Generali (Ballon touristique de Paris) ont permis d'étudier les épisodes de forte pollution en particules de ces dernières années depuis le sol jusqu'à 300 m d'altitude, et de mettre en évidence des tendances saisonnières en situation de fond pour les différentes gammes de tailles (Figure 4). Ces mesures, qui peuvent être converties en masse par unité de volume, s'inscrivent dans un « réseau LOAC » avec deux instruments sous ballons touristiques (Paris et Angers) et deux au sol (SIRTA Palaiseau et CNRS Orléans), ce qui permet de distinguer les épisodes de pollution locale de ceux à l'échelle nationale. Des vols ballons captifs ont été aussi effectués au SIRTA pour étudier les épisodes de brouillards.

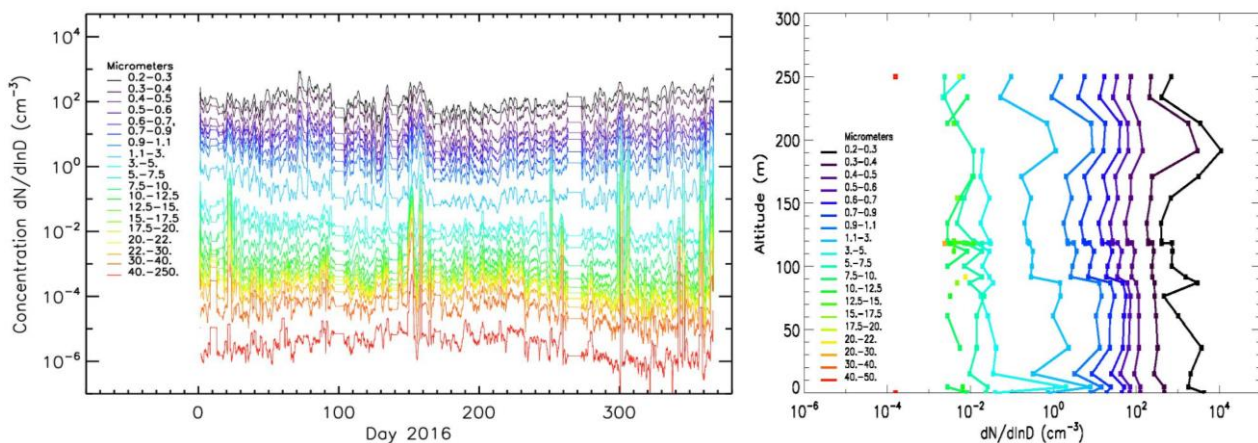


Figure 4 : Gauche : Evolution temporelle de la concentration pour les 19 gammes de taille, au Ballon Generali (Ballon touristique de Paris) ; droite : exemple de profil vertical lors d'un épisode de pollution (11 décembre 2013) d'après Renard *et al.* (2016b)

Enfin, des mesures ont été menées à l'été 2017 dans les Landes, dans le cadre de la campagne Landex, pour étudier l'émission des aérosols organiques par les pins. LOAC a été utilisé sous ballon captif mais aussi à bord d'un drone, jusqu'à 150 m d'altitude. La comparaison des résultats avec les deux types de porteur a permis de valider le système de prélèvement sous drone. Le drone a survolé une forêt de pins, ce que ne permet pas le ballon captif ; de plus, contrairement au ballon captif, le drone peut effectuer des sessions de mesures même en situation de vent fort.

#### 4. CONCLUSION

Ces exemples d'utilisation de LOAC montrent la possibilité d'effectuer des mesures dans des conditions géophysiques très variées sous des porteurs différents. Le faible poids de LOAC et sa précision de mesures ont permis d'obtenir des mesures inédites. Certains LOAC ont été perdus à cause du lieu de lancement, d'autres comme ceux lâchés en France ont pu être récupérés et effectuer plusieurs re-vols. Enfin, la robustesse de l'instrument et de la nacelle ont permis de faire des lâchers sous ballon météorologique dans des conditions vent forts à environ 15 m/s (Figure 5).



Figure 5 : Lâcher de LOAC en Islande le 12 janvier 2016 en Islande, avec un vent au sol d'environ 15 m/s

Les différentes campagnes de LOAC ont été financées par le CNRS, le CNES, l'ANR, le labex VOLTAIRE et l'Adème.

Denjean, C. et al. (2016), *Atmos. Chem. Phys.* 16, 1081–1104.

Deshler, T., Hervig, M. E., Hofmann, D. J., J. Rosen, M., and Liley, J. B (2003), *J. Geophys. Res.* 108, D5, 4167.

Mallet M. et al. (2016), *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 455-504.

Renard, J.-B et al. (2008), *J. Geophys. Res.*, 113, D21303.

Renard, J.-B. et al. (2016a), *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 1721-1742.

Renard, J.-B. et al. (2016b), *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 3673-3686.

Renard, J.-B. et al. (2017), *Atmos. Chem. Phys.*, soumis.