

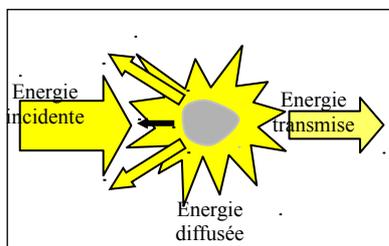
## CONTRIBUTION À LA COMPRÉHENSION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Pascal PERSONNE, Valéry SHCHERBAKOV, Christophe  
VERHAEGE, Denis CAJAL, Yahya GOUR et Guy FEBVRE  
IUT d'Allier et de Clermont-Ferrant  
Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP)

Les premiers modèles climatiques datent des années 1990. C'est aussi à cette date que le premier rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) est paru. Dès le 4ème (2007) et le 5ème (2014) rapports, la grande incertitude sur le rôle joué par les nuages et les aérosols par rapport au rayonnement solaire (longueur d'onde  $\approx 0,5 \mu\text{m}$ ) a été soulignée. Spécialisé dans les nuages et dans l'atmosphère, c'est naturellement que le Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP) choisit d'étudier l'interaction nuage-rayonnement. A l'IUT d'Allier, des sondes de laboratoire et montées sur avion ont été conçues et réalisées afin de quantifier la diffusion de la lumière par les aérosols et les particules nuageuses (eau et/ou glace).

### **INTRODUCTION**

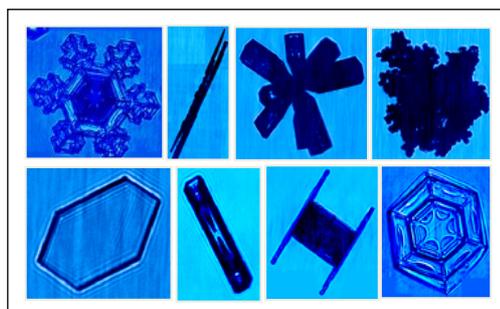
L'IUT d'Allier est un IUT "délocalisé" par rapport à l'Université "mère" située à Clermont-Ferrand. En 1985 à Montluçon, un département Génie Thermique et Energie a été créé. Dans cette spécialité, mécanique des fluides et transfert de chaleur sont enseignés et c'est pour cette raison que des enseignants-chercheurs de la 37ème section ont été recrutés. De même un département Génie Biologique de l'IUT de Clermont-Ferrand est délocalisé à Aurillac. Pour enseigner les matières de l'option génie environnement de cette formation, il a été aussi fait appel à un enseignant-chercheur 37ème section.



*Fig.1 – Phénomène de diffusion. Dans le cas de gouttes d'eau de diamètre supérieur à  $100\ \mu\text{m}$  une énergie importante est diffusée à environ  $142^\circ$  : c'est l'arc en ciel. La flèche noir représente l'énergie rétro-diffusée utilisée dans le cas des radars et Lidar*

Lorsqu'une particule est éclairée (Fig. 1) une partie de cette énergie est transmise et une autre est absorbée. Après excitation par l'énergie absorbée, une partie de cette énergie est réémise dans toutes les directions, c'est la diffusion.

Les nuages sont constitués de gouttes d'eau liquide sphériques et de cristaux de glace. L'état liquide de l'eau peut subsister jusqu'à des températures inférieures à  $-30^\circ\text{C}$  : c'est de l'eau surfondue. Les cristaux de glace possèdent des formes variées de symétrie 6 (Fig. 2). Dans certaines de ces particules est inclus de l'air (aiguilles creuses, cristaux givrés).



*Fig.2 – Différentes formes de cristaux de glace échantillonnés en nuage (étoile à 6 branches, aiguilles creuses, plaques hexagonales, particule givrée ...)*

Le diamètre des gouttes d'eau nuageuse varie du micromètre à quelques millimètres. Lorsque les gouttes sont petites,

on peut en dénombrer jusqu'à 1000 gouttes/cm<sup>3</sup>. Ces caractéristiques microphysiques doivent être mesurées avec des appareils montés sur avion se déplaçant à des vitesses de l'ordre de 100 m/s à l'intérieur des nuages. Compte tenu de la difficulté de ces mesures, la qualification et l'intercomparaison des mesures sont l'objet d'études permanentes source d'amélioration et de modification des sondes permettant aussi une quantification de l'incertitude sur ces données<sup>1</sup>.

Ces particules nuageuses ainsi que les aérosols présents dans l'atmosphère ont 2 effets. Soit ils réfléchissent le rayonnement solaire direct augmentant ainsi l'albédo de l'atmosphère entraînant une diminution de l'énergie reçue et donc de la température de la Terre : c'est l'effet parasol, soit ils absorbent le rayonnement Infra-Rouge de la Terre (10 µm) et réémettent une partie vers la Terre : c'est l'effet de serre provoquant le réchauffement de la Terre.

Afin de quantifier ces effets, des approches expérimentales et théoriques sont menées depuis les années 1988 soit environ 28 années de recherche à l'IUT d'Allier. Deux appareils mesurant la diffusion de la lumière ont été imaginés et réalisés : ce sont des "néphélomètres". Pour tester la version montée sur avion, une soufflerie ouverte a aussi été réalisée et installée au sommet du Puy de Dôme afin de bénéficier de conditions nuageuses sans utiliser d'avion.

## **NEPHÉLOMÈTRE AÉROPORTÉ**

Le principe de cet appareil est d'éclairer avec un faisceau Laser (0,8 µm) les particules nuageuses passant dans le volume d'échantillonnage (Fig. 3). La lumière diffusée dans le plan perpendiculaire à l'écoulement est réfléchiée par un miroir parabolique dans l'axe de la sonde qui est aussi celui de l'écoulement. Environ 35 photodiodes mesurent l'énergie diffusée dans des directions comprises entre 7° et 170°.

<sup>1</sup> Febvre, G. ; Gayet, J.-F. ; Shcherbakov, V. N. ; Gourbeyre, C. ; Jourdan, O. : *Some effects of ice crystals on the FSSP measurements in mixed phase clouds*, Atmos. Chem. Phys. Vol. 12, No. 19, p. 8963-8977 DOI 10.5194/acp-12-8963-2012 (EGU), 2012.

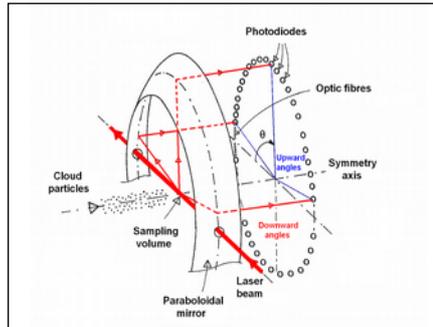


Fig.3 – Principe de mesure du néphélogène aéroporté.

Tout le DAO et la CAO ont été initiés avec les logiciels EUCLID (Matra Datavision) puis en 2000 avec CATIA (Dassault Systèmes). C'est un Ingénieur d'Etudes du Département GMP de l'IUT d'Allier qui a réalisé ce travail (Fig. 4).

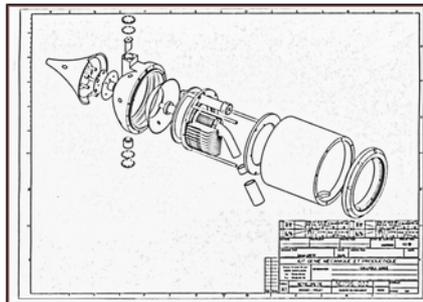


Fig.4 – Plan d'ensemble.

En 1996 cette sonde a été montée pour la première fois sur un avion (Fig. 5) pour étudier les traînées de condensation formées à l'arrière des moteurs d'avion<sup>2</sup>. La combustion des moteurs rejettent de l'eau à haute altitude. Compte tenu de l'augmentation prévue du trafic aérien, il fallait connaître la

<sup>2</sup> Gayet, J.-F. ; Auriol, F. ; Oshchepkov, S. ; Schröder, F. ; Duroure, C. ; Febvre, G. ; Fournol, J.-F. ; Crépel, O. ; Personne, P. ; Dageron, D. : *In situ measurements of the scattering phase function of stratocumulus, contrails, and cirrus*, Geophys. Res. Lett. Vol. 25, No. 7, p. 971-974 DOI 10.1029/98GL00541 (AGU), 1998.

composition de ces trainées de condensation. Actuellement, ces rejets d'eau dans la haute atmosphère ne sont pas pris en compte dans les modèles climatiques.



Fig.5 – Néphélomètre monté sous l'aile du Falcon du DLR (Centre Allemand de recherches aérospatial).

Afin de déduire de ces mesures, les paramètres micro-physiques des nuages échantillonnés, des méthodes d'inversion ont aussi été développées. Ces méthodes d'inversion utilisent la théorie de la diffusion de Mie. La granulométrie, c'est-à-dire la concentration en fonction de la taille, ainsi que les valeurs des indices de réfraction réel et imaginaire sont restituées dans le cas de particules de forme sphérique<sup>3,4</sup>.

Depuis, cette sonde a participé à 15 campagnes internationales de mesures. Ces campagnes réunissent souvent en un même lieu, sous une couverture satellite, des instruments de mesure au sol (Lidar, ...) et des avions de recherche. Cette sonde a également été posée 2 fois au sol à la base Amundsen-Scott (Pôle Sud)<sup>5</sup>. Plus de 40 publications de rang A ont utilisé

---

<sup>3</sup> Verhaege, C. ; Shcherbakov, V. N. ; Personne, P. : *Limitations on retrieval of complex refractive index of spherical particles from scattering measurements*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer Vol. 109, No. 14 , p. 2338-2348 DOI 10.1016/j.jqsrt.2008.05.009 (Elsevier), 2008.

<sup>4</sup> Verhaege, C. ; Shcherbakov, V. N. ; Personne, P. : *Retrieval of complex refractive index and size distribution of spherical particles from Dual-Polarization Polar Nephelometer data* J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer Vol. 110, No. 14-16, p. 1690-1697 DOI 10.1016/j.jqsrt.2009.01.004 (Elsevier), 2009.

<sup>5</sup> Shcherbakov, V. N. ; Gayet, J.-F. ; Baker, B. ; Lawson, P. : *Light Scattering by Single Natural Ice Crystals*, J. Atmos. Sci. Vol. 63, No. 5, p.

les données issues de cette sonde unique au monde. Une deuxième version intégrant les derniers progrès électroniques est actuellement testée. Comme pour la première version, toute la partie électronique de cette sonde a été mise au point par un Ingénieur de Recherche du laboratoire.

### **NEPHELOMETRE DE LABORATOIRE**

La lumière du Soleil n'est pas polarisée. Malgré cette non polarisation de l'énergie incidente, une partie de la lumière diffusée sera polarisée. C'est essentiellement la partie arrière de la diffusion qui est polarisée.

Pour quantifier ce phénomène et constituer une base de données du degré de polarisation de la lumière diffusée en fonction du type d'aérosol un néphélomètre de laboratoire a été réalisé. Le principe est le même que le néphélomètre aéroporté, c'est-à-dire un flux de particules stable croise un faisceau laser perpendiculairement. La détection de l'énergie diffusée se fait cette fois-ci sans miroir pour éviter de modifier la polarisation du signal. Deux capteurs analysant dans deux directions de polarisation perpendiculaires sont montés sur un bras tournant autour du volume d'échantillonnage. Toute la procédure d'acquisition et de traitement de la mesure est faite avec Labview. C'est un enseignant-chercheur 63ème section (génie électrique, électronique, photonique et systèmes) à l'IUT d'Allier qui a développé cette partie.

La Figure 6 montre quelques mesures réalisées avec cet appareil. Selon l'aérosol (eau, carbone et lycopode) la polarisation de la diffusion arrière est très clairement différente.

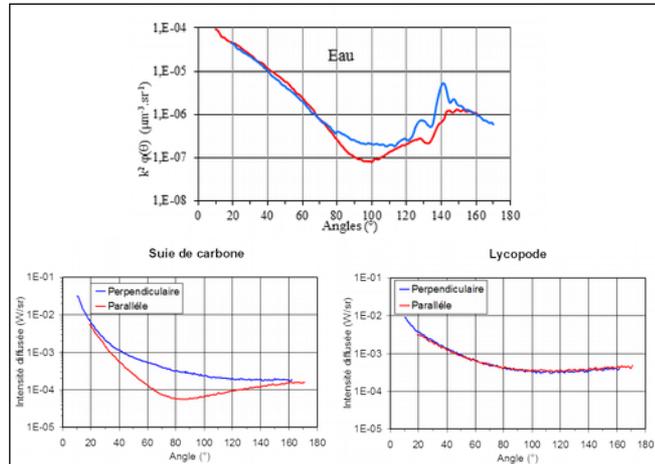


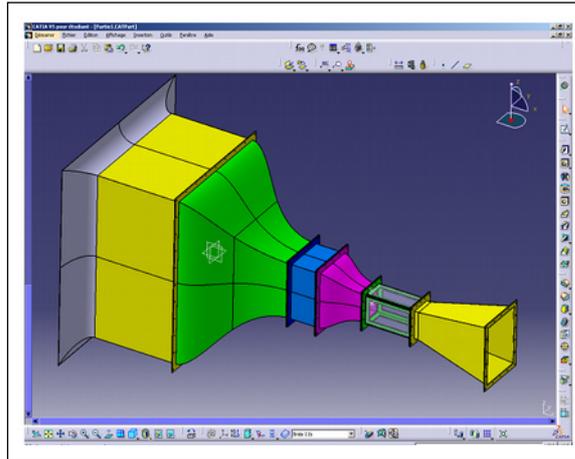
Fig.6 – Différentes indicatrices de diffusion : l'énergie diffusée est représentée en fonction de l'angle. Dans le cas de l'eau on reconnaît les deux arcs en ciel. Le premier à environ 142° et le deuxième, plus atténué, à 128°. Si on fait tourner un polariseur devant son œil, à un moment donné l'arc en ciel disparaîtra car cette lumière diffusée est polarisée. Dans le cas du lycopode on a un aérosol très absorbant qui ne polarise pas la lumière diffusée.

Deux campagnes de mesure ont été faites avec cet appareil dans la chambre à nuage installée à Karlsruhe. Il est aussi utilisé actuellement dans le cadre des travaux d'un GDR (Groupe De Recherche) sur les suies.

## SOUFFLERIE

Afin de tester nos sondes aéroportées en condition nuageuse sans utiliser des avions, une soufflerie ouverte a été aussi dessinée au département GMP de l'IUT d'Allier sous CATIA (Fig. 7). Une fois réalisée cette soufflerie a été placée dans le chalet de l'observatoire situé en haut du Puy de Dôme (1465 m). Le sommet de cet ancien volcan est ouvert à tous les flux d'air quelles que soient leurs directions. L'observatoire étant classé "monument historique", il a fallu accepter beaucoup

de contraintes pas toujours compatibles avec la demande du physicien concepteur (Fig. 8).



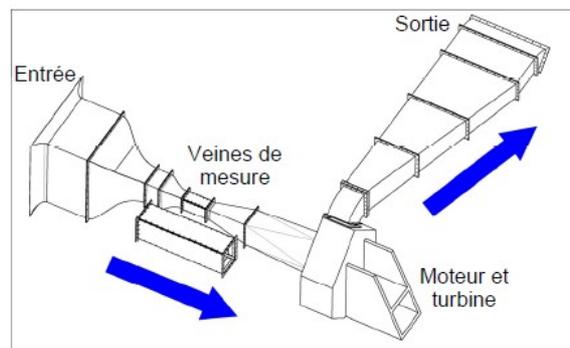
*Fig.7 – Plan d'ensemble sous CATIA de la première partie (convergent, petite veine de mesure).*



*Fig.8 – Entrée de la soufflerie dans le chalet de l'observatoire au sommet du Puy de Dôme.*

Un ventilateur centrifuge a dû être utilisé. De ce fait l'air aspiré est renvoyé perpendiculairement à l'axe de la soufflerie (Fig. 9). La vitesse de rotation du moteur entraînant le ventilateur étant variable, le débit d'air est aussi modulable jus-

qu'à atteindre la valeur de  $17 \text{ m}^3/\text{s}$ . Entre le convergent et le divergent deux veines de mesure interchangeables peuvent être placées. La petite de section  $250 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$  (longueur  $0,6 \text{ m}$ ) permet d'atteindre la vitesse de  $120 \text{ m/s}$  (Mach  $0,3$ ), la seconde est plus grande  $500 \text{ mm} \times 640 \text{ mm}$  (longueur  $2 \text{ m}$ ) et la vitesse maximale est alors de  $52 \text{ m/s}$ . La qualification de cette soufflerie a été faite par des mesures et aussi à l'aide du logiciel OpenFOAM (stage d'une étudiante DUT GTE). Il s'agissait de simuler l'écoulement dans la veine de mesure en fonction de la direction du vent extérieur.



*Fig.9 – Vue d'ensemble de la soufflerie avec les 2 veines de mesure interchangeables.*

Durant environ 200 jours sur 365, le sommet du Puy de Dôme est en nuage. La plupart du temps ce sont des nuages d'eau liquide. Durant les mois d'hiver, la température de l'air est d'environ  $-5^\circ\text{C}$ . Les gouttes d'eau nuageuses sont donc sur-fondues. Cet état est très difficile à reproduire en laboratoire et est un état d'équilibre instable qui cesse dès qu'il y a choc avec un obstacle : c'est le phénomène de givrage. Pour toutes ces raisons, elle est utilisée pour tester des instruments à vocation aéropportée mais pour des projets relevant du domaine aéronautique avec ou sans givrage.

Outre cette soufflerie le chalet est équipé d'une multitude d'instruments nécessaires aux études des propriétés chimiques, climatiques et microphysiques de l'air et des nuages. Certaines de ces mesures représentent des données collectées

sur une vingtaine d'années. C'est pour cette raison qu'en 2016 cette station de mesure a obtenu par l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie) le label GAW (Global Atmospheric Watch). C'est la seule en France et pour l'instant il n'en existe qu'une trentaine dans le monde.

## PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS

Ces activités de recherche menées au sein d'IUTs se développent. Il s'agit d'améliorer la mesure, de prendre en compte la rugosité des cristaux de glace<sup>6</sup>. D'autre part il faut intégrer les résultats obtenus avec ces mesures aéroportées à d'autres moyens d'observation par télédétection par exemple. Cette approche combinera les observations et la modélisation afin de mieux comprendre l'évolution et le rôle des nuages dans le système climatique de la Terre.

A plus grande échelle, la composition hétérogène d'un champ de nuages est modélisée<sup>7</sup> pour évaluer son impact sur le rayonnement. Cette hétérogénéité se retrouve suivant l'altitude (différentes couches de nuages) mais aussi horizontalement (champ de nuages parcellaires et nuage à trous).

## REMERCIEMENTS

Tout ce travail présenté n'aurait pas été possible sans l'implication efficace des ingénieurs et des techniciens. Les auteurs remercient particulièrement Messieurs Gérard CANGI,

---

<sup>6</sup> Shcherbakov, V. N., *Why the 46° halo is seen far less often than the 22° halo?*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer Vol. 124, No. 1, p. 37-44 DOI 10.1016/j.jqsrt.2013.03.002 (Elsevier), 2013

<sup>7</sup> [7] Szczap, F. ; Gour, Y. ; Fauchez, T. ; Cornet, C. ; Faure, T. ; Jourdan, O. ; Penide, G. ; Dubuisson, P. : *A flexible three-dimensional stratocumulus, cumulus and cirrus cloud generator (3DCLOUD) based on drastically simplified atmospheric equations and the Fourier transform framework*, Geosci. Model Develop. Vol. 7, No. 4, p. 1779-1801 DOI 10.5194/gmd-7-1779-2014 (EGU), 2014.

Jean-François FOURNOL, Christophe GOURBEYRE, Sylvain  
LEPETIT, Daniel ROBIN et Pascal VELLEAUD.