
Néphélomètre polaire à double polarisation : incertitude et validation des mesures

Pascal Personne*, **Valery Shcherbakov****, **Jean-François Gayet*****,
Christophe Verhaege*

**IUT de Montluçon –Laboratoire de Météorologie Physique
Département Génie Thermique et Energie
Avenue A. Briand - BP 2235
03101 Montluçon CEDEX*

*** même adresse, Département Génie Mécanique et Productique*

****LaMP, 24 Avenue des Landais, 63 177 Aubière CEDEX*

personne@moniut.univ-bpclermont.fr

Section de rattachement : 37

Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ. L'interaction particules-rayonnement est due à l'absorption et à la diffusion de la lumière par ces particules. Dans le cas de l'atmosphère, ce phénomène est important à quantifier pour d'une part évaluer le réchauffement de la Terre et pour d'autre part en déduire la qualité de l'air. Afin de mesurer la diffusion de la lumière par les particules nuageuses et les aérosols, un appareil a été conçu et réalisé à l'IUT de Montluçon. Cet appareil est un dispositif de laboratoire mesurant la lumière diffusée suivant 2 directions de polarisation perpendiculaires entre elles. En effet dans certaines directions, la lumière diffusée est polarisée même si le faisceau incident ne l'est pas. Dans cet article, les principales sources d'erreurs de mesures sont analysées. Puis la validation de nos mesures a été effectuée dans une chambre à nuage. Différents appareils (un autre néphélomètre et un granulomètre) avaient été utilisés au cours de ces essais. Dans le cas des mesures faites avec les deux néphélomètres l'accord est tout à fait satisfaisant. La granulométrie des gouttes d'eau déduite de nos mesures correspond bien à celle directement obtenue avec le granulomètre. Le degré de polarisation mesuré par l'appareil et celui recalculé à partir du spectre des gouttes présentent un accord raisonnable compte tenu de l'incertitude sur ce paramètre. Ces résultats valident nos mesures et les procédures de traitement.

MOTS-CLÉS : mesure, aérosols, diffusion de la lumière, polarisation.

1. Introduction

La connaissance des propriétés optiques des aérosols est d'une grande importance pour modéliser le bilan énergétique de la Terre et la télédétection de ces particules. Ces propriétés varient grandement suivant la nature des particules, suivant leur taille et suivant leur origine géographique (Dubovik et al., 2002). Le dernier rapport de l'IPCC (2007) a bien souligné la grande imprécision du calcul du réchauffement de la Terre liée à notre méconnaissance actuelle des effets directs et indirects des aérosols présents dans l'atmosphère. Pour analyser leurs propriétés optiques, il existe plusieurs types de néphélomètres. Certains mesurent l'énergie totale diffusée en intégrant cette énergie sur une grande étendue angulaire (de 7° à 170° pour le modèle 3563 de TSI) et cela pour plusieurs longueurs d'onde. D'autres mesurent séparément la diffusion avant et arrière. Les néphélomètres polaires (Gayet et al., 1997, 1998) mesurent l'énergie diffusée par une population de particules en fonction de l'angle θ . Estimer correctement la précision de ces mesures est d'une grande importance non seulement pour connaître la fonction de diffusion de chaque type de particule mais aussi pour déduire leur propriété microphysique (granulométrie) (Dubovik et al., 2006).

Le but de cette étude est de quantifier les erreurs des données issues de notre appareil et de valider dans le cas de gouttes sphériques homogènes nos mesures. Une rapide description de l'appareil sera d'abord faite puis les principales relations seront données. Avec celles-ci une analyse d'erreurs sera décrite. Enfin les résultats de la validation seront abordés dans la dernière partie.

2. Le néphélomètre polaire à double polarisation (D2PN).

Cet appareil (D2PN : Dual-Polarization Polar Nephelometer) a déjà été présenté au CNRIUT de 2008 (Verhaege et al., 2008).

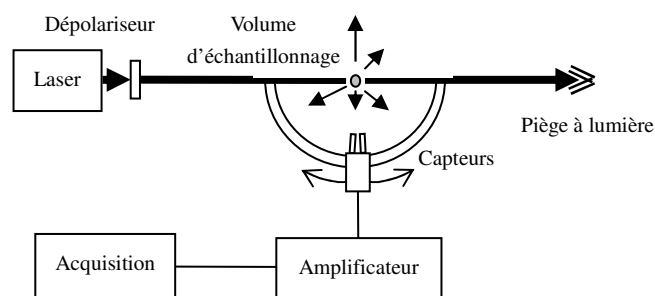


Figure 1. Schéma de principe du néphélomètre polaire à double polarisation. Le flux de particules est perpendiculaire au plan du schéma.

La Figure 1 rappelle le schéma de principe de cette sonde. Un faisceau laser issu d'une diode laser multimode de forte puissance (1 W et de longueur d'onde 800 nm) intercepte perpendiculairement le flux de particules. L'intersection de ces deux cylindres forme un volume d'échantillonnage d'environ 0,67 cm³. La lumière diffusée est mesurée directement sans miroir à l'aide de 2 photodiodes à avalanche identiques montées sur un bras de 15 cm de longueur entraîné par un moteur pas à pas afin de tourner autour du volume d'échantillonnage. Devant chacune des photodiodes, un polariseur est monté parallèlement et perpendiculairement au plan d'observation. Les deux capteurs forment avec le centre du volume d'échantillonnage un angle de 9°. Les deux quantités $I_{//}(\theta)$ et $I_{\perp}(\theta)$ [m⁻¹sr⁻¹] sont mesurées tous les degrés à partir de 10° pour le premier capteur et jusqu'à 169° pour le deuxième. La relation entre les intensités I mesurées et les tensions U en sortie des capteurs est donnée par la relation suivante :

$$I_{//,\perp}(\theta) = \frac{U_{//,\perp}(\theta) \cdot S}{k_s \cdot P \cdot \Omega_d \cdot \vartheta} = q \cdot U_{//,\perp}(\theta) \quad [1]$$

Où S est la surface du laser, k_s la sensibilité du capteur, P la puissance du laser, Ω_d l'angle solide du détecteur et ϑ le volume d'échantillonnage. q est le coefficient de conversion ($q = 13,5 \text{ V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$). La diffusion totale $I(\theta)$ ainsi que le degré de polarisation $p(\theta)$ peuvent être connus de 19° jusqu'à 160° à l'aide des formules suivantes :

$$I(\theta) = I_{//}(\theta) + I_{\perp}(\theta) \quad [2]$$

et

$$p(\theta) = \frac{I_{//}(\theta) - I_{\perp}(\theta)}{I_{//}(\theta) + I_{\perp}(\theta)} \quad [3]$$

3. Analyse des erreurs de mesure.

Ce type de mesure est entaché principalement de quatre sources d'erreur qui sont : (i) l'angle θ , (ii) la valeur du coefficient de conversion q , (iii) le bruit électronique et (iv) les fluctuations de la concentration des particules analysée. D'après le constructeur du moteur pas à pas, l'incertitude sur l'angle θ est de 0,001°. De ce fait l'incertitude sur la position angulaire concerne plus la valeur initiale de cet angle. Elle peut être chiffrée à environ 0,1°, de sorte que la fonction de diffusion mesurée peut être décalée sur l'abscisse de $\pm 0,1^\circ$.

Compte tenu de l'équation [1], l'incertitude relative sur le coefficient de conversion q est donnée par la formule suivante :

$$\frac{\delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Omega_d}{\Omega_d}\right)^2 + \left(\frac{\delta \vartheta}{\vartheta}\right)^2} \quad [4]$$

Cette incertitude relative a pu être chiffrée à 6%. Il est à noter que cette incertitude affecte l'ensemble des mesures d'une même quantité. Cette imprécision concernera la position suivant l'axe des ordonnées de la fonction de diffusion ainsi que la concentration des particules déduite de nos mesures.

Le bruit électronique est dû au bruit de la photodiode et au bruit de l'amplificateur. En condition d'obscurité totale, avec un gain de l'amplificateur de 1000, ce bruit mesuré représente une valeur de 12 mV crête à crête soit une erreur en sortie de chaque capteur comprise entre $\pm 6\mu\text{V}$. L'intensité diffusée et la tension associée présentent un minimum en diffusion latérale ($80^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$). Pour ces positions, lorsque le rapport signal sur bruit est supérieur à 5, les données sont considérées comme étant acceptables.

Les mesures pour les 151 angles se font en 7,6 secondes. Durant cette période, la concentration des particules analysées n'est pas constante. Ces fluctuations de la concentration sont fonction de la qualité du générateur de particules. Ceci entraîne des oscillations de la fonction de diffusion. Afin de lisser cette courbe, les données sont moyennées sur N mesures pour chaque angle.

$$\bar{I}_{//,\perp}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_{//,\perp}(\theta) \quad [5]$$

L'incertitude sur $I_{//,\perp}(\theta)$ est assimilée à l'écart type de la moyenne (ISO/IEC 2007) :

$$\sigma_{//,\perp}(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N [I_{//,\perp}(\theta) - \bar{I}_{//,\perp}(\theta)]^2} \quad [6]$$

A l'aide des données recueillies, l'incertitude relative due aux fluctuations de la concentration représente moins de 5% pour N supérieur ou égal à 4. En conséquence nos mesures sont toujours moyennées sur 6 réalisations.

Concernant l'incertitude absolue sur le degré de polarisation $p(\theta)$, et en supposant que les erreurs sont indépendantes entre elles, l'équation [3] permet d'écrire son équation :

$$\delta p(\theta) = \sqrt{\left(\frac{\partial p(\theta)}{\partial I_{\perp}} \cdot \delta I_{\perp}(\theta) \right)^2 + \left(\frac{\partial p(\theta)}{\partial I_{//}} \cdot \delta I_{//}(\theta) \right)^2} \quad [7]$$

On en déduit :

$$\delta p(\theta) = 2 \sqrt{\left(\frac{I_{//}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2 \left(\frac{\delta I_{\perp}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2 + \left(\frac{I_{\perp}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2 \left(\frac{\delta I_{//}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2} \quad [8]$$

L'incertitude absolue est utilisée car le degré de polarisation peut prendre la valeur zéro pour certains angles. Avec les équations [2] et [3] le terme $\delta p(\theta)$ peut s'écrire :

$$\delta p(\theta) = \sqrt{[1 - p(\theta)]^2 \left(\frac{\delta I_{\perp}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2 + [1 + p(\theta)]^2 \left(\frac{\delta I_{\parallel}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2} \quad [9]$$

Il apparaît que $\delta p(\theta)$ dépend du degré de polarisation et de l'incertitude relative sur les quantités $I_{\parallel,\perp}(\theta)$. Comme il a été dit précédemment, en supposant $\sigma_{\parallel,\perp}(\theta)$ inférieur à 5%, l'incertitude absolue $\delta p(\theta)$ vaut environ 0,1.

4. Validation des mesures du D2PN

Bien que le D2PN soit conçu pour mesurer les propriétés de diffusion de tout type de particules, quelle que soit leur forme, la validation des données a été faite dans le cas de gouttes d'eau sphériques et homogènes. Pour ces particules, les caractéristiques optiques peuvent être calculées en utilisant la théorie de Mie (1908) (Bohren et Huffman, 1983). De plus les granulomètres sont souvent calibrés avec des gouttelettes d'eau.

Cette validation des données du D2PN a été faite dans une chambre à nuage dans laquelle se trouvaient également un autre néphélomètre polaire (PN) et un granulomètre. Le néphélomètre polaire est un appareil destiné à être monté sur avion. Son principe, sa description ainsi que ses performances ont déjà fait l'objet de plusieurs publications (Gayet et al., 1997, 2004) et ont été aussi présentés au CNRIUT de 2008. Cet appareil mesure la diffusion totale $I(\theta)$ dans 40 directions. Le granulomètre est le FSSP-100 de Particle Measuring Systems (PMS). Le nombre de goutte de rayon compris entre 1 et 16 μm est donné dans 15 classes de largeur 1 μm . Cette mesure est faite en recueillant l'intensité diffusée totale entre 4° et 12°. Les trois appareils ont été placés à la même hauteur et le plus près possible les uns des autres.

Le brouillard est généré avec des rampes d'injecteurs pendant environ 20 minutes. Puis l'alimentation en eau était stoppée et la dissipation du brouillard durait environ 25 minutes. C'est au début de cette seconde phase que les mesures étaient réalisées.

Un exemple de la fonction de diffusion non normalisée $k^2 I(\theta)$, où $k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde, est représenté sur la figure 2(a) par des points gris pour le D2PN et noirs pour le PN. Les deux fonctions de diffusion présentent un très bon accord entre elles. Les petites différences observées peuvent être dues à l'hétérogénéité du brouillard.

Dans une deuxième étape, la fonction de diffusion du D2PN a été utilisée pour retrouver l'indice complexe et la granulométrie des particules. La méthode d'inversion a été décrite par Verhaege et al. (2008). La valeur trouvée de l'indice réel est 1,33 contre 1,329 généralement admise pour l'eau. Sur la figure 3, les distributions du nombre de gouttes sont comparées. Sur cette figure aussi on constate un bon accord entre les deux courbes. Il semble néanmoins que le FSSP-100 sous-estime le nombre de gouttes dans les deux premières classes. Ce fait n'est pas surprenant car il a déjà été constaté par Baumgardner et al. (2001) et incriminé à des problèmes d'alignement et d'optique sale.

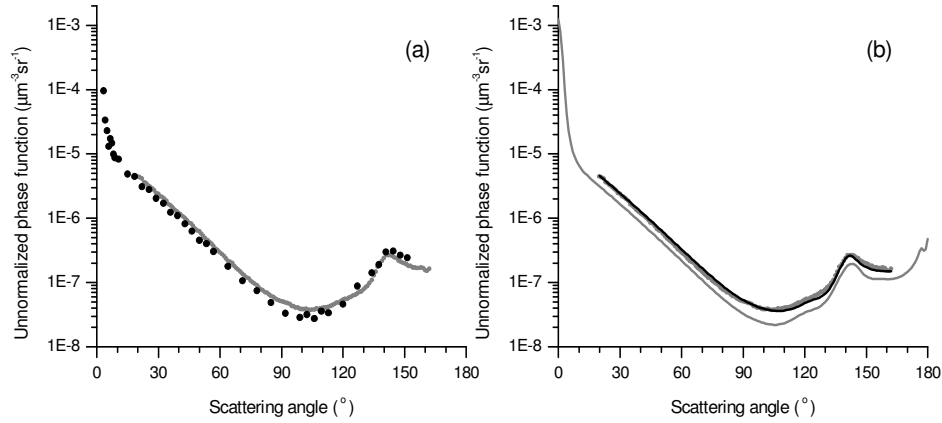


Figure 2 . Fonctions de diffusion non normalisées : (a) les points gris correspondent aux mesures du D2PN, les points noirs à celles du PN ; (b) les points gris correspondent toujours aux mesures du D2PN tandis que les courbes en trait noir et gris représentent les fonctions de diffusion calculées à partir du spectre dimensionnel des gouttes respectivement restitué et mesuré.

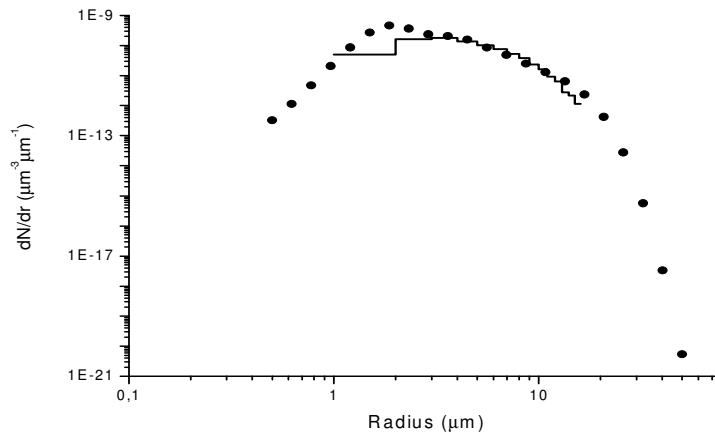


Figure 3 . Distribution en nombre des gouttes : les points représentent la distribution restituée à partir des mesures du D2PN, le trait continu est la distribution mesurée par le FSSP-100 de PMS.

Les fonctions de diffusion calculées à partir des distributions de gouttes respectivement restituée (points de la figure 3) et mesurée (trait continu de la figure 3) sont aussi représentées en trait noir et gris sur la figure 2(b). Ces courbes sont similaires en forme mais sont décalées en hauteur. Ceci s'explique du fait que le FSSP-100

tronque le spectre des gouttes car il ne peut pas détecter les gouttes de rayon supérieur à $16\ \mu\text{m}$.

Concernant le degré de polarisation, la figure 4 compare celui mesuré (points noirs) avec celui calculé (courbe en trait continu) à partir du spectre dimensionnel des gouttes restitué (points noirs de la figure 3). Le maximum à 142° est parfaitement restitué tandis que les différences observées pour les angles compris entre 80 et 130° sont cohérentes avec l'estimation de l'incertitude faite au paragraphe 3.

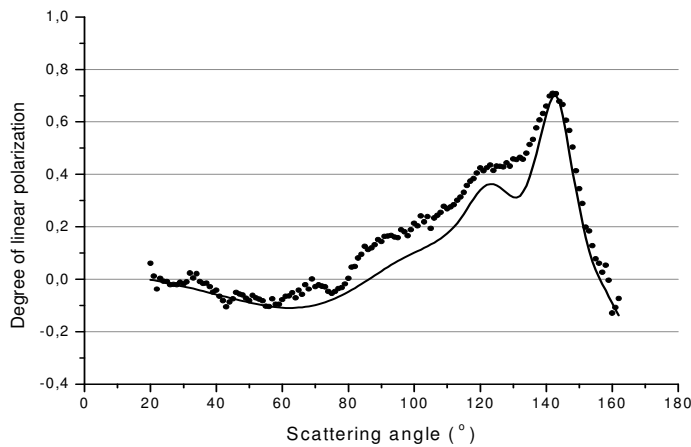


Figure 4 . Degré de polarisation mesuré avec le D2PN (points noirs) et calculé (courbe en trait continu) à partir de la distribution en nombre restituée.

5. Conclusion

Le néphélomètre polaire à double polarisation mesure la diffusion de la lumière en fonction de l'angle de façon quasi continue entre 10 et 169° et cela suivant deux directions de polarisations perpendiculaires entre elles. L'étude a permis de mettre en évidence que l'incertitude principale est liée aux fluctuations de la concentration des particules. Cette incertitude pourra être diminuée en ajoutant un capteur témoin fixe qui permettra de corriger les variations de concentration. L'étude effectuée dans le cas de gouttes sphériques homogènes et en appliquant la théorie de Mie a mis en évidence la validité des mesures du D2PN. Grâce à cet appareil, l'étude de la diffusion de la lumière par des particules de forme irrégulière pourra être faite afin de confronter nos mesures avec différentes théories (Glassner, 1989, Dubovik et al., 2006, ...).

Bibliographie

Baumgardner D., H. Jonsson, W. Dawson, D. O'Connor, and R. Newton, "The cloud, aerosol and precipitation spectrometer: a new instrument for cloud investigations," *Atmospheric Research*, 59–60, 251–264 (2001).

Bohren C. F. and D. R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*, (3rd edition, Wiley-Interscience, 1983).

Dubovik O., B. N. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanré, and I. Slutsker, "Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations," *J. Atmos. Sci.* 59, 590-608 (2002).

Dubovik O., A. Sinyuk, T. Lapyonok, B. N. Holben, M. Mishchenko, P. Yang, T. F. Eck, H. Volten, O. Muñoz, B. Veihelmann, W. J. van der Zande, J.-F. Leon, M. Sorokin, and I. Slutsker, "Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust," *J. Geophys. Res.* 111, D11208 (2006).

Gayet J.-F., O. Crepel, J.-F. Fournol, and S. Oshchepkov, "A new airborne polar Nephelometer for the measurements of optical and microphysical cloud properties. Part I: Theoretical design," *Ann. Geophysicae* 15, No. 4, 451-459 (1997).

Gayet J.-F., F. Auriol, S. L. Oshchepkov, F. Schröder, C. Duroure, G. Febvre, J.-F. Fournol, O. Crépel, P. Personne, and D. Dauteron, "In situ measurements of the scattering phase function of stratocumulus, contrails and cirrus," *Geophysical Research Letters* 25, 971–974 (1998).

Gayet J.-F., J. Ovarlez, V. Shcherbakov, J. Ström, U. Schumann, A. Minikin, F. Auriol, A. Petzold, and M. Monier, "Cirrus cloud microphysical and optical properties at southern and northern midlatitudes during the INCA experiment," *J. Geophys. Res.* 109, D20206, doi:10.1029/2004JD004803 (2004).

Glassner A.S., « *An Introduction to ray tracing* », Academic press, 1989, 327 p.

International Panel on Climate Change (IPCC), "Climate Change 2007: The Physical Science Basis," Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, ISBN 978 0521 88009-1 Hardback, (2007).

ISO/IEC Guide 99:2007, International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), (2007).

Mie G., « Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen », *Ann. Phys. Leipzig*, vol. 25, 1908, p. 377–445.

Verhaege C., P. Personne, V. Shcherbakov « Validation d'une méthode de restitution de l'indice de réfraction d'un ensemble de particules sphériques à partir d'une mesure de la lumière diffusée », *14^{ème} CNRIUT*, Villeurbanne, 2008.

Verhaege C., P. Personne, V. Shcherbakov « Appareils de mesure pour la recherche environnementale », *14^{ème} CNRIUT*, Villeurbanne, 2008.

Verhaege C., V. Shcherbakov, and P. Personne, "Limitations on retrieval of complex refractive index of spherical particles from scattering measurements," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 109, 2338-2348 (2008).