

DEVELOPPEMENT ET SIMULATION D'UN NOUVEL OPC DEDIE AUX ATMOSPHERES PLANETAIRES

I. Aenishanslin^{1,2}, N. Verdier², G. Berthet¹, F. Colin¹, J.B. Renard¹, C. Agrapart¹

¹ LPC2E, CNRS, 45000 Orléans, France

² CNES, 31400 Toulouse, France

*Courriel de l'orateur : ian.aenishanslin@cnrs-orleans.fr

TITLE

Development and simulation of a new OPC dedicated to planetary atmosphere

RESUME

Cette étude présente le développement d'un nouveau compteur de particule optique (SPOC : Speciation and Particule sizing Optical Counter) dédiée à métrologie in-situ des aérosols en atmosphère planétaire. En s'appuyant sur le concept du LOAC, l'architecture générale a été repensée entièrement pour optimiser les performances et rendre ce nouvel instrument robuste à l'environnement spatial. Des simulations sont également développées pour accompagner le dimensionnement et modéliser la réponse instrumentale. Les premiers tests de performances du prototype sont présentés.

ABSTRACT

This study presents the development of a new optical particle counter (SPOC : Speciation and Particule sizing Optical Counter) dedicated to in-situ aerosol metrology in planetary atmosphere. Building on the proven concept of LOAC, the general architecture has been completely redesigned to optimize performance and make this new instrument robust to the space environment. Simulations are also developed to consolidate the design and model the instrumental response. The first performance tests of the prototype are presented.

MOTS-CLÉS: aérosol, compteur, OPC, spéciation, granulométrie

KEYWORDS: aerosol, counter, OPC, speciation, granulometry

1. LES COMPTEURS D'AEROSOLS OPTIQUES POUR L'ANALYSE DE COMPOSITION ATMOSPHERIQUE

En planétologie comme en science de l'atmosphère terrestre, l'étude des aérosols devient un sujet d'étude de plus en plus important. A l'échelle des planètes, les aérosols impactent le bilan radiatif total et le climat en plus d'être au cœur de multiples procédés chimiques et dynamiques au sein de leurs atmosphères. La caractérisation de ces aérosols, au travers de différentes techniques de mesure, apparaît donc pertinente afin de mieux comprendre et modéliser les atmosphères planétaires. Pour ce faire, différentes technologies éprouvées de mesures des aérosols existent pour réaliser des mesures intégrées sur un certain volume d'atmosphère (spectromètre, photomètre ...) ou des mesures in situ de propriétés optiques et microphysiques (Optical Particle Counter, Cloud Condensation Nuclei Counter, backscatter sonde...).

1.1. Un nouveau compteur spatialisé : le SPOC (Speciation and Particle sizing Optical Counter)

Dans cette étude, nous proposons le développement d'un nouvel OPC (Optical Particule Counter) optimisé, dont les performances sont vérifiées par modélisation. Particulièrement adapté aux conditions spatiales, il peut également être proposé pour l'étude en atmosphère planétaire (Vénus, Mars, ...). Ce nouveau compteur hérite du concept du LOAC (Renard *et al.*, 2016a), un OPC ayant été déployé pour de nombreuses études en atmosphère terrestre (Renard *et al.*, 2017). Cette configuration légère et à faible consommation (environ 700g pour 5W) permet à l'ensemble d'être facilement aéroporté sous drone ou ballon afin de réaliser une caractérisation individuelle des aérosols à différentes altitudes.

A partir du dimensionnement général de l'instrument spatial (Verdier, 2020) chaque sous-ensemble a été pensé en tenant compte des contraintes de l'environnement spatial. De plus, des simulations ont été développées pour modéliser le comportement et les interactions de tous ces sous-systèmes afin d'obtenir un jumeau numérique complet de l'instrument. Ce nouvel outil permet de garantir la maîtrise de la technique instrumentale et d'explorer les limites atteignables en termes de performance ce qui, particulièrement dans le contexte de mission spatiale, est un aspect crucial du développement. Enfin, une version compacte a été

développée et intégrée à bord du cubesat AEROSAT du CNES dont le lancement est prévu pour 2027. L'objectif est de valider le bon fonctionnement de la chaîne instrumentale dans des conditions spatiales représentatives. Les performances métrologiques seront validées au sol au travers des inter-comparaisons instrumentales.

2. DEVELOPPEMENT INSTRUMENTAL

Un échantillon d'atmosphère est aspiré par pompage pour faire passer les aérosols qu'il contient dans une chambre optique. Au sein de celle-ci, une source laser illumine les aérosols qui vont alors diffuser de la lumière vers un détecteur photodiode. Chaque aérosol crée une impulsion dans le signal qui sera amplifié par un étage transimpédance, numérisé avec un convertisseur analogique-numérique puis passé dans un algorithme de détection. Un algorithme spécifique basé sur un principe de corrélation permet de détecter, extraire et mesurer la faible amplitude des impulsions dans le bruit (Verdier et al., 2020). La taille de l'aérosol correspondant est ensuite retrouvée grâce à un modèle de diffusion optique tel que la théorie de Mie (Mie, 1908) pour les aérosols sphériques non-déformables ou par calibration de manière plus générale.

2.1. Une configuration optique singulière permettant le comptage et la spéciation

Le compteur SPOC présente une configuration optique particulière à 2 détecteurs avec des ouvertures angulaires resserrées par rapport à la majorité des OPC. Le premier détecteur correspond au canal de comptage placé au plus proche de l'axe optique du laser, à $15^\circ \pm 4.2^\circ$. L'intérêt est de bénéficier des propriétés optiques de la tache de diffraction frontale qui uniformise la diffusion pour différents types d'aérosols observés dans des plages de diffusion angulaire inférieures à 20° (Renard et al., 2010, §2). De ce fait, la sensibilité du canal de comptage à ces biais de mesures introduit par des variations de nature d'aérosols (et donc d'indice de réfraction) sera minimisée rendant la granulométrie plus fiable et robuste. De plus, l'intensité lumineuse accrue dans ce lobe de diffraction frontal permet de compenser en partie la diminution du signal imposée par l'ouverture angulaire réduite afin de conserver une performance en limite de détection satisfaisante. Le second détecteur correspond au canal de typologie couvrant une plage angulaire à $63^\circ \pm 9.8^\circ$, plus éloignée de l'axe optique laser. En dehors du lobe de diffusion frontal, ce canal sera davantage sensible aux variations d'indice de réfraction. La détermination exacte de ce second angle de diffusion est le résultat d'une optimisation maximisant la sensibilité de ce canal aux variations d'indice de réfraction par rapport au canal de comptage (Verdier, 2020, §3.1.1.2). Cette approche à deux canaux permet, par comparaison entre les signaux mesurés sur chacun d'entre eux, d'extraire de l'information sur la nature de la particule (Renard et al., 2016b, §2). De plus, l'arrangement optique précis est le fruit d'un compromis réalisé pour maximiser le rapport signal à bruit en captant le plus de signal possible tout en mitigeant la lumière parasite majoritairement dimensionnante sur le canal de comptage.

La maîtrise de la source lumineuse est également nécessaire afin d'optimiser la performance de l'instrument. Pour ce faire, une diode laser 100mW à 820nm est utilisée. Le faisceau gaussien est focalisé pour former une zone d'interaction lumière-particule la plus fine possible ($\sim 80\mu\text{m}$ d'épaisseur, augmentant la performance en concentration) et le plus dense possible ($\sim 60\text{mW/mm}^2$, améliorant la limite de détection). Selon l'autre axe de divergence, le profil d'intensité gaussien est au contraire étiré puis tronqué par une succession de diaphragmes afin de produire un faisceau quasi-homogène (améliorant la qualité/répétabilité de mesure et la résolution en taille).

2.2. Modélisation et simulation

Afin de prédire les performances de l'instrument, un modèle mathématique complet a été développé. Dans ces simulations, une population d'aérosols est définie en entrée par le nombre d'aérosols injectés, la distribution d'indice de réfraction, la distribution en taille et la concentration du milieu aspiré. Pour chacun de ces aérosols, une trajectoire linéaire, à vitesse constante (imposée par le débit d'aspiration) est définie dans le référentiel de la chambre optique. La distribution spatiale des aérosols dans le plan de l'injecteur peut être choisie (normale, annulaire, uniforme ou idéalement centrée) avec une dispersion variable bornées par le diamètre intérieur de l'injecteur. La répartition temporelle des aérosols peut être uniformément espacée ou aléatoire afin de permettre la superposition d'impulsions limitant l'efficacité de comptage de l'instrument en forte concentration. La source laser est modélisée par la théorie de l'optique gaussienne et la propagation du faisceau à travers du système opto-mécanique (lentilles et diaphragmes) pour produire une cartographie de l'intensité lumineuse dans le référentiel de la chambre optique. L'interaction lumière particules est ensuite établie pour chaque aérosol en déterminant l'intensité reçue en chaque point de leur trajectoires respectives. Un modèle de diffusion optique est ensuite appliqué pour calculer la quantité intégrée de lumière perçue par chaque détecteur dont la position est définie dans un repère sphérique autour de cette zone d'interaction. Un photocourant est obtenu pour chaque détecteur qui sera ensuite convolué par la fonction de transfert de l'électronique prenant en compte le caractère fréquentiel des étages d'amplification, l'ajout de bruit blanc

gaussien et l'échantillonnage du convertisseur. Ce signal simulé est ensuite traité par l'algorithme de détection qui fournit un comptage et une granulométrie complète. En comparant la population déduite par l'algorithme et la population d'entrée, on peut caractériser la performance de l'instrument (efficacité de comptage, résolution en taille ...) et comprendre sa réponse pour une population d'aérosols donnée. De plus grâce à la modularité de cet outil, l'impact de chaque paramètre sur la réponse de l'instrument est mieux maîtrisé. Cela permettra de rapidement cibler une configuration en fonction des performances que l'on souhaite atteindre selon les spécifications et besoin mission.

3. PREMIERS RESULTATS ET PERFORMANCES ATTENDUES

Afin de valider le fonctionnement de l'instrument, des acquisitions sur aérosols monodispersés de PSL ont été effectuées. Les aérosols sont générés avec un générateur TOPAZ ATM221. Une ampoule de gel de silice en sortie du générateur absorbe en partie les gouttelettes d'eau nébulisées en même temps pour ne laisser passer que le PSL. La suspension de PSL nébulisée asséchée est ensuite directement injectée dans l'instrument SPOC. Les tailles de PSL { 0.4 ; 0.51 ; 0.596 ; 0.702 ; 0.994 ; 1.361 } μm ont été testées :

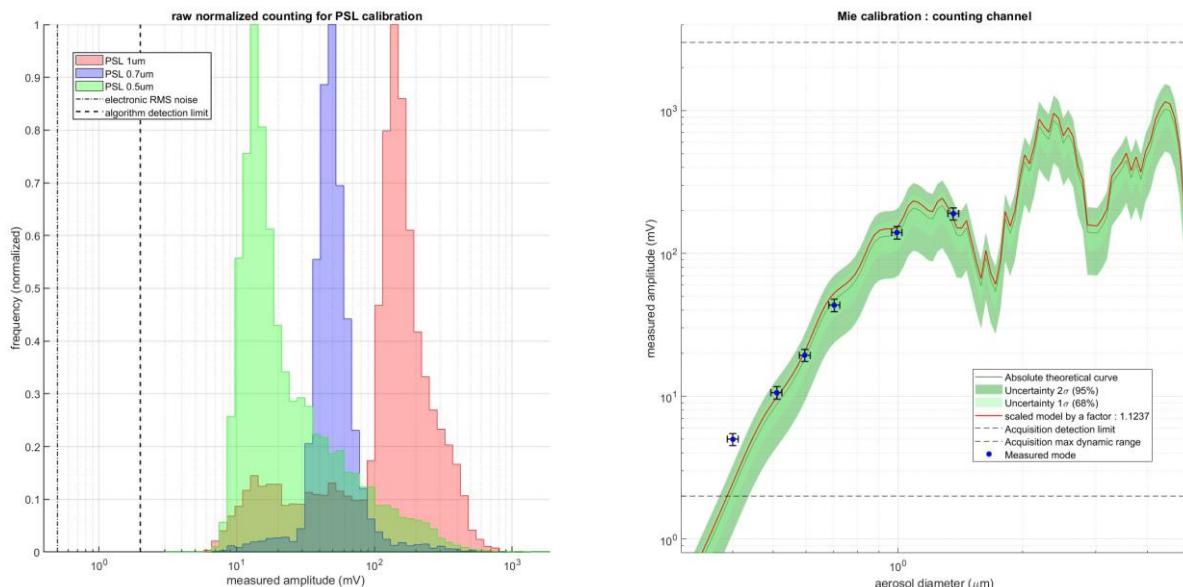


Figure 1A. L'histogramme à gauche représente les distributions d'amplitude normalisées par le maximum observé pour 3 exemples de taille de PSL (0.994 μm , 0.702 μm , 0.51 μm). L'amplitude mesurée en abscisse correspond aux amplitudes brutes des impulsions mesurées dans le signal sans post-traitement.

Figure 1B. La figure de droite superpose la courbe théorique de Mie avec les modes mesurés pour chaque taille de PSL identifié sur les histogrammes de distribution. La courbe verte est un calcul absolu de la diffusion de Mie pour la configuration optique de canal et un indice de réfraction de 1.57 spécifié par le fournisseur. Les zones d'incertitudes vertes prennent en compte la propagation des incertitudes de tous les sous-ensembles électroniques et optiques. La courbe rouge est un ajustement au sens des moindres carrés de la courbe absolue sur les mesures expérimentales (ajusté d'un facteur 1.1237 ici).

3.1. Analyse et performance de l'instrument

Une campagne de caractérisation des performances et d'inter-comparaison instrumentale est prévue à l'aide d'un banc générateur plus sophistiqué permettant une distribution plus fine, une concentration maîtrisée et une granulométrie simultanée permettant d'évaluer l'efficacité de comptage. Lors des mesures réalisées ci-dessus, la concentration en nombre des échantillons de PSL est estimée supérieure à 200 cm^{-3} sans moyen de la maîtriser finement. Cette forte concentration peut affecter la qualité de mesure et la dispersion du mode mesuré en raison des superpositions d'impulsions (Fig. 1A). De plus, l'aspiration de la population se fait en air ambiant en absence de chambre de dilution. Le compteur mesure donc simultanément les aérosols présents dans la pièce. Malgré cela, ces tests préliminaires permettent de vérifier le bon fonctionnement du compteur SPOC et d'estimer ses performances réelles.

Il a été montré que la limite de détection acceptable de l'algorithme de détection par corrélation se situe à 6 dB en rapport signal à bruit (Verdier *et al.* 2020, §3.2). Avec un bruit électronique caractérisé expérimentalement à 500 μV RMS, notre limite de détection théorique (plus petite amplitude détectable) se

situe à 1mV. A partir de l'ajustement de la courbe de Mie (Fig. 1B), cette amplitude correspond à une limite de détection en taille d'aérosols de $0.35\mu\text{m}$. Par ailleurs, les simulations estiment une limite de détection individuelle des aérosols pour des concentrations de 3000 cm^{-3} sans dilution en raison de la faible épaisseur du faisceau. Cela qui rend l'instrument pertinent pour des applications en forte concentration. Enfin, les capacités de spéciation du compteur SPOC restent à évaluer mais ont déjà été démontrée sur l'instrument LOAC qui repose sur le même principe de mesure.

4. CONCLUSION

Ce développement a permis de réaliser un nouveau compteur optique de particules (SPOC) dédié aux atmosphères planétaires, en reprenant et optimisant l'architecture du LOAC à 2 angles de diffusion pour le rendre compatible avec les environnements spatiaux. Des simulations détaillées ont été mises en œuvre pour modéliser la réponse instrumentale et valider la conception. Les premiers tests sur des aérosols monodispersés ont confirmé le bon fonctionnement du prototype, avec une limite de détection estimée à $0,35 \mu\text{m}$ et une capacité à opérer dans des environnements à fortes concentrations (jusqu'à $3\,000 \text{ cm}^{-3}$). Ces travaux préparent la validation en conditions spatiales représentatives, notamment via une intégration prévue sur le cubesat AEROSAT du CNES. L'évaluation des performances instrumentales permettent d'envisager positivement la caractérisation des aérosols des atmosphères comme celle de Vénus où l'on s'attend à un spectre large de tailles de particules incluant les gammes observables par SPOC.

5. REFERENCES

- Renard *et al.*, (2016a) LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles – Part 1: Principle of measurements and instrument evaluation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9 (4), pp.1721-1742. (10.5194/amt-9-1721-2016). ([insu-01320265](#))
- Verdier *et al.*, (2020) An enhanced detection and sizing algorithm to improve LOAC Optical Particle Counter performances. *Applied Optics. Appl. Opt.* 59, 10892-10901 (2020)
- Renard *et al.*, (2010) Small-angle light scattering by airborne particulates: Environnement S.A. continuous particulate monitor. *Meas. Sci. Technol.* 21, 085901
- Renard *et al.*, (2020) Counting and Phase Function Measurements with the LONSCAPE Instrument to Determine Physical Properties of Aerosols in Ice Giant Planet Atmospheres. *Space Sci Rev* 216, 28 (2020).
- Verdier, (2020) Etudes théoriques et développement d'une version optimisée du mini compteur d'aérosols LOAC pour des applications atmosphériques et spatiales. Université d'Orléans.
- Renard *et al.*, (2016b) LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles – Part 2: First results from balloon and unmanned aerial vehicle flights. *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 3673–3686.
- Renard *et al.*, (2017) In situ measurements of desert dust particles above the western Mediterranean Sea with the balloon-borne Light Optical Aerosol Counter/sizer (LOAC) during the ChArMEx campaign of summer 2013. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 3677–3699.
- Mie, (1908), A contribution to the optics of turbid media, especially colloidal metallic suspensions, *Annales de Physique*, 1908