



**HAL**  
open science

## Appareils de mesure pour la recherche environnementale

Christophe Verhaege, Sylvain Lepetit, Dominique Carboni, Pascal Personne,  
Valery Shcherbakov, Jean-François Gayet, Jean-François Fournol

► **To cite this version:**

Christophe Verhaege, Sylvain Lepetit, Dominique Carboni, Pascal Personne, Valery Shcherbakov, et al.. Appareils de mesure pour la recherche environnementale. 14ème Colloque National de la Recherche en IUT, May 2008, Villeurbanne, France. hal-01896093

**HAL Id: hal-01896093**

**<https://uca.hal.science/hal-01896093v1>**

Submitted on 15 Oct 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Appareils de mesure pour la recherche environnementale

**Christophe Verhaege\***, **Sylvain Lepetit\*\***, **Dominique Carboni\*\*\***,  
**Pascal Personne\***, **Valery Shcherbakov\*\***, **Jean-François Gayet\*\*\*\***,  
**Jean-François Fournol\*\*\*\***

*\*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*

*\*\*\*CFAI d'Auvergne  
62 rue Henri Barbusse – BP 17  
03630 Désertines*

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

*verhaege@moniut.univ-bpclermont.fr*

**Section de rattachement : 37**  
**Secteur : Secondaire**

*RÉSUMÉ. L'interaction du rayonnement solaire ou terrestre avec les particules contenues dans l'atmosphère est un phénomène important à quantifier pour d'une part évaluer le réchauffement de la Terre et pour d'autre part en déduire la qualité de cette atmosphère. Afin de mesurer la diffusion de la lumière par un ensemble de particules nuageuses et d'aérosols, deux appareils ont été conçus et réalisés à l'IUT de Montluçon. Le premier est un appareil monté sur avion pour étudier les particules nuageuses. La première version a été achevée en 1996. Actuellement un deuxième exemplaire est en cours de réalisation. Le deuxième appareil est un dispositif de laboratoire mesurant la lumière diffusée suivant 2 directions de polarisation perpendiculaires entre elles. Dans cet article, ces deux appareils seront rapidement décrits. Des exemples de mesures seront donnés et les informations pouvant être extraites de ce type de données seront discutées.*

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

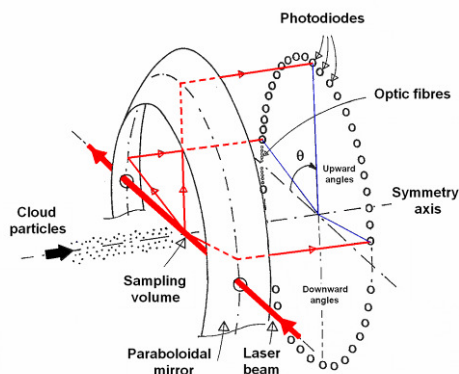
## 1. Introduction

L'importance dans le bilan énergétique de la Terre des nuages et des aérosols contenus dans l'atmosphère est tout de suite comprise en citant quelques chiffres admis (Delmas et al, 2005). Rien que pour le rayonnement solaire direct dans le domaine du visible,  $342 \text{ W/m}^2$  sont reçus au sommet de l'atmosphère par jour. Une partie de cette puissance est réfléchiée par les nuages, les aérosols et l'atmosphère ( $77 \text{ W/m}^2$ ) à laquelle il convient d'ajouter  $67 \text{ W/m}^2$  absorbés par l'atmosphère. La diffusion est due à l'interception d'une onde électromagnétique par une particule. Les charges électriques de l'obstacle se mettent à osciller à cause du champ électrique de l'onde incidente. Ces charges électriques rayonnent à leur tour une énergie dans toutes les directions. Si ce rayonnement réémis a la même longueur d'onde que l'onde incidente, on parle de diffusion élastique. Une théorie utilisant la continuité des équations de Maxwell existe dans le cas d'obstacles sphériques de surface lisse (Mie, 1908). Pour des formes géométriques simples (cristaux hexagonaux) la méthode du lancer de photons (Ray-Tracing) est utilisée (Glassner, 1989). Cependant la plupart des particules atmosphériques (cristaux de glace et aérosols) ont des formes mal définies avec une certaine rugosité de surface. C'est pour cette raison que la mesure de la diffusion de la lumière par une population de particules est importante. Compte-tenu de la grande vitesse des particules au niveau du volume d'échantillonnage, l'orientation des particules non sphériques est aléatoire et ne pénalise pas la mesure.

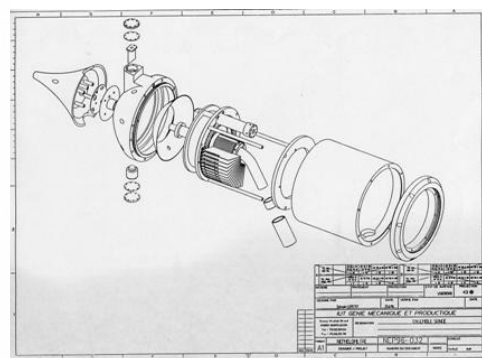
## 2. Néphélomètre polaire aéroporté.

La Figure 1 rappelle le schéma de principe de cette sonde. Un faisceau laser issu d'une diode laser de forte puissance ( $\approx 1 \text{ W}$  à  $800 \text{ nm}$ ) est préalablement collimaté sur un diamètre de l'ordre de  $5 \text{ mm}$ . Le flux de particules nuageuses traverse perpendiculairement le faisceau laser sur une largeur utile de  $10 \text{ mm}$ , ce qui détermine un volume sensible de mesure d'environ  $0,2 \text{ cm}^3$ . L'énergie diffusée est mesurée via un miroir parabolique d'une part, sur un ensemble de 31 modules de détection disposés en arc de cercle, et d'autre part par l'intermédiaire de 4 fibres optiques dans la partie proche de la direction incidente, lesquelles sont connectées à des photodiodes. Les photodiodes utilisées sont de type PIN ayant une réponse spectrale maximale centrée sur  $890 \text{ nm}$ . Le diamètre du composant est de  $4,65 \text{ mm}$ , la surface active de la photodiode est de  $0,25 \text{ mm}^2$  et la sensibilité est d'environ  $0,45 \text{ A/W}$  à  $785 \text{ nm}$ . Ce type de détecteur a été sélectionné en raison de sa faible sensibilité aux variations de température. L'électronique de conditionnement procède à l'intégration linéaire du signal issu des photodiodes sur une période déterminée et programmable (entre  $1 \text{ ms}$  et  $10 \text{ s}$ ). A la fin de la période d'intégration, le système procède à l'acquisition simultanée des mesures, laquelle dure  $5 \mu\text{s}$ , puis à la remise à zéro des intégrateurs, opération réalisée en  $60 \mu\text{s}$ . Ainsi la période durant laquelle la sonde est 'aveugle' ne dure que  $65 \mu\text{s}$ , ce qui représente seulement  $6,5\%$  du temps lorsque la période d'acquisition sélectionnée est la

plus rapide soit 1 ms. A la suite des opérations précédentes, il est procédé à la conversion ‘analogique-digitale’ des mesures sur 16 bits. La conception et la réalisation des ensembles mécaniques et électriques (alimentations) ont été conçues en vue de leur intégration sur un tube standard imposé afin de garantir la compatibilité d’installation sur un avion de recherche atmosphérique. Les parties DAO et CAO avaient été faites en 1996 à l’aide du logiciel EUCLID (figure 2). Pour le deuxième exemplaire actuellement en cours de réalisation tous les plans ont été fait avec CATIA. Dans les deux cas, ceci a été effectué au département GMP de l’IUT. L’usinage des pièces mécaniques a été réalisé au CFAI d’Auvergne à Montluçon. Le cliché A montre le Néphélomètre Polaire avant installation dans le tube standard imposé. La partie détection du Néphélomètre comprend en premier lieu une prise d’air dont le tube d’entrée fait 16 mm de diamètre. La forme générale de la prise d’air a été optimisée suite aux résultats numériques de la simulation de l’écoulement autour du Néphélomètre (FLUENT). Il s’agissait en effet de produire une dépression au niveau du bord de fuite de la prise d’air afin de favoriser l’efficacité du piège à couche limite. Afin d’éviter le givrage de cet appareil, certaines pièces doivent être chauffées. La prise d’air est chauffée au moyen de 6 résistances cylindriques dissipant 300 W. La veine de mesure est également dégivrée au moyen de tapis chauffants (50 W). De même, le miroir parabolique est chauffé (tapis chauffants délivrant 50 W) afin d’éviter la condensation sur celui-ci. Les calculs d’écoulement et des puissances de chauffe ont été réalisés grâce aux compétences du département GTE. En 1996, un système informatique MOTOROLA a été monté sur un bus VME (PXI actuellement). Les cartes fonctionnent avec le système d’exploitation UNIX.

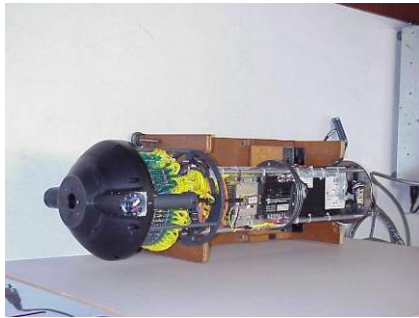


**Figure 1.** Principe de mesure du néphélomètre aéroporté.



**Figure 2.** Vue éclatée de l’ensemble des pièces composant l’appareil.

La masse totale de cette sonde est de 15,8 kg (21 kg avec le tube de fixation imposé), l'alimentation électrique des composants électroniques utilise 100 W et le dégivrage consomme 450 W. Toutes ces données sont conformes au cahier des charges.



**Cliché A.** Photo de la sonde avec son électronique sans la prise d'air. La longueur totale de la sonde dans son tube est d'environ 1040 mm.



**Cliché B.** Néphélomètre polaire installé sur l'avion de recherche atmosphérique allemand (Falcon du DLR). Expérience européenne AEROCONTRAIL (octobre 1996).

## 2.1. Campagnes de mesures

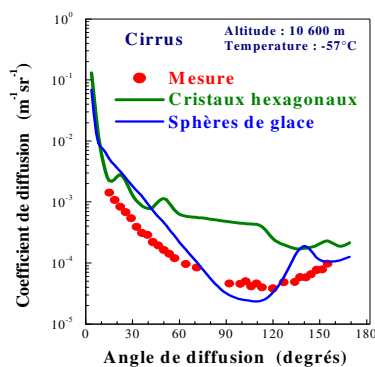
Depuis 1996 cet appareil a été monté sur de nombreux avions de recherche atmosphérique. Durant des campagnes de mesures internationales plusieurs appareils, mis en œuvre par différents laboratoires, sont utilisés afin d'étudier des phénomènes nuageux très précis. C'est ainsi que ce néphélomètre polaire a été installé sur le Falcon du DLR (institut de recherche allemand) pour les campagnes AEROCONTRAIL (oct. 1996, cliché B) et LAUNCH (sept. 2005) pour connaître l'impact climatique des traînées de condensation dans le sillage des avions. En 1997 il a été placé sur l'Avion de Recherche Atmosphérique (ARAT ATR) de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) afin d'étudier les nuages en phase mixte (gouttelettes d'eau et cristaux de glace). Le bilan radiatif de ces nuages a aussi été étudié au Japon en janvier 1999 (avion B 200). Les nuages hauts en altitude de type cirrus ont été analysés en France en janvier 1998 et en septembre 2001 sur un avion d'essai TBM de la société SOCATA (EADS). Le contraste inter-hémisphérique des propriétés des nuages d'altitude dû aux émissions anthropiques était l'objet de la campagne européenne INCA (avril 2000 en Patagonie et octobre 2000 en Ecosse). Enfin cet appareil a aussi fonctionné aux Pôles. Il a été placé au sol à la base Amundsen-Scott au Pôle Sud en février 2002 pour étudier les interactions particules-rayonnement. Les nuages en régions arctiques ont été aussi

étudiés depuis le Spitzberg en mai 2004 sur l'avion Polar 2 de l'institut Polaire Allemand AWI.

En tout, depuis 1996, cette sonde a été utilisée au cours de 10 campagnes de mesures dont 9 aéroportées. Cela représente environ 300 heures de vol.

## 2.2. Exemples de résultats

Un exemple de mesures effectuées par cette sonde dans des Cirrus est représenté sur la figure 3. Sur l'axe des ordonnées est reporté le coefficient de diffusion. Ce coefficient représente, à une constante près, l'énergie diffusée. L'axe des abscisses est la direction de diffusion. Nos mesures (points rouges) sont comparées avec les courbes théoriques dans le cas où les particules seraient des sphères de glace ou des cristaux hexagonaux.



**Figure 3.** Comparaison entre nos mesures et des théories utilisant différentes hypothèses sur le type simple de particules présentes dans le Cirrus.

La différence est grande. Ce constat met en évidence que les propriétés optiques des nuages restent mal connues. La réponse climatique à une perturbation radiative est largement dominée par le rôle des nuages. Actuellement, les paramétrisations développées dans les modèles numériques de climat font donc l'objet de larges incertitudes quant à l'ajustement de certains paramètres.

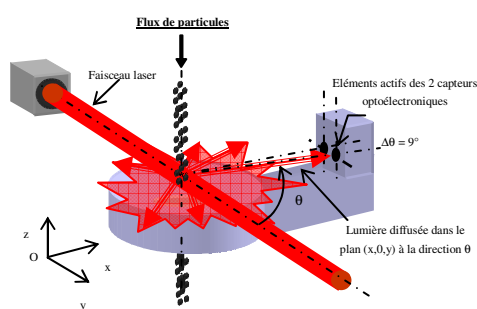
En utilisant des modèles de particules plus complexes (forme irrégulière et rugosité de surface) nos résultats montrent que les mesures d'indicatrice de diffusion contiennent suffisamment d'informations pour restituer correctement la composition et la granulométrie des nuages. De plus l'information contenue à une longueur d'onde de 0,8  $\mu\text{m}$  peut être exportée vers les zones non documentées par l'instrument (diffusion avant et arrière) et aux longueurs d'ondes visibles et infrarouges (Jourdan et al, 2003).

L'analyse de données collectées durant la campagne INCA a mis en évidence un contraste inter-hémisphérique des propriétés microphysiques et optiques en fonction de l'humidité relative. Nos observations montrent également que la concentration des cristaux de glace est liée à l'intensité de la composante verticale du vent (Gayet et al, 2006).

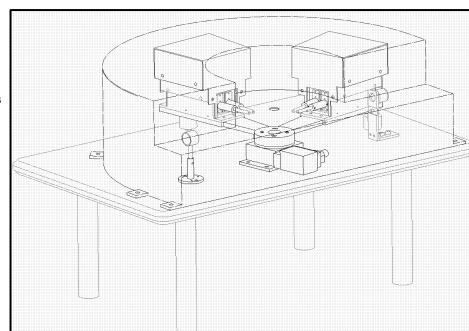
Au Pôle Sud le néphélomètre était installé avec un imageur à haute résolution des cristaux de glace. L'interprétation théorique des résultats sur des cristaux de glace individuels a été réalisée en adaptant le code de Macke (Macke et al, 1996) à notre appareil. Les résultats issus d'une comparaison directe entre observation et modélisation conduisent à une interprétation cohérente des mesures (en termes de paramètres morphologiques et d'orientation du cristal individuel de glace, i.e., facteur de forme, rugosité de surface...) (Shcherbakov et al, 2006 a et b).

### 3. Néphélomètre de laboratoire

Une des caractéristiques du phénomène de diffusion de la lumière est que même si la lumière incidente n'est pas polarisée, la lumière diffusée peut l'être, surtout en diffusion latérale et arrière. C'est pour utiliser cette propriété qu'un néphélomètre de laboratoire a été réalisé. Le principe de départ est toujours un flux de particules de diamètre 10 mm qui traverse perpendiculairement un faisceau laser non polarisé de même diamètre et de forte puissance (1 W et de longueur d'onde 800 nm) (figure 4). Le volume diffusant de mesure est d'environ  $0,67 \text{ cm}^3$ . La lumière diffusée est mesurée directement sans miroir à l'aide de 2 photodiodes à avalanche contrôlées en température et dont le diamètre de la surface sensible est 0,5 mm. Leur sensibilité est d'environ  $10^6 \text{ V/W}$  sur une étendue de mesure comprise entre 2 pW et  $2 \mu\text{W}$ . Ces 2 photodiodes forment un angle de  $9^\circ$  par rapport au centre du volume d'échantillonnage. Devant chacune des photodiodes un



**Figure 4.** Schéma de principe du néphélomètre de laboratoire.



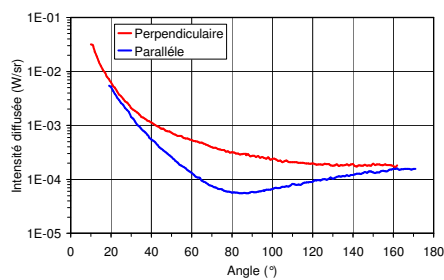
**Figure 5.** Vue éclatée du néphélomètre. Le bras tournant a été représenté dans 2 positions.

canon permet de recueillir uniquement la lumière en provenance du volume de mesure. L'ensemble est monté sur un bras tournant entraîné par un moteur pas à pas de très grande précision ( $0,001^\circ$ ). Compte tenu de la longueur du bras (150 mm) l'angle solide vaut environ  $9 \mu\text{sr}$ . Quand la lumière diffusée est trop faible, une lentille placée dans le canon permet d'augmenter cet angle solide ( $0,26 \text{ msr}$ ). Dans ce canon des polariseurs sont également insérés, l'un est perpendiculaire au plan d'observation et l'autre tangent à ce plan. Au cours d'un aller, le bras parcourt  $152^\circ$  par pas de  $1^\circ$ . De sorte que le premier capteur effectue des mesures entre  $10$  et  $161^\circ$  pendant que l'autre balaye de  $19$  à  $170^\circ$ . Cela est réalisé en  $7,6 \text{ s}$ . L'ensemble est monté sur une table et fermé par un capot absorbant (figure 5). L'acquisition, le pilotage du moteur ainsi que le réglage des gains des amplificateurs programmables sont effectués à l'aide du logiciel LABVIEW.

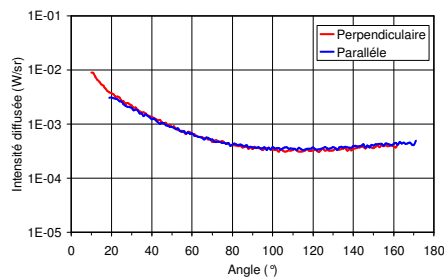
### 3.1. Exemples de mesures

Lorsque les particules sont sphériques, une méthode d'inversion (Dubovik et al, 1995) permet de restituer la granulométrie (nombre en fonction de la taille) de la population de gouttes si on connaît leur nature (indice de réfraction). Avec les données fournies par ce néphélomètre de laboratoire une amélioration de cette méthode est à l'étude afin de supprimer l'hypothèse faite sur la nature des particules diffusantes. Cette méthode présentée à ce colloque (Verhaege et al, 2008) associe une table de recherche à la méthode d'inversion. Elle permet dans certains cas de retrouver l'indice de réfraction (réel et imaginaire) et la granulométrie des gouttes.

L'extension de cette méthodologie est envisagée afin de déduire de la dépolarisation de la lumière diffusée des informations sur le rapport de forme et la rugosité dans le cas de particules non sphériques. Ces travaux se font en collaboration avec la NASA pour la partie théorique (matrices de diffusion pour différents rapports de forme des ellipsoïdes) et avec le DLR à Karlsruhe pour la collecte de données expérimentales sur différents types de sable.



**Figure 6.** Indicatrices de diffusion mesurées suivant 2 directions de polarisation orthogonales entre elles pour des particules de suie de carbone.



**Figure 7.** Même représentation que pour la figure 6 mais pour du lycopode. La lumière diffusée par ce pollen n'est pas polarisée.



Dans le cas de particules non sphériques (suie et pollen) les figures 6 et 7 mettent en évidence les signatures très différentes de la dépolarisation de la lumière en diffusion latérale et arrière.

#### 4. Conclusion

Grâce aux compétences des départements GMP (DAO et CAO) et GTE (Mécanique des fluides et thermique) de l'IUT et celles du CFAI (usinage et CN) de Montluçon, deux appareils de recherche uniques ont pu être construits. Les méthodes sophistiquées de traitement de ces données ont été développées au sein de cet IUT grâce aux chercheurs de l'antenne locale du Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP). Ces travaux de niveau international contribuent à la quantification de la qualité de l'environnement atmosphérique et de ses conséquences sur le réchauffement de la Terre.

#### Bibliographie

Delmas R., G. Mégie, V.H. Peuch, « *Physique et chimie de l'atmosphère* », Belin, 2005.

Dubovik O. V., Lapyonok T. V., Oshchepkov S. L., « Improved technique for data inversion: optical sizing of multicomponent aerosols », *Applied Optics*, vol. 34, 1995, p. 8422-8436.

Gayet J-F, V. Shcherbakov, A. Minikin, U. Schumann, A. Petzold, and J. Ström, « Microphysical and optical properties of mid-latitude cirrus clouds observed in the southern hemisphere during INCA », *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 132, Part B, No. 621, 2006, p. 2721-2750.

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

Jourdan O., S. Oshchepkov, V. Shcherbakov, J.-F. Gayet, and H. Isaka, « Assessment of cloud optical parameters in the solar region: Retrievals from airborne measurements of scattering phase functions », *J. Geophys. Res.*, 108(D18) , 2003, 4572.

Macke A., J. Mueller, E. Raschke, « Single Scattering Properties of Atmospheric Ice Crystals », *J. Atmos. Sci.*, vol. 53, 1996, p. 2813-2825.

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

Shcherbakov V., J.-F. Gayet, O. Jourdan, J. Ström, and A. Minikin, « Light scattering by single ice crystals of cirrus clouds », *Geophys. Res. Letters*, vol. 33, 2006.

Shcherbakov V., J.-F. Gayet, B. A. Baker, P. R. Lawson, « Light Scattering by Single Natural Ice Crystals », *J. Atmos. Sci.*, vol. 63, Issue 5, 2006, p. 1513-1525.

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<sup>ème</sup> CNRIUT*, Villeurbanne, 2008.