

Développement d'un prototype sol pour la mesure d'extinction en environnement nuageux

P. Coutris¹, G. Febvre¹, F. Peyrin², J. Gironnet³, G. Degret³

¹ Laboratoire de Météorologie Physique, CNRS/ UCA, Aubière, France

² Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, CNRS/ UCA, Aubière, France

³ Division Technique INSU, CNRS, Meudon, France

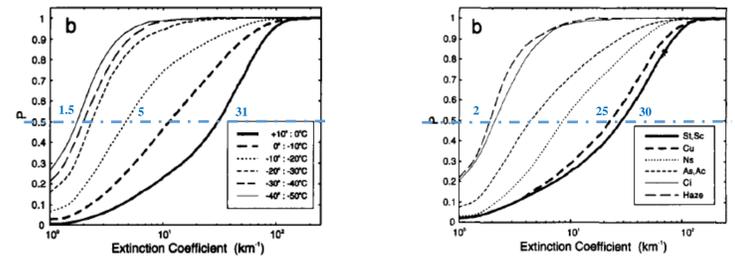
Contexte scientifique

Etude des **interactions nuage-rayonnement** :

- Les nuages ont un rôle prépondérant dans le bilan radiatif terrestre du fait de la forte interaction entre les hydrométéores (gouttelettes d'eau et/ou cristaux de glace) qui les constituent avec le rayonnement solaire et tellurique (Liou 2002).
- La caractérisation des propriétés optiques des nuages, de glace en particulier du fait de leur microstructure complexe, compte parmi les défis scientifiques actuels (Kokhanovsky 2004). Sur ce point, la **mesure in situ** est un levier important.
- L'**extinction** (ou l'épaisseur optique qui en découle) est une propriété optique fondamentale. Elle caractérise l'atténuation d'une onde lumineuse traversant un milieu du fait des **processus d'absorption** et de **diffusion**.

$$\beta(\lambda) = c_{abs}(\lambda) + c_{sca}(\lambda)$$

λ : longueur d'onde de l'onde incidente, c_{abs} : coef. d'absorption (m^{-1}), c_{sca} coef. de diffusion (m^{-1})



Mesures d'extinction réalisées par le *Central Aerological Observatory* entre 1977 et 1984 par mesure de transmission in situ directe (Korolev et al. 2001)

Motivation

Les valeurs d'extinction disponibles pour la science sont :

- Mesurées à l'aide de transmissiomètres: le principe de mesure souffre d'une limitation intrinsèque (diffusion avant) très pénalisante dans le cas des nuages de glace par exemple.
- Déduites de mesures in situ moyennant hypothèses et/ou approximations qui les rendent assez incertaines:
 - Granulométrie : distribution de taille (gouttes et/ou cristaux)
 - Néphélométrie : indicatrice de diffusion entre 10 et 170°
- Restituées à partir de mesures de télédétection active (LIDAR/RADAR) moyennant des hypothèses fortes sur le milieu traversé, et donc potentiellement très approximatives

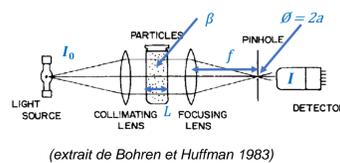
➢ A ce jour, **pas de solution commercialement disponible** pour réaliser des mesures de référence

➢ **Développement** d'un extinciomètre nuage

Gamme de mesure: $\beta \in [0.1 - 100 \text{ km}^{-1}]$
Longueur d'onde $\lambda = 808 \text{ nm}$ (NIR)
Usage mesures sol (pour commencer)

Mesure de transmission : le défi de la diffusion avant

Loi de **Beer-Bouguer-Lambert** : $I/I_0 = \exp(-\beta L)$



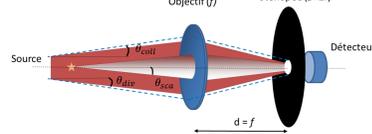
(extrait de Bohren et Huffman 1983)

où:

- I, I_0 : intensité **transmise** et incidente ($W.m^{-2}$)
- β : coefficient d'extinction volumique (m^{-1})
- L : longueur optique au travers du milieu échantillonné (m)

➔ Nécessité de ne mesurer que l'intensité transmise (ni absorbée, ni diffusée)

Champ de vision du détecteur : $\tan \theta_{coll} = \frac{r}{f}$



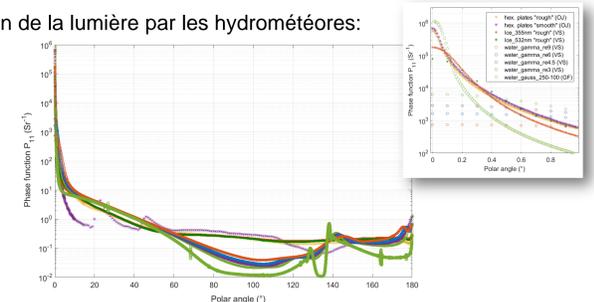
Sous-estimation du coefficient d'extinction à cause de la contamination liée à la diffusion vers l'avant

$$\beta^* = \beta - 2\pi \int_0^{\theta_{coll}} \mu(\theta) \sin(\theta) d\theta$$

où:

- β, β^* : coefficient d'extinction volumique réel et mesuré (m^{-1})
- $\mu(\theta)$: section efficace volumique de diffusion (m^{-1})

Diffusion de la lumière par les hydrométéores:

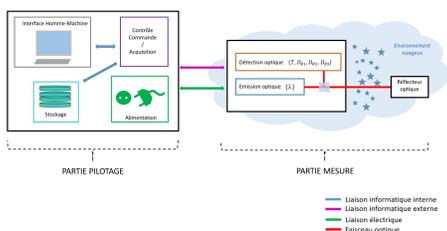


- Pic vers $\theta \approx 0^\circ$: Diffusion majoritairement très proche de l'axe optique
- Forte influence des propriétés microphysiques des hydrométéores : pas de modèle théoriques fiables et représentatifs de la variabilité naturelle

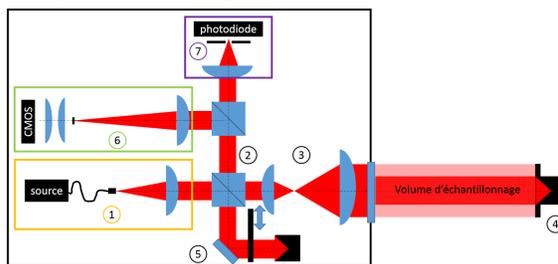
➔ **quantification de l'énergie diffusée par mesure in situ**

Architecture générale et principe de mesure

A court terme: installation sur le toit-terrasse du Site Instrumenté CO-PDD



Une **partie « mesure » inventive** : réalisation de mesures coïncidentes et colocalisées de la puissance lumineuse transmise et diffusée par les particules de nuages

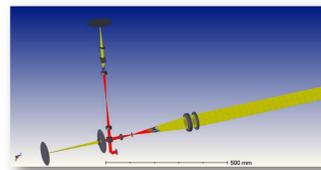


Difficultés anticipées: génération d'un faisceau collimaté d'intensité uniforme, mesure de la puissance diffusée proche avant avec résolution angulaire suffisante, problèmes de réflexion/diffraction parasite

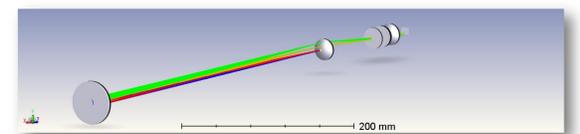
Réalisations en cours

Etudes préliminaires théoriques et numériques

- Analyse de l'existant, spécification du besoin
- Calculs de pré-dimensionnement: estimation de la puissance diffusée, bilan radiométrique
- Définition d'une architecture et création d'un modèle numérique à l'aide du logiciel Zemax (études optiques, pré-validation de solutions techniques)

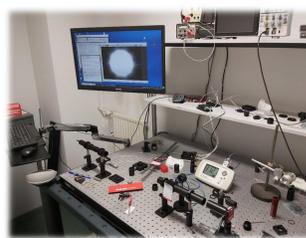


Etude du positionnement des lentilles du beam expander et du relai d'imagerie (téléscope 1:1)

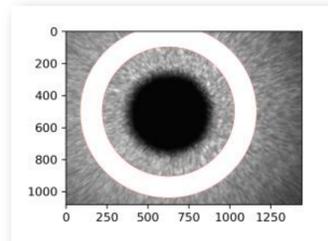


Etude d'un système optique de type coronographe pour imager le plan de Fourier de la lentille objectif sur une capteur multiélément CMOS

Assemblage Intégration & Test (en cours):



Création d'un démonstrateur technologique de paillasse :
Intégration et tests progressifs des différentes solutions techniques



Exemple de cartographie de la puissance optique diffusée par un filtre optique à l'aide d'une caméra CMOS

Perspectives

En plus de la mesure du coefficient d'extinction, la cartographie détaillée de la section efficace de diffusion que réalisera cet instrument devrait permettre d'obtenir des informations sur d'autres propriétés caractéristiques des nuages telles que la phase (liquide/mixte/solide) ou encore la taille, la forme et l'existence d'une éventuelle orientation des hydrométéores. Une fois réalisé, le prototype sera installé sur le toit-terrasse du chalet du site instrumenté du Puy de Dôme pour la réalisation de mesures en environnement nuageux naturel et une évaluation de ses performances.

A court terme, l'effort est placé sur le développement du démonstrateur pour valider les solutions choisies et dérisquer progressivement les mesures réalisées, ainsi que sur la définition d'un projet permettant d'inscrire cet effort de développement dans un cadre plus pérenne. A long terme, une version aéroportée pourrait enrichir l'offre de mesure de l'IN Plateforme de Mesures Aéroportées tout en créant des synergies instrumentales avec le néphélomètre polaire et les différents granulomètres,

Quid d'un besoin similaire dans les autres domaines thématiques de l'INSU:

- Volcanologie** : visiblement pas d'instrument disponible pour la caractérisation in situ des propriétés optiques des panaches volcaniques
➔ opportunité de développement commun ?
- Océanographie** : les instruments commerciaux disponibles sont-ils suffisant pour les besoins de mesures ?



Remerciements : Ce projet a bénéficié du support de la Division Technique de l'INSU sur la période 2020-2021. Les phases d'étude, de conception optique et la réalisation du démonstrateur ont été financées par des crédits CNES & CNRS/INSU (soutien recurrent INE PMA), par des crédits OPGC (Action Incitative 2022) et des crédits liés à la valorisation de l'INE PMA auprès d'industriels (certification girvage aéronautique). Nous remercions par ailleurs nos collègues Jean-François Fournol (LaMP), Julien Totems (LSCE), François Reveret (Institut Pascal, puis ICCF) et Edgard Renault (LAM) pour leurs précieux conseils et leur aide ponctuelle.