Pollution atmosphérique
ISSN : 2268-3798
Publisher : Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique

236 | 2018
Varia

Un système mobile pour l'étude de la distribution verticale des aérosols dans l'atmosphère : description et premiers résultats

A mobile system for the study of vertical distribution of aerosols in the atmosphere: description and first results

Ioana Popovici, Philippe Goloub, Augustin Mortier, Thierry Podvin, Luc Blarel, Rodrigue Loisil, Christine Deroo, Stéphane Victori, Benjamin Torres, Florin Unga and Marie Choël

https://www.peren-revues.fr/pollutionatmospherique/6510

DOI : 10.4267/pollution-atmospherique.6510

Electronic reference
Ioana Popovici, Philippe Goloub, Augustin Mortier, Thierry Podvin, Luc Blarel, Rodrigue Loisil, Christine Deroo, Stéphane Victori, Benjamin Torres, Florin Unga and Marie Choël, « Un système mobile pour l'étude de la distribution verticale des aérosols dans l'atmosphère : description et premiers résultats », *Pollution atmosphérique* [Online], 236 | 2018, Online since 15 septembre 2018, connection on 25 février 2026. URL : https://www.peren-revues.fr/pollutionatmospherique/6510

Copyright
CC-BY

Un système mobile pour l'étude de la distribution verticale des aérosols dans l'atmosphère : description et premiers résultats

A mobile system for the study of vertical distribution of aerosols in the atmosphere: description and first results

Ioana Popovici, Philippe Goloub, Augustin Mortier, Thierry Podvin, Luc Blarel, Rodrigue Loisil, Christine Deroo, Stéphane Victori, Benjamin Torres, Florin Unga and Marie Choël

OUTLINE

1. Introduction
2. Description du système mobile et instruments
3. Résultats
   3.1 Mesures mobiles dans la région Hauts-de-France
   3.2. Mesures mobiles sur l'axe nord-sud, France
4. Conclusions

TEXT

1. Introduction

1 Depuis leurs sources, les particules atmosphériques (ici les aérosols) sont transportées et mélangées à différents niveaux de l'atmosphère et peuvent atteindre à nouveau le sol soit par dépôts secs ou humides. Néanmoins, certaines particules injectées plus haut dans l'atmosphère peuvent y résider pour une plus longue période, en l'absence des processus de dépôt efficaces. Selon leurs propriétés optiques et microphysiques, ces particules affectent plus ou moins la propagation du rayonnement solaire et donc le bilan radiatif de la Terre (Boucher *et al.*, 2013). Il est donc important de mieux connaître la distribution verticale des aérosols pour en déterminer plus précisément les impacts à chaque niveau de l'atmosphère. La qualité de l'air est un autre domaine où le système mobile peut enrichir les dispositifs existants – la plupart des particules résidant près de la

surface – et ont donc un impact sur la santé humaine (Kampa *et al.*, 2008).

2 Pour étudier la répartition verticale de ces particules, une technique appelée LiDAR[1] est utilisée, technique permettant de détecter et caractériser à distance les particules dans l'atmosphère. Ces instruments sont installés dans des laboratoires de recherche ou bien au sein de services d'observations météorologiques, et certains sont organisés en réseaux.

3 Les réseaux de LiDAR existants sont constitués de LiDAR mono-longueur ou multi-longueurs d'onde. La plupart d'entre eux sont des instruments complexes nécessitant une maintenance régulière et un environnement contrôlé, et sont donc principalement installés dans des laboratoires dédiés. Par conséquent, les profils mesurés sont obtenus sur des sites fixes. Néanmoins la répartition des aérosols en altitude peut devenir très variable horizontalement dans le cas d'un événement soudain (épisode de pollution, émission de poussières ou de particules de fumée de biomasse, éruption volcanique, de transports à grande distance et dispersion de polluants à partir de leur région source). Dans ces situations, les observations de terrain sont très importantes, et la variabilité spatiale impossible à évaluer seulement à partir d'un point fixe.

4 L'observation mobile est alors l'une des meilleures solutions pour établir l'étendue de tels évènements et d'en étudier les gradients régionaux. Si des LiDAR pouvaient être rapidement déployés, le nombre d'applications s'accroîtrait rapidement, s'étendant de la validation satellitaire et des modèles à l'étude détaillée des panaches sur des sites industriels.

5 Habituellement, le terme « mobile » fait référence à des LiDAR qui scannent l'atmosphère, mais sur un point fixe, et à des systèmes transportables (mesure LiDAR ou mesure *in situ*) utilisés pour réaliser des mesures en des points éloignés, au cours de campagnes ou simplement à l'extérieur de laboratoire. D'autres travaux décrivent des laboratoires mobiles réalisant des mesures LiDAR (Raut *et al.*, 2009 ; Dieudonné *et al.*, 2015) et des mesures *in situ* gaz/particules (Bukowiecki *et al.*, 2002 ; Drewnick *et al.*, 2012) pendant le déplacement du véhicule. Cependant, la possibilité de déployer des

LiDAR, ainsi que d'autres instruments pour des mesures mobiles, n'est pas assez exploitée.

6 Pour la première fois, la description d'un système mobile compact dédié à des mesures sur route, intégrant un LiDAR et un photomètre solaire automatique et des compteurs de particules, est présentée ici. L'originalité du système repose principalement sur le photomètre solaire, capable de suivre le soleil et effectuer des mesures pendant le mouvement du véhicule et sur la synergie entre le LiDAR et le photomètre pour déterminer les profils du coefficient d'extinction des aérosols et de la concentration en masse tout au long du parcours.

7 Dans cet article, nous présenterons d'abord la configuration actuelle du système mobile. Ensuite, des résultats de campagnes mobiles réalisées en France en 2016 et 2017 illustreront l'usage et l'intérêt du système mobile pour l'étude de l'atmosphère. Enfin, la discussion portera sur la détermination de la concentration en masse à partir des profils LiDAR.

2. Description du système mobile et instruments

8 La plupart des LiDAR mobiles déployés dans des campagnes de terrain sont des équipements imposants qui nécessitent de grands véhicules pour les transporter (semi-remorque) d'un lieu à un autre. Comparé à de tels systèmes, le système mobile présenté ici, MAAMS (*Mobile Automated Aerosol Monitoring System*) est compact, robuste et facilement déployé. Le système mobile est construit autour d'un véhicule léger standard (Renault Kangoo) équipé d'un LiDAR, d'un photomètre solaire et d'instruments pour les mesures *in situ* des aérosols. Une vue générale de ce système est présentée sur la figure 1. Le coffre du véhicule a été modifié pour permettre l'installation des équipements. De plus, le véhicule a été équipé d'une batterie spécifique (12V/300Ah AGM), d'un convertisseur 12-220V et d'une sonde isocinétique adaptée au prélèvement d'air extérieur requis par certaines mesures *in situ*.



Figure 1. Photographies du système mobile et des instruments installés à l'intérieur et l'extérieur de la voiture : (a) télescope LiDAR (émission - réception), (b) unité de contrôle et acquisition du LiDAR, (c) batterie, (d) onduleur, (e) compteur optique de particules (mesures *in situ*), (f) camera, (g) antenne 3G, (h) station météorologique (mesures p, T, RH), (i) boîtes pour les boussoles de PLASMA, (j) dômes de protection pour PLASMA, (k) photomètre solaire PLASMA, (l) GPS.
Photographs of the mobile system and the components mounted inside and outside the vehicle: (a) LiDAR transmitter-receiver optical head, (b) LiDAR control and acquisition unit, (c) battery, (d) power inverter, (e) optical particle counter, (f) action camera, (g) 3G antenna, (h) meteorological probe, (i) housing for PLASMA's compass, (j) protection domes for PLASMA, (k) PLASMA sunphotometers, (l) GPS.

9 Le LiDAR intégré dans la charge utile du MAAMS est le modèle CE370 commercialisé par CIMEL Électronique (www.cimel.fr). C'est un LiDAR aérosols à rétrodiffusion élastique émettant à 532 nm. Le système utilise un laser Nd :YAG pompé par diode, émettant 20 µJ à une fréquence de 4.7 kHz. Par construction, l'optique de réception et d'émission (télescope) est commune et est connectée à l'unité de contrôle et d'acquisition par l'intermédiaire d'une fibre optique de 10 m. Le télescope dispose d'un diamètre de 200 mm et un champ de vue de 55 µrad pour réduire la contribution du fond atmosphérique.

10 La lumière laser rétrodiffusée est mesurée par un détecteur photodiode à avalanche (APD), opéré en mode comptage des photons. Ce LiDAR permet de sonder l'atmosphère jusqu'à 20 km d'altitude avec une résolution verticale de 15 m. Son autonomie, sa légèreté, sa compacité et sa sécurité oculaire lui permettent d'être utilisé sans autorisation spécifique, ce qui est tout à fait adéquat pour un système mobile amené à se déplacer sur alerte. L'unité de contrôle et d'acquisition du LiDAR intégrant les composants optiques et électroniques est installée sur un support atténuant les vibrations mécaniques liées au mouvement du véhicule. Il en est de même du télescope. De plus, le concept d'optique commune pour les parties émissions et réception élimine les problèmes de désalignement optique, fréquent pour les autres systèmes.

11 Le photomètre solaire PLASMA (*Photomètre Léger Aéroporté pour la Surveillance des Masses d'Air*) (Karol *et al.*, 2013), développé par le laboratoire d'optique atmosphérique, est utilisé pour mesurer l'épaisseur optique aérosols (AOD) spectrale dans l'intervalle de longueurs d'onde 0.34-1.64 µm. L'épaisseur optique exprime la charge en aérosols dans l'atmosphère, intégrée depuis le sol jusqu'au sommet de l'atmosphère. Plus l'AOD est élevée, plus le rayonnement solaire arrivant à la surface est atténué. PLASMA peut effectuer des rotations en élévation (0-88°) et azimut (0-360°) pour suivre le soleil au cours du mouvement du véhicule, ce qui rend l'instrument adapté pour des applications mobiles.

12 L'OPC-N2 est un compteur de particules conçu par Alphasense (www.alphasense.com). Il mesure la distribution en taille des particules entre 0.38 et 17 µm de rayon, à l'aide de 16 canaux de taille avec une période de 6 secondes, dans un flux de 1.2 L/min. Un second compteur de particules, mini-WRAS, commercialisé par GRIMM, a également été installé dans MAAMS. Il mesure la distribution en taille plus finement avec 40 canaux répartis entre 10 nm et 25 µm, avec une période de mesure d'une minute pour un flux identique de 1.2 L/min. Une petite station météorologique est installée sur le véhicule pour mesurer la température, l'humidité relative et la pression. Enfin, MAAMS est équipé d'un système de navigation GPS pour cartographier les déplacements, et d'une petite caméra pour enregistrer la couverture nuageuse.

13 Les données acquises sont transférées dans la base de données du laboratoire d'optique atmosphérique, en utilisant une clef 3G, et sont traitées dans la foulée.

3. Résultats

14 Le système mobile MAAMS a été déployé dans le Nord de la France aux printemps et été 2015-2017, périodes pendant lesquelles les niveaux de concentration aérosols sont généralement élevés. L'existence d'un axe autoroutier important entre Lille et Dunkerque permet d'échantillonner facilement et rapidement cette région, sur une distance moyenne d'une centaine de kilomètres. Dans cette section, nous nous focalisons sur deux exemples de mesures mobiles. Le premier est centré sur l'analyse de la journée du 26 août 2016 qui présente une grande variabilité spatiale régionale entre Lille et Dunkerque à un moment où le niveau de concentration en particules au sol prédit par les modèles de qualité de l'air était important. Avec le second exemple, nous illustrerons la variabilité spatiale révélée, à plus grande échelle, par les mesures *in situ* au cours d'un plus long trajet nord-sud sur le territoire français.

3.1 Mesures mobiles dans la région Hauts-de-France

15 Le système mobile a été déployé 26 août 2016 entre Lille (LL) et Dunkerque (DK), à 80 km au nord-ouest de Lille, lors d'un évènement de pollution prévu par ATMO HDF. La figure 2 montre les profils verticaux de signal rétrodiffusé LiDAR (RCS – *Range Corrected Signals*) enregistrés le long de ce parcours aller-retour. Des concentrations d'aérosols plus élevées ont été observées à et près de Lille, entre 11h et 12h, jusqu'à 1 km d'altitude et diminuaient en allant vers la côte (Dunkerque - DK). De plus, en dehors de la région lilloise, la présence de plusieurs couches d'aérosols réparties jusqu'à 5 km d'altitude est observée. Ces couches sont plus difficiles à détecter à Lille à cause de l'opacité plus grande de la couche limite atmosphérique à Lille.

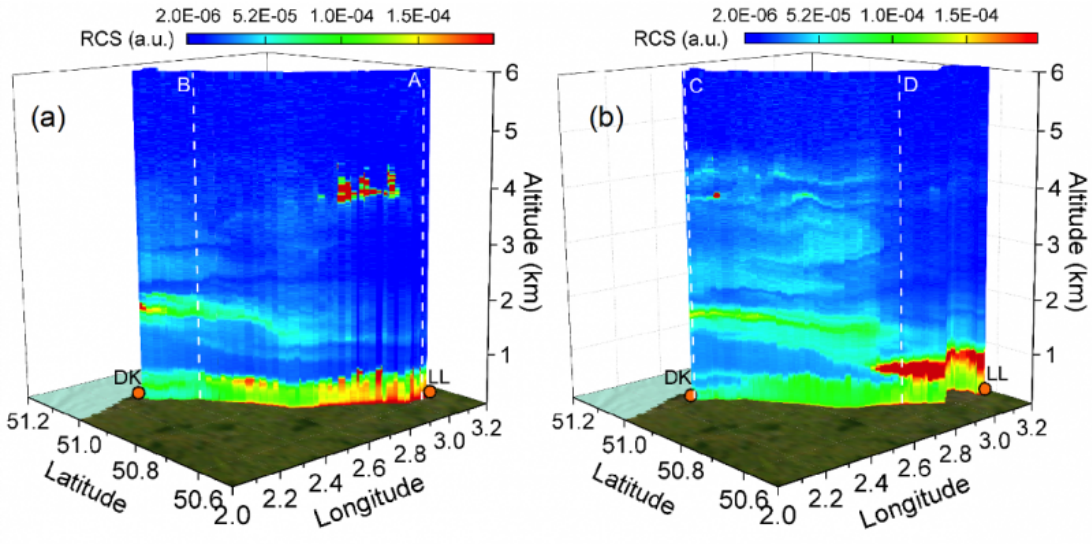

Figure 2. Représentation 3D de l'intensité laser rétrodiffusée par l'atmosphère vers le système mobile pour la journée du 26 août 2016 sur les trajets : (a) Lille (LL)-Dunkerque (DK), entre 11h00 et 12h30 TU et (b) Dunkerque (DK)-Lille (LL), entre 14h30 et 16h00 TU. Les lignes pointillées en blanc et les lettres (A, B, C, D) indiquent la localisation géographique correspondant aux profils choisis pour l'analyse. La couleur rouge correspond à un signal laser rétrodiffusé intense associé à une concentration en particule élevée.

3D colour-coded spatial variability of LiDAR range-corrected signals (RCS) along: (a) Lille (LL)-Dunkerque (DK), (b) Dunkerque (DK)-Lille (LL) transects. The white dotted lines and letters (A, B, C, D) indicate the location of the profiles chosen for analysis.

16 La figure 3 montre l'épaisseur optique en aérosols (AOD – *Aerosol Optical Depth* en anglais) et le coefficient d'Angstrom (AE – *Angstrom Exponent* en anglais) déduits de mesures du photomètre PLASMA en utilisant le système de traitement d'AERONET (*AErosol RObotic NETwork* [2]).

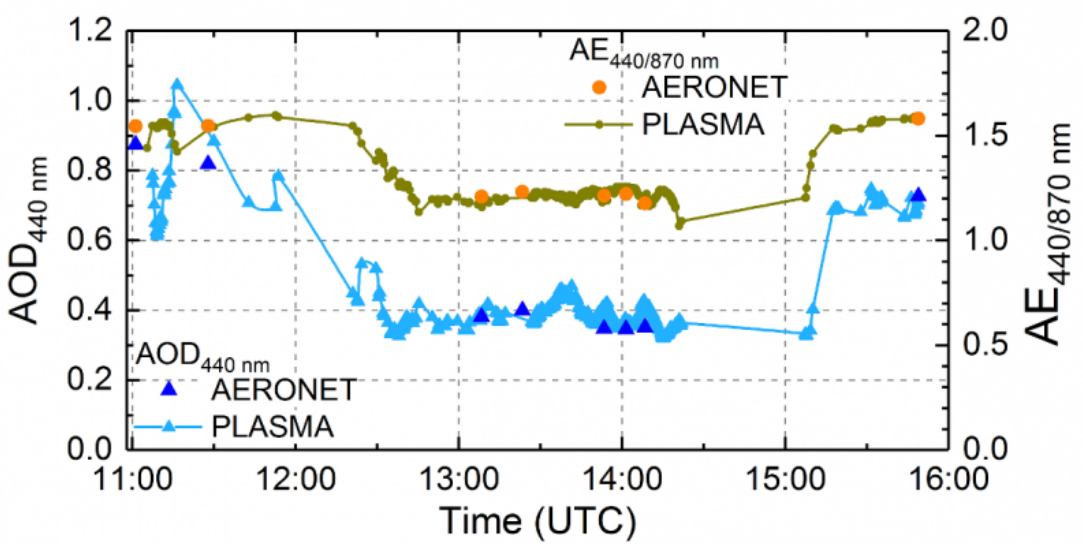

Figure 3. Epaisseur optique en aérosols (AOD en anglais) à la longueur d'onde de 440 nm et coefficient d'Angstrom calculé entre 440 et 870 nm (AE en anglais) déterminés à partir des mesures PLASMA sur le trajet aller-retour Lille-Dunkerque. Les valeurs enregistrées aux stations fixes du réseau AERONET sont reportées comme valeurs de référence.

AOD (440 nm) and Extinction Angström Exponent (AE) values measured by PLASMA on the round-trip between Lille and Dunkerque. Values from AERONET stations are also reported as reference.

Une forte variabilité peut être observée entre Lille et Dunkerque. Des valeurs d'AOD aussi élevées que 0.6-0.8 ont été mesurées à Lille et ses environs entre 11h00 et 11h30 UTC et ont ensuite chuté rapidement jusqu'à 0.37 lorsque le système mobile arrivait à Dunkerque vers 13h00 UTC. De plus, les valeurs du coefficient d'Angstrom (AE) proche de 1.4-1.6 à Lille ont baissé jusqu'à 1.2 à Dunkerque, ce qui indique une variation des propriétés microphysiques (principalement la dimension des particules) des aérosols dans la colonne le long du trajet. Les valeurs du coefficient d'Angstrom à Lille indiquent une prédominance des particules fines sur la colonne atmosphérique, tandis que la baisse des valeurs de ce paramètre le long du trajet vers Dunkerque indique une contribution plus importante sur le mode grossier de la distribution en taille des particules.

Durant presque une heure (13h07-14h UTC) de mesures stationnaires à Dunkerque, l'AOD est resté stable autour de 0.40. Au cours du trajet de retour à Lille, l'AOD a de nouveau augmenté jusqu'à 0.75 et l'AE jusqu'à 1.6.

Par ailleurs, une très bonne cohérence est observée, pour les épaisseurs optiques aérosols et le coefficient d'Angstrom, entre les mesures PLASMA et les mesures des photomètres standard CIMEL CE318 des stations AERONET les plus proches, ce qui confirme, une fois de plus, la fiabilité des mesures photométriques mobiles.

Les profils de coefficient d'extinction aérosols (figure 4) ont ensuite été déterminés en combinant les mesures LiDAR et photométriques avec l'algorithme BASIC (Mortier, 2013 ; Mortier *et al.*, 2013). L'interprétation physique quantitative et précise du signal LiDAR à rétrodiffusion élastique (donnant la distribution verticale en couches) nécessite le recours à un algorithme itératif (BASIC) et à la mesure de l'épaisseur optique, qui correspond à l'intégrale du coefficient d'extinction sur la colonne atmosphérique. Seule la combinaison des deux permet de profiler le coefficient d'extinction aérosols avec un niveau de confiance compatible avec la précision recherchée pour le calcul de la concentration en particules.

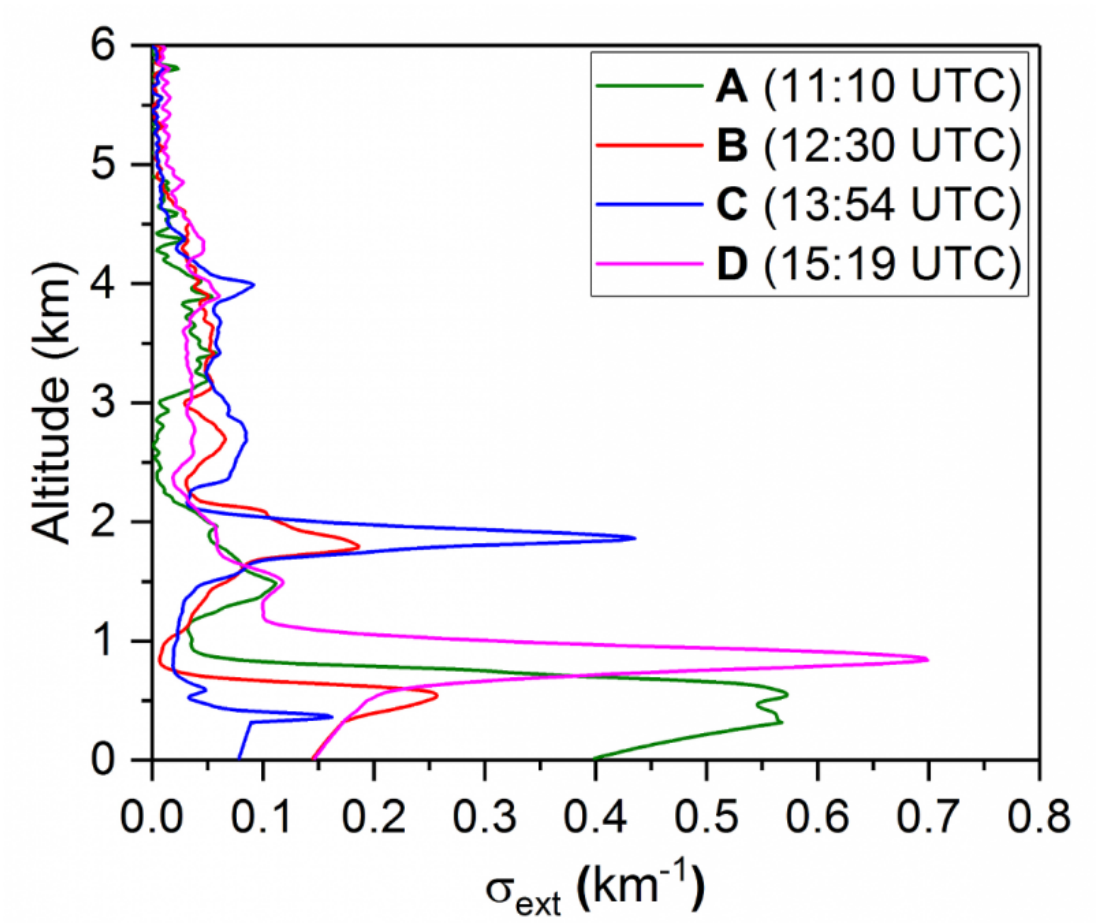

Figure 4. Profils du coefficient d'extinction déterminés par la synergie LiDAR-photomètre. Les lettres (A, B, C, D) correspondent aux localisations géographiques indiquées sur la figure 2.
Extinction coefficient profiles derived from LiDAR – sunphotometer measurements. The letters (A, B, C, D) correspond to the locations indicated on figure 2.

Les profils obtenus pour les différentes positions géographiques révèlent la présence de plusieurs couches aérosols. La première couche s'étendant de la surface jusqu'à 1 km est la couche limite atmosphérique dont la hauteur diminue jusqu'à 0.6 km à DK (contraste entre site « continental » et « côtier »). Une seconde couche est observée sur les profils A et D à 1.5 km, mais avec un léger décalage en altitude entre B et C (1.8 km). Une troisième couche est enfin détectée entre 2 et 5 km. L'analyse des rétro-trajectoires des masses d'air et des prévisions fournies par les modèles de transport de poussières désertiques montre que cette couche serait composée d'aérosols d'origine saharienne. Plusieurs instruments en fonctionnement sur les régions côtières ont aussi observé cette intrusion de poussières. Des évènements de transport à grande distance sont observés assez régulièrement dans le Nord de la France à l'aide d'instruments de télédétection comme les LiDAR.

La mise à niveau de MAAMS avec un LiDAR à 2 longueurs d'onde avec dépolarisation (CIMEL, modèle CE376) financé par le projet CPER CLIMIBIO sera très utile pour analyser encore plus finement ce type de situations atmosphériques complexes. Cette information permettra de mieux distinguer le type de particules à chaque altitude.

Enfin, la figure 5 présente les distributions en taille (parfois aussi appelées granulométries aérosols) intégrées sur la colonne atmosphérique, déduites des mesures d'épaisseurs optiques spectrales inversées à l'aide de l'algorithme GRASP (*Generalized Retrieval of Aerosol and Surface Properties*) (Torres *et al.*, 2017). Les valeurs intégrées verticalement de la distribution peuvent être ainsi obtenues en plusieurs points du trajet.

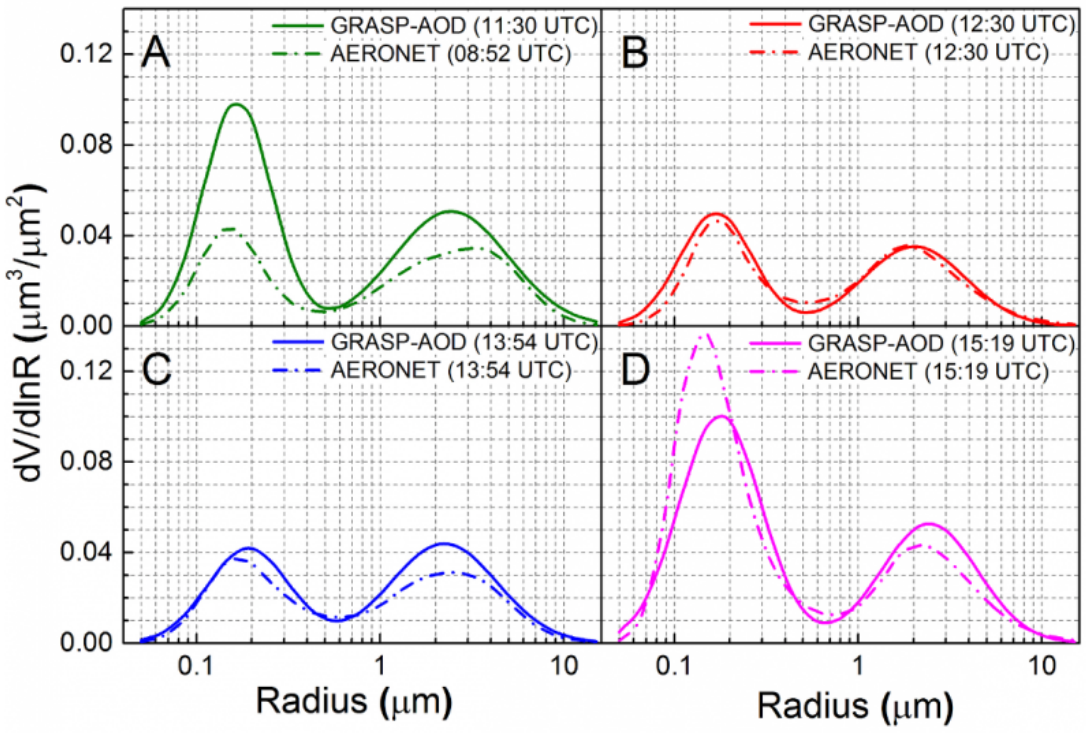

Figure 5. Distributions en taille intégrées sur la colonne atmosphérique, déterminées par GRASP-AOD à partir des mesures AOD du photomètre PLASMA. Les distributions en taille restituées par les inversions AERONET pour les stations fixes les plus proches sont illustrées comme référence. Les lettres (A, B, C, D) correspondent aux localisations géographiques indiquées sur la figure 2.

Size distributions retrieved by GRASP-AOD using AOD from PLASMA sun-photometer. The size distributions from the closest AERONET inversions are also represented as a reference. The letters (A, B, C, D) correspond to the locations indicated on figure 2.

À Lille et ses alentours (A, D) les modes fin et grossier sont observés dans la distribution en taille, avec cependant une prédominance du mode fin. Pour Dunkerque, les modes fin et grossier présentent des amplitudes similaires. Ces résultats sont en très bon accord avec les valeurs fournies par le réseau AERONET pour les stations correspondantes.

17 L'algorithme d'inversion GRASP a été développé par le laboratoire d'optique atmosphérique[3]. De plus, une application web a été développée afin d'utiliser directement l'inversion GRASP-AOD sans avoir besoin d'installer tout le code GRASP[4]. Un système de traitement communautaire des données photométriques et LiDAR est en cours

de développement au Centre de données et de services pour l'atmosphère AERIS/ICARE [5].

3.2. Mesures mobiles sur l'axe nord-sud, France

18 Dans ce second exemple, nous illustrons des mesures *in situ* réalisées, en France, lors d'un long trajet sur l'axe nord-sud. Dans cet exemple, nous montrons comment l'une des composantes du système mobile permet de révéler, sur un long trajet, la variabilité de la concentration en particules au sol. Cette mesure est complémentaire des mesures de télédétection réalisées car elle s'effectue dans la zone aveugle du LiDAR (entre la surface et les 200 premiers m). Elle permet également de vérifier l'ordre de grandeur de la concentration en particule estimée par le couplage LiDAR-photomètre en son point le plus proche de la surface.

19 Le prélèvement de l'air extérieur s'effectue, au cours du mouvement du véhicule, grâce à une sonde isocinétique adaptée à des vitesses allant jusqu'à 25 m/s. La figure 6 présente les cartes de concentrations en masse PM_{10}, $PM_{2.5}$ et PM_1, en $\mu g/m^3$, calculées à partir des concentrations en nombre et distributions en taille mesurées par le compteur de particules GRIMM mini-WRAS au cours du trajet durant la période 03-08 juillet 2017. Les mesures montrent que les niveaux de concentration en masse n'étaient pas élevés à l'aller le 3 juillet 2017 sur le trajet Lille-Toulouse, avec des niveaux de PM_{10} et $PM_{2.5}$ inférieurs à 30 $\mu g/m^3$ sur une grande partie du trajet. Sur le trajet de retour (Aix-en-Provence-Lille), les 7 et 8 juillet 2017, une augmentation des valeurs PM_{10}, $PM_{2.5}$ et PM_1 est observée, ce qui est cohérent avec les prévisions des modèles de chimie-transport prédisant une augmentation de PM_{10} sur l'Est du pays. Les pics de concentration en masse des particules correspondent aux grandes villes traversées au cours du périple et sont marqués par des valeurs PM_{10} supérieures à 50 $\mu g/m^3$ (Paris, Toulouse, Lyon). Les mesures mobiles ont été réalisées principalement sur les autoroutes, ce qui explique les niveaux relativement élevés des particules fines (PM_1 et $PM_{2.5}$).

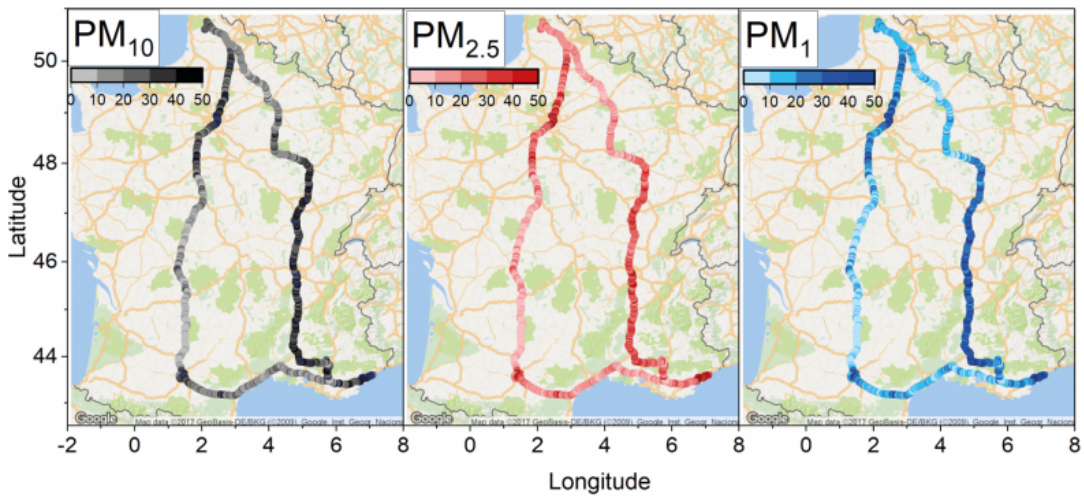

Figure 6. Distribution spatiale des mesures PM_{10}, $PM_{2.5}$ et PM_1 : concentration en masse des particules en µg/m^3 à partir des mesures mobiles réalisées durant la période 3-8 juillet 2017.

Spatial distribution of PM_{10}, $PM_{2.5}$ and PM_1 measurements: particle mass concentration in µg/m^3 from mobile measurements performed in the 3-8 July 2017 period.

Les profils verticaux de concentration en masse aérosols sont accessibles à partir des profils de coefficient d'extinction déterminés par la synergie LiDAR-photomètre si nous disposons d'informations sur la microphysique des aérosols sur la colonne ou si certaines hypothèses sont faites sur le modèle microphysique particulaire. Celles-ci sont choisies selon le type d'aérosol prédominant sur le site considéré (aérosol urbain, aérosol maritime, poussières désertiques, etc.).

Les stations de mesures de la qualité de l'air régies par les AASQA régionales sont certes distribuées sur tout le territoire mais couvrent partiellement la variabilité spatiale, d'où l'intérêt de mesurer leur concentration en masse à l'aide du système mobile.

Pour valider notre mesure de concentration en masse à partir des mesures LiDAR-photomètre, nous avons considéré des mesures en statique à Toulouse, le 4 et 5 juillet 2017. La comparaison des mesures PM_{10} du compteur mini-WRAS réalisées au niveau du sol avec les valeurs de concentration en masse déterminées à partir de profils LiDAR est illustrée sur la figure 7.

Pour déterminer la concentration en masse, nous avons choisi un modèle microphysique d'aérosols à l'aide d'informations disponibles sur la colonne atmosphérique fournies par le photomètre. Nous avons considéré la distri-

bution en taille (figure 7c et 7d) et l'indice de réfraction complexe restitués par la mesure photométrique du réseau AERONET la plus proche dans le temps et une masse volumique d'aérosol de 1.7 g/cm^3 pour le mode fin et le mode grossier. Cette valeur a été choisie pour être cohérente avec les calculs de PM_{10} du mini-WRAS.

Une très bonne corrélation est observée entre les valeurs de concentration issues des mesures *in situ* et celles déduites par télédétection. Ceci démontre l'intérêt et les perspectives du couplage LiDAR/photomètre pour profiler verticalement la concentration en aérosols le long des trajets du système mobile. Ceci permettra d'obtenir une information sur les points géographiques qui ne sont pas couverts par les mesures *in situ* organisés en réseaux.

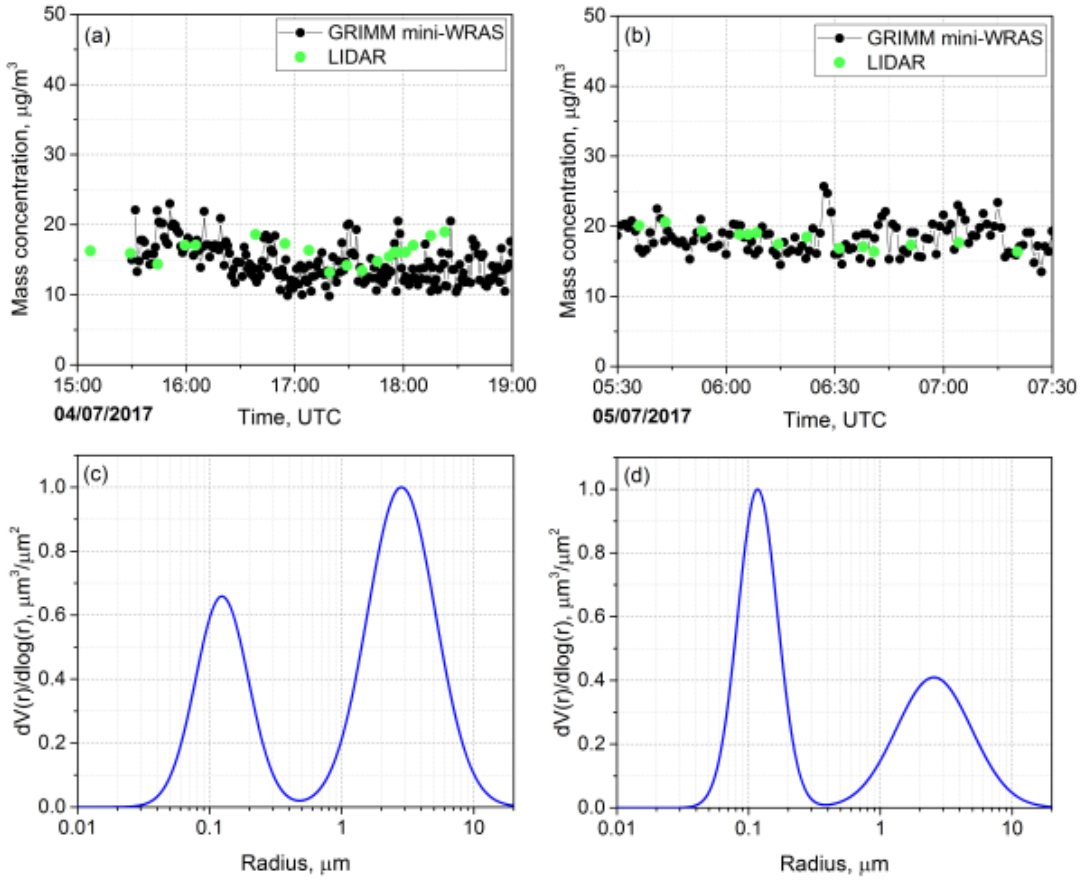

Figure 7. (a) Mesures PM_{10} du compteur de particules mini-WRAS (noir) et estimation de la concentration en masse au niveau du sol à partir des mesures LiDAR (vert), le 4 juillet 2017, en statique, à Toulouse. (b) Mesures PM_{10} du

compteur de particules mini-WRAS (noir) et estimation de la concentration en masse au niveau du sol à partir des mesures LiDAR (vert), le 5 juillet 2017, en statique, à Toulouse. (c) Distribution en taille normalisée restituée par l'inversion AERONET pour le 4 juillet 2017, 18h07 UTC. (d) Distribution en taille normalisée restituée par l'inversion AERONET pour le 5 juillet 2017, 06h23 UTC.

(a) PM_{10} measurements by particle counter mini-WRAS (black) and estimation of the mass concentration at ground level from LiDAR measurements (green) on 4 July 2017, stationary, at Toulouse. (b) PM_{10} measurements by particle counter mini-WRAS (black) and estimation of the mass concentration at ground level from LiDAR measurements (green) on 5 July 2017, stationary, at Toulouse. (c) Normalized size distribution from AERONET inversion on 4 July 2017, 18:07 UTC. (d) Normalized size distribution from AERONET inversion on 5 July 2017, 06:23 UTC.

4. Conclusions

20 Ce travail décrit le système MAAMS et présente des résultats démontrant son intérêt et sa robustesse pour des applications mobiles. Les exemples de campagnes de mesures révèlent la variabilité spatiale observable lors d'évènements de pollution et permettent de cartographier le gradient ville-campagne.

21 Les résultats en Hauts-de-France ont permis de révéler des variations de l'épaisseur optique aérosols (AOD) à 440 nm de 0.32 à 1.04 sur une distance d'à peine 80 km parcourue en un peu moins de 50 minutes, avec une forte variabilité des profils verticaux aérosols. La présence de poussières désertiques ente 2 et 5 km est également révélée, ce qui, ajouté à un évènement de pollution local important, illustre un cas intéressant de variabilité spatiale et verticale.

22 Le deuxième exemple illustre la variabilité de PM_x sur un grand trajet sur le territoire de la France en juillet 2017, avec des concentrations en masse relativement faibles, en dessous de 50 $\mu g/m^3$. Les mesures ont permis de visualiser et de quantifier le gradient entre grandes villes, leurs banlieues et campagnes environnantes. Finalement, la méthodologie utilisée pour déterminer la concentration en masse à partir des mesures LiDAR–photomètre montre son potentiel pour restituer des profils de concentration le long des trajets.

*Les auteurs remercient l'*ANRT *et* CIMEL Électronique *pour leurs supports financiers (bourse de thèse de I. Popovici). Le Labex* CaPPA *est également remercié, ainsi que le Service National d'Observation* PHOTONS-AERONET *de l'*INSU-CNRS, *ainsi que le projet H2020* ACTRIS-2.

BIBLIOGRAPHY

Boucher O, Randall D, Artaxo P *et al.*, 2013 : Clouds and Aerosols. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner GK et al. (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

Bukowiecki N, Dommen J, Prévôt AS *et al.*, 2002: A mobile pollutant measurement laboratory – measuring gas phase and ambient concentrations with high spatial and temporal resolution, *Atmospheric Environment*, 36, 5569-5579.

Dieudonné E, Chazette P, Marnas F *et al.*, 2015: Lidar profiling of aerosol optical properties from Paris to Lake Baikal (Siberia), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 5007-5026.

Drewnick F, Böttger T, von der Weiden-Reinmüller SL *et al.*, 2012: Design of a mobile aerosol research laboratory and data processing tools for effective stationary and mobile field measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 1443-1457.

Kampa M, Castanas E, 2008: Human health effects of air pollution, *Environmental Pollution*, 151, 362-267.

Karol Y, Tanré D, Goloub P *et al.*, 2013: Airborne sun photometer PLASMA: concept, measurements, comparison of aerosol extinction vertical profile with lidar, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 2383-2389.

Mortier A, Goloub P, Podvin T *et al.*, 2013: Detection and characterization of volcanic ash plumes over Lille during Eyjafjallajokull eruption, *Atmosheric Chemistry and Physics*, 13, 3705-3720.

Mortier A, 2013 : Tendances et variabilités de l'aérosol atmosphérique à l'aide du couplage Lidar/Photomètre sur les sites de Lille et Dakar, these, université de Lille, 260 p.

Raut JC, Chazette P, 2009: Assessment of vertically-resolved PM_{10} from mobile lidar observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 8617-8638.

Torres B, Dubovik O, Fuertes D *et al.*, 2017: Advanced characterization of aerosol properties from measurements of spectral optical depth using the GRASP algorithm, *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 3743-3781.

NOTES

1 La télédétection LiDAR (acronyme en anglais « *Light Detection And Ranging* ») est une technique de mesure à distance basée sur l'émission, puis la réception d'un faisceau laser. La diffusion atmosphérique (dans ce cas, par les particules, gouttelettes d'eau ou cristaux) renvoie une partie du faisceau incident vers l'émetteur. L'analyse du signal rétrodiffusé permet de déterminer la distance au volume diffusant ainsi que les propriétés optiques ou microphysiques des particules.

2 https://aeronet.gsfc.nasa.gov

3 Il est accessible au public à http://www.grasp-open.com

4 L'application peut être trouvée à www.grasp-open.com/aod-inversion

5 L'ensemble des mesures LiDAR du LOA est également disponible à l'adresse : http://www-loa.univ-lille1.fr/observations/reseau_lidar.html

ABSTRACTS

Français

Les particules atmosphériques sont distribuées à tous les niveaux, du sol jusqu'à parfois très haute altitude (20 km), et les variabilités spatiale et verticale de leurs propriétés sont encore mal connues car difficiles à appréhender. Les systèmes d'observation mobiles sont des outils apportant davantage d'information sur les propriétés optiques et microphysiques des particules dans et entre les différentes positions qu'ils occupent. Nous présentons la description et des exemples de mesures d'un système mobile composé d'instruments de télédétection (LiDAR commercial CIMEL et photomètre solaire) et *in situ* (compteur de particules). L'originalité de ce système réside dans sa capacité à effectuer ces mesures pendant le mouvement du véhicule, sur route en l'occurrence. Nous présentons les premiers résultats issus de campagnes de mesures dans la région Hauts-de-France et sur un grand axe nord-sud, en France.

English

Particles in the atmosphere are distributed at every level, from ground to high altitude, and the spatial and vertical variability of their properties is still poorly investigated. Mobile observation systems are robust tools that can bring more information on optical and microphysical properties of particles in different locations. We present here the description of the mobile system, which consists of remote sensing (commercial CIMEL LiDAR and sunphoto-

meter) and in situ (particle counter) instruments. The originality of this system lies in its ability to perform measurements during movement of the vehicle on roads. Furthermore, we present first results from measurement campaigns in Hauts-de-France region and along the North-South axis of France.

INDEX

Mots-clés
concentration en masse, LiDAR, mesures embarquées, photomètre solaire, variabilité spatiale, variabilité verticale

Keywords
LiDAR, mass concentration, mobile measurements, spatial variability, sunphotometer, vertical variability

AUTHORS

Ioana Popovici
Université de Lille, CNRS, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, France
Cimel Électronique, Paris, France
ie.popovici (at) ed.univ-lille1.fr

Philippe Goloub
Université de Lille, CNRS, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, France

Augustin Mortier
Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway

Thierry Podvin
Université de Lille, CNRS, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, France

Luc Blarel
Université de Lille, CNRS, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, France

Rodrigue Loisil
Université de Lille, CNRS, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, France

Christine Deroo
Université de Lille, CNRS, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, France

Stéphane Victori
Cimel Électronique, Paris, France

Benjamin Torres
GRASP-SAS, Remote Sensing Developments, université de Lille, France

Florin Unga
Université de Lille, CNRS, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, France

Marie Choël
Université de Lille, CNRS, Laboratoire de Spectroscopie Infrarouge et Raman, Lille, France