



**HAL**  
open science

## Caractérisation du givrage par réfractométrie d'arc-en-ciel

Sawitree Saengkaew, Gilles Godard, Gérard Gréhan

► **To cite this version:**

Sawitree Saengkaew, Gilles Godard, Gérard Gréhan. Caractérisation du givrage par réfractométrie d'arc-en-ciel. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097675

**HAL Id: hal-02097675**

**<https://hal.science/hal-02097675>**

Submitted on 12 Apr 2019

**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.

# Caractérisation du givrage par réfractométrie d'arc-en-ciel.

Sawitree SAENKAEW<sup>1</sup>, Gilles GODARD<sup>2</sup>, Gérard GREHAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *RainbowVision*, 30 rue Eau de Robec, 76000, Rouen, France

<sup>2</sup>UMR CNRS 6614/CORIA, Université de Normandie, Campus de Rouen, 76800, Saint Etienne de Rouvray, France

Email auteur correspondant : s.sawitree76@rainbow-visions.com

La caractérisation des propriétés thermo-chimiques (température et composition) de particules en écoulement est un défi, riche d'applications académiques et industrielles dans de nombreux domaines comme la combustion [1], les moteurs d'avions, le givrage, les sècheurs de sprays, la chimie hétérogène [2, 3] . . .

Pour relever ce défi, l'une des solutions est de mesurer l'indice de réfraction des gouttes, puis de relier cet indice de réfraction à la température ou à la composition de celles-ci. La société *RainbowVision* a développé un tel appareil, basé sur l'analyse de la lumière diffusée aux alentours de l'angle d'arc-en-ciel. Cet appareil permet la mesure précise de l'indice de réfraction moyen, donc de la température et/ou de la composition, et de la distribution de taille de gouttes en écoulement.

Un domaine où la connaissance de la température des gouttes est particulièrement important est celui du givrage. En effet recréer les conditions naturelles du givrage dans une soufflerie est un défi, riche d'applications industrielles (sécurité des avions, réallumage en vol, ..). Une difficulté importante est la détermination de la température des gouttes d'eau. Dans la nature, le temps de séjours des gouttes est long, donc la température des gouttes peut être supposée égale à celle de l'air. Dans une soufflerie froide, les gouttes doivent être injectées à une température positive, puis voyagent sur quelques mètres, ce qui correspond à un temps de séjours courts, limitant les échanges de température entre les gouttes et l'air. La mesure de la température et de la distribution de taille des gouttes avant l'impact sur un obstacle est donc cruciale pour la caractérisation du givrage.

Le but de cet article est de présenter et de valider une technique permettant de mesurer la température et la distribution de taille de gouttes d'eau dans une soufflerie froide.

## 1 Introduction

Les sprays sont classiquement caractérisés par des paramètres géométriques tels que: distribution granulométrique, distribution de la vitesse, densité, corrélation taille / vitesse, etc. Néanmoins, les paramètres thermo-chimiques comme la température de la pulvérisation et la composition de la pulvérisation sont également des paramètres importants pour comprendre les phénomènes physiques ainsi que pour maîtriser un grand nombre de processus industriels tels que l'évaporation.

La température et la composition affectent la valeur de l'indice de réfraction des gouttelettes dans un spray. Ainsi, la mesure de l'indice de réfraction est une mesure de ces deux grandeurs. En conséquence, la GRT (Global Rainbow Technique) a été développée [4] pour mesurer simultanément l'indice de réfraction (donc la température et / ou la composition) ainsi que la distribution de la taille des gouttelettes. En analysant la lumière diffusée par des gouttelettes autour de l'angle d'arc-en-ciel, l'indice de réfraction peut être extrait de la position de l'arc-en-ciel, tandis que la distribution de la taille des gouttelettes peut être extraite de la forme de l'arc-en-ciel global [5, 6, 7]. La technique GRT a été utilisée avec succès dans différentes applications, notamment dans le domaine de la combustion liquide, où les évolutions de température des gouttelettes de carburant au voisinage du front de flamme ont été mesurées [1]. L'évaporation du carburant multi-composants a également été quantifiée en mesurant le taux d'évaporation et la composition des gouttelettes [8]. Dans le domaine de la chimie où le degré d'avancement de la réaction entre un gaz et un liquide réactif a été déterminée pour la capture du CO<sub>2</sub> par un spray de MEA [2, 3] (par exemple).

Un autre domaine potentiel pour l'application de la GRT est l'instrumentation des souffleries froides

(Icing Wind Tunnels: IWT). Les souffleries froides sont utilisées pour étudier le givrage et le dégivrage des avions, des câbles électriques, les éoliennes, etc. Dans ce domaine particulier, la mesure de la température des gouttelettes est critique. En effet, dans l'environnement naturel les gouttelettes d'eau sont dans l'air pendant une longue période permettant de supposer que la température des gouttelettes est égale à la température de l'air. Au contraire, dans une soufflerie froide, les gouttelettes sont injectées à une température positive et le temps de séjour est limité. Ainsi, les gouttelettes n'ont pas toujours le temps d'être en équilibre thermique avec l'air pour toutes les conditions de travail de la soufflerie. Par conséquent, la mesure de la température des gouttelettes dans les IWT est un défi pour pouvoir maîtriser les conditions de givrage.

Cette contribution est organisée comme suit. La première section est un bref rappel du principe de la GRT. La section suivante présente la validation des mesures GRT, en accordant une attention particulière à la dépendance de l'indice de réfraction de l'eau avec la température. La section suivante montre les résultats préliminaires des mesures de comportement en température de gouttes en surfusion dans une soufflerie froide (PAG au DGA-EP). Enfin, nos conclusions sont présentées.

## 2 Principe de la GRT

Les techniques arc-en-ciel sont basées sur l'enregistrement de la lumière diffusée par les gouttelettes autour de l'angle d'arc-en-ciel. En analysant la distribution angulaire de la lumière diffusée, l'indice de réfraction et la distribution de taille des particules sont estimés. La technique arc-en-ciel standard fait référence au cas où la lumière enregistrée est émise à partir d'une seule gouttelette ou de gouttelettes supposées identiques et au même endroit. Les techniques arc-en-ciel standard sont très précises, permettant de mesurer l'indice de réfraction, la taille et le taux d'évaporation mais dans des configurations très restrictives [6]. La technique globale de l'arc-en-ciel (GRT) désigne le cas où la lumière enregistrée est émise par différentes gouttelettes situées au hasard dans le volume de contrôle. La technique est moins sensible à la forme des particules que la technique standard de l'arc-en-ciel. La GRT permet de mesurer in situ et simultanément une valeur moyenne de l'indice de réfraction (donc la température) et la distribution des tailles dans des pulvérisations réalistes. Il a été prouvé que la valeur moyenne de l'indice de réfraction est pondérée par la taille des gouttelettes en  $d^{7/3}$  [9].

## 3 Validation des mesures GRT

La GRT mesure simultanément un indice de réfraction moyen et une distribution de taille à partir d'images arc-en-ciel globales enregistrées. Ces deux mesures doivent être validées.

### 3.1 Validation de la mesure de l'indice de réfraction (température)

Il y a deux étapes principales pour extraire la température des gouttelettes en utilisant la GRT. D'abord, l'indice de réfraction moyen est extrait avec précision des images globales d'arc-en-ciel. Deuxièmement, l'indice de réfraction moyen est transformé en température moyenne en utilisant la relation appropriée.

Pour valider la mesure de l'indice de réfraction, des solutions étalons ont été utilisées. Ces solutions étalons ont été créées en mélangeant de l'eau et de l'éthanol à différents pourcentages. La figure 1 montre l'indice de réfraction mesuré par GRT dans la pulvérisation par rapport à l'indice de réfraction mesuré par un réfractomètre classique<sup>1</sup> sur le liquide en cuvette. Le résultat démontre que la mesure GRT à une précision équivalente au réfractomètre classique. On notera qu'une variation aussi faible que 0,0001 sur l'indice de réfraction est mesurable.

Pour de l'eau en surfusion, il n'est pas possible d'utiliser le réfractomètre classique pour obtenir la relation entre la température et l'indice de réfraction. Afin de transformer l'indice de réfraction des gouttelettes d'eau en température, la relation proposée par Duft et Leisner [10] est utilisée. En accord avec Duft et Leisner, la figure 2-a illustre la dépendance de l'indice de réfraction de l'eau avec la température. La figure 2-a montre que la valeur maximale de l'indice de réfraction est obtenue à une température de 0°C. Ensuite, pour des températures négatives et positives, les valeurs de la réfraction d'indice diminuent. En conséquence, une mesure de la valeur d'indice de réfraction correspond à deux valeurs possibles

<sup>1</sup>Aton Parr refractometer Abbemat 300

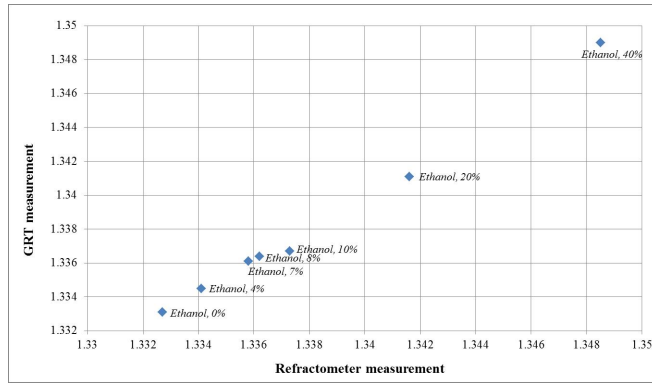
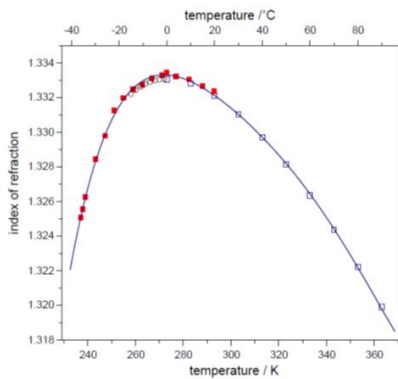


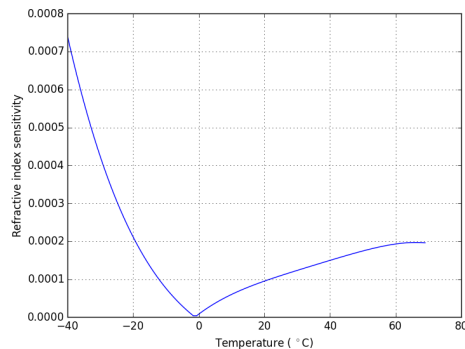
Figure 1: Comparaison des mesure d'indice de réfraction par GRT sur des gouttes et par réfractomètre en cuvette pour différents liquides étalons.

de la température. La figure 2-b représente la variation de la valeur d'indice de réfraction pour un changement de la température de  $1^{\circ}\text{C}$  entre  $-40^{\circ}\text{C}$  et  $+70^{\circ}\text{C}$ . Cette courbe souligne les faits:

- Que la sensibilité de la mesure de température est minimale autour de  $0^{\circ}\text{C}$ .
- Que le maximum de sensibilité de la température est pour une température inférieure à  $-20^{\circ}\text{C}$ .



(a) Indice de réfraction de l'eau en fonction de la température.



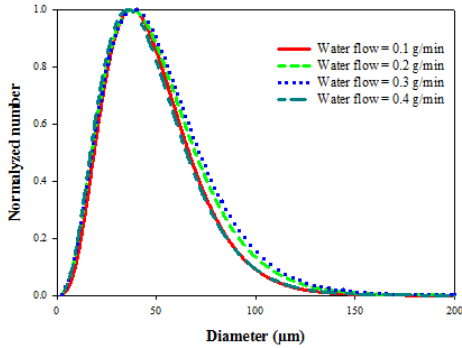
(b) Sensibilité de la mesure d'indice en fonction de la température

Figure 2: Relation entre l'indice de réfraction de l'eau et la température d'après Duft et Leisner [9].

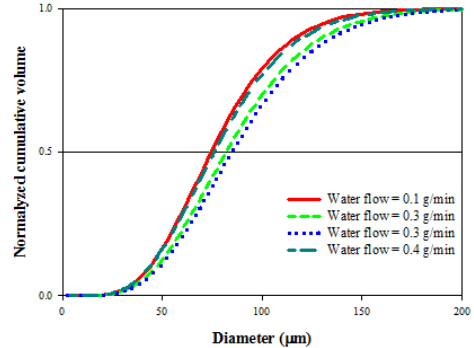
### 3.2 Validation des mesure de distribution de taille

L'anémométrie de phase Doppler (PDA) est utilisée pour valider les mesures de taille réalisées par la technique GRT. Un jet étalon de gouttelettes, créé par un injecteur à ultra-sons (Sonics, VCX 130, 45 kHz), est utilisé. Les mesures sont effectuées le long de l'axe de pulvérisation, à environ 5 cm de l'orifice. Les mesures GRT et PDA ont été effectuées simultanément mais les positions de mesure sont décalées d'environ 2 mm le long de l'axe longitudinal de pulvérisation. Chaque mesure PDA correspond à 50 000 gouttelettes tandis que la mesure GRT est une distribution de taille moyenne sur 100 images, chacune avec un temps d'exposition égal à 200 ms. Le débit d'eau est le paramètre utilisé pour modifier le jet. La comparaison de la mesure de taille entre les deux techniques est illustrée dans le tableau 1. Les distributions de tailles mesurées directement par le GRT et le PDA ont été ajustées par la fonction gamma, puis les distributions de volume normalisées ont été calculées à partir des distributions de taille ajustées par la fonction gamma.

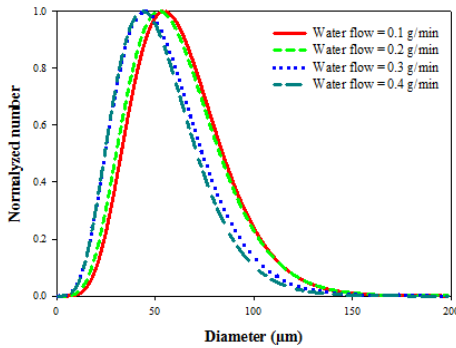
La figure 3 compile la distribution de taille obtenue ainsi que la distribution volumique associée pour les mesures PDA et GRT. Les courbes ne sont pas identiques mais les comportements obtenus sont proches. Ce fait est également supporté par le tableau 1 qui compile le maximum de la distribution de taille ajustée ( $D_{max}$ ), le diamètre moyen de volume (MVD) obtenu directement à partir de la mesure et le diamètre moyen obtenu à partir de la distribution ajustée (MVDg). La conclusion globale est que les mesures PDA et GRT MDV sont en accord à mieux que 10 %.



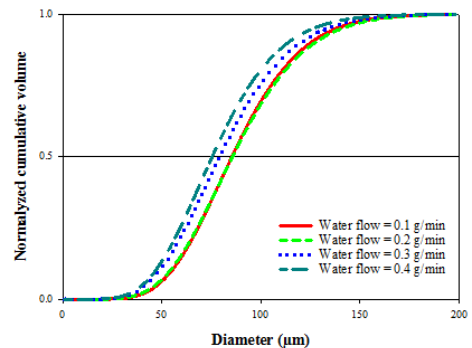
(a) Distribution de taille normalisée par PDA.



(b) Distribution volumique cumulée par PDA



(c) Distribution de taille normalisée par GRT



(d) Distribution volumique cumulée par GRT

Figure 3: Mesure des distribution de taille: comparaison des mesures PDA et GRT.

|                 | PDA                   |                  | GRT                   |                  |
|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| Flow rate (g/s) | $D_{max}$ ( $\mu m$ ) | MVDg ( $\mu m$ ) | $D_{max}$ ( $\mu m$ ) | MVDg ( $\mu m$ ) |
| 0.1             | 37.43                 | 75.20            | 54.78                 | 85.10            |
| 0.2             | 37.06                 | 82.14            | 52.26                 | 85.10            |
| 0.3             | 36.49                 | 84.90            | 45.27                 | 79.10            |
| 0.4             | 35.48                 | 76.03            | 44.01                 | 75.26            |

Table 1: Comparaisons entre les mesures PDA et GRT pour le diamètre maximum ( $D_{max}$ ) et le diamètre moyen volumique (MVDg).

## 4 Résultats préliminaires dans une soufflerie froide

Afin d'évaluer le potentiel des mesures de température par GRT pour les études de givrage dans une soufflerie froide, une série de mesures a été réalisée dans la soufflerie PAG de DGA-EP, supportée par

UM-AMS. La figure 4 est une vue schématique de l'installation PAG tandis que la table 2 compile les principales performances de la soufflerie PAG.

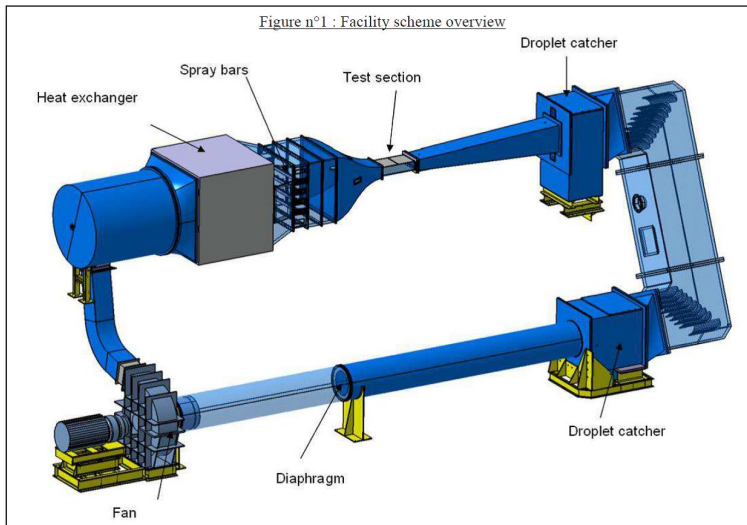


Figure 4: Schéma de l'installation PAG au DGA-EP.

|                                |                           |
|--------------------------------|---------------------------|
| Section d'essai                | 200 x 200 mm              |
| Débit massique d'air           | 2 à 10 Kg/s               |
| Vitesse (section d'essai vide) | 50 à 220 m/s              |
| Nombre de Mach (à 15°C)        | 0.70                      |
| Teneur en eau liquide          | 0.15 à 3 g/m <sup>3</sup> |
| Température totale de l'air    | de -40 à +15°C            |
| Diamètre médian volumique      | 15 à 50 μm                |

Table 2: Principales performances de l'installation PAG.

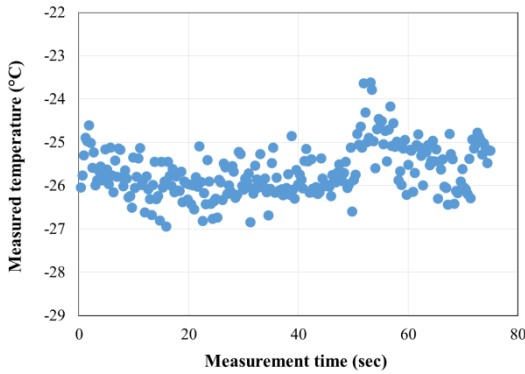
La figure 5-a montre le comportement de la température des gouttelettes en fonction du temps pour trois valeurs différentes d'hygrométrie (100, 150 et 200 %). On notera que, pour cette configuration particulière, la température des gouttelettes semble être indépendante du niveau d'hygrométrie.

La figure 5-b montre le comportement de la température des gouttelettes en fonction du temps pour deux valeurs du MVD. Il est évident que la température des gouttelettes dépend fortement de la taille des gouttelettes. La diminution de la taille des gouttelettes d'un MVD égal à 40 μm à un MVD égal à 20 μm conduit à une décroissance de la température d'environ 20°C.

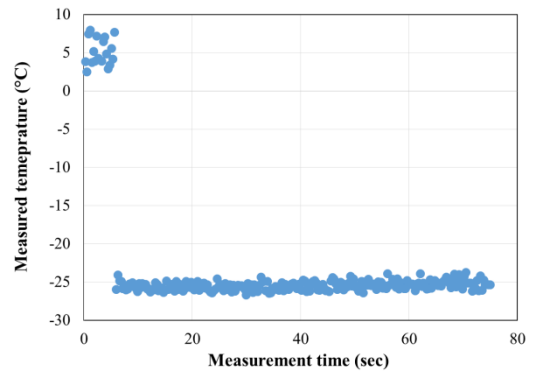
La figure 5-c montre le comportement de la température des gouttelettes (MVD = 20 μm) par rapport au moment où la vitesse de l'air augmente progressivement de 150 m/s à 200 m/s. La forme de la courbe est la même que la forme de la courbe de la vitesse. On notera que dans ce cas, la température des gouttelettes augmente d'environ 12°C.

La figure 5-d montre le comportement de la mesure de la température lorsque les gouttelettes de liquide gèlent en raison d'une modification du point de travail de la soufflerie. Ce comportement peut être classé dans trois zones. Dans une première zone, les gouttelettes sont liquides, en conséquence la température est stable (ligne horizontale), jusqu'à une position d'environ 120. Ensuite, le point de travail de la soufflerie froide est changé. Dans un premier temps (deuxième zone), la température des gouttelettes diminue régulièrement et rapidement. Mais dans la troisième zone, la température présente un comportement chaotique avec des variations importantes et rapides associées à des distributions de tailles dominées par de très petites particules. Ce comportement est une signature de particules de givre sans forme sphérique. Cette analyse est étayée par l'observation des images enregistrées de la répartition de la lumière diffusée à l'angle arc-en-ciel, comme illustré sur la figure 6. La figure 6-a

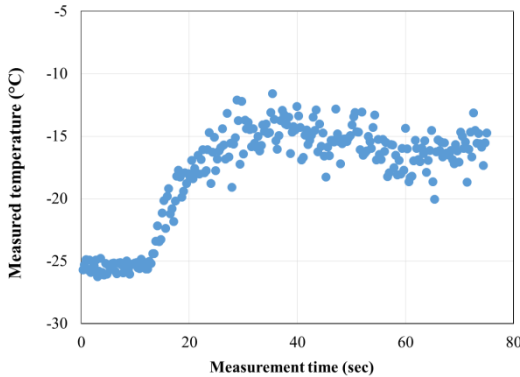
montre la diffusion de lumière enregistrée pour une gouttelette de liquide sphérique. Le motif arc-en-ciel est clairement visible. Au contraire, la figure 6-b montre la dispersion de lumière enregistrée pour une gouttelette gelée. La distribution de la lumière est essentiellement "uniforme"; aucun motif arc-en-ciel ne peut être identifié.



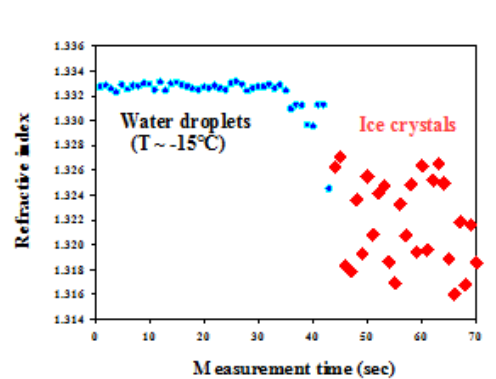
(a) Variation de l'hygrométrie (100, 150 and 200 %)



(b) Variation de la taille des gouttes (MVD de 40 à 20  $\mu\text{m}$ )



(c) Variation de la vitesse de l'écoulement (150 to 200 m/s)



(d) Passage de l'état liquide à l'état solide

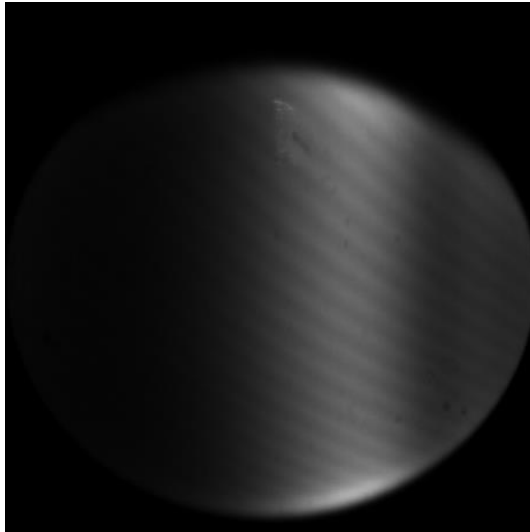
Figure 5: Evolution temporelle de la température des gouttes en fonction du temps pour différentes configurations de la soufflerie froide.

## 5 Conclusion

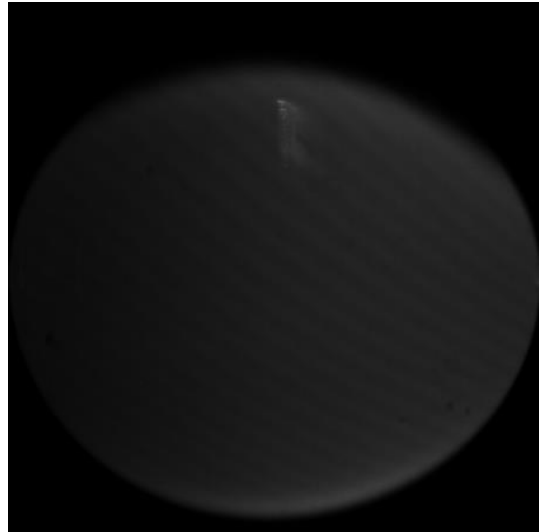
La mesure de la température des gouttelettes dans un tunnel de givrage est un défi. Dans cette présentation, il est démontré que la technique d'arc-en-ciel global (GRT), grâce à une configuration miniaturisée et un logiciel adapté, constitue une réponse potentielle intéressante à ce défi.

Dans une première partie de la contribution, il est prouvé que la précision du GRT est suffisante pour mesurer la température des gouttelettes avec une précision d'environ  $1^\circ\text{C}$  à  $-20^\circ\text{C}$ , de plus les mesures du diamètre volumique moyen (MVD) par GRT sont en accord avec les mesure du diamètre volumique moyen par PDA à environ 10%.

Dans une seconde partie, le dispositif GRT a été appliqué avec succès dans une soufflerie froide (PAG IWT au DGA-EP, Paris). La dépendance de la température des gouttelettes avec la taille des gouttelettes, la vitesse d'écoulement de l'air, l'hygrométrie ont également été illustrées ainsi que la transition de l'eau à la glace.



(a) Image d'arc-en-ciel pour une goutte liquide



(b) Image pour un cristal de glace.

Figure 6: Comparaison des images à l'angle d'arc-en-ciel pour des gouttes liquides et gelées.

## 6 Remerciements

Ce travail est partiellement supporté par Normandie Incubation, la Communauté Européenne (Projet FEDER-Thesis avec Zodiac Aerospace) et par la DGA (UM-AMS)

## References

- [1] A. Verdier, J.M. Santiago, A. Vandel, S. Saengkaew, G. Cabot, G. Grehan, and B. Renou. Experimental study of local flame structures and fuel droplet properties of a spray jet flame. *Proceedings of the combustion institute*, 36(2):2595–2602, 2017.
- [2] M. Ouboukhlik, G. Godard, S. Saengkaew, M.C. Fournier-Salaun, L. Estel, and G. Grehan. Mass transfer evolution in a reactive spray during carbon dioxide capture. *Chemical Engineering and Technology*, 38(7):1154–1164, 2015.
- [3] M. Ouboukhlik, S. Saengkaew, M.C. Fournier-Salaun, L. Estel, and G. Grehan. Local measurement of mass transfer in a reactive spray for  $CO_2$  capture. *The Canadian Journal of chemical Engineering*, 93(2):419–426, 2015.
- [4] J.P.A.J. van Beeck, D. Giannoulis, L. Zimmer, and M.L. Riethmuller. Global rainbow refractometry for droplet temperature measurement. *Optics Letters*, 24:1696–1698, 1999.
- [5] S. Saengkaew. *Development of novel global rainbow technique for characterizing spray generated by ultrasonic nozzle*. PhD thesis, University of Chulalongkorn (Bangkok, Thailand) and University of Rouen, 2006.
- [6] S. Saengkaew, T. Charinpanikul, C. Laurent, Y. Biscos, G. Lavergne, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Processing of individual rainbow signals to study droplets evaporation. *Experiments in Fluids*, 48:111–119, 2010.
- [7] S. Saengkaew, G. Godard, J.B. Blaisot, and G. Grehan. Experimental analysis of global rainbow technique: sensitivity of temperature and size distribution measurements to non-spherical droplets. *Experiments in Fluids*, 47:839–848, 2009.
- [8] J. Promvongsa, P. Vallikul, B. Fungtanmasan, A. Garo, and G. Grehan. Multicomponent fuel droplet evaporation using 1d global rainbow technique. *Proceedings of the combustion institute*, 36(2):2401–2408, 2017.



- [9] S. Saengkaew, V. Bodoc, G. Lavergne, and G. Grehan. Application of global rainbow technique in sprays with a dependence of the refractive index on droplet size. *Optics Communications*, 286:295–303, 2012.
- [10] D. Duft and T. Leisner. The index of refraction of supercooled solutions determined by the analysis of optical rainbow scattering from levitated droplets. *Int. J. of Mass Spectrometry*, 2003.