



**HAL**  
open science

## Evaluation des phénomènes de givrage atmosphérique par accrétion de neige collante en soufflerie climatique

Alessandro Vigano, Philippe Delpech, Sylvain Aguinaga, Didier Guffond,  
Jacques Borée

► **To cite this version:**

Alessandro Vigano, Philippe Delpech, Sylvain Aguinaga, Didier Guffond, Jacques Borée. Evaluation des phénomènes de givrage atmosphérique par accrétion de neige collante en soufflerie climatique. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422704

**HAL Id: hal-03422704**

**<https://hal.science/hal-03422704v1>**

Submitted on 9 Nov 2021

**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.

# Évaluation des phénomènes de givrage atmosphérique par accréation de neige collante en soufflerie climatique

A. VIGANO<sup>a</sup>, Ph. DELPECH<sup>a</sup>, S. AGUINAGA<sup>a</sup>, D. GUFFOND<sup>b</sup>, J. BORÉE<sup>c</sup>

a. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 11 rue Henri Picherit, 44323 NANTES

b. Office National d'Études et de Recherches Aéronautiques (ONERA), 29 avenue de la Division Leclerc, 92322 CHATILLON

c. Institut Pprime - CNRS - ENSMA - Université de Poitiers, Téléport 2 - 1, avenue Clément Ader, 86961 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL

## Résumé :

*L'évaluation des phénomènes de givrage atmosphérique des structures par accréation de neige collante s'appuie sur une approche expérimentale dans la soufflerie climatique du CSTB. L'étude s'attache à identifier l'influence des paramètres physiques qui pilotent les mécanismes d'accréation, en particulier la température ambiante, la vitesse du vent et le ratio liquide/solide des particules givrantes. L'étude paramétrique intègre les caractéristiques de l'écoulement autour des structures (géométrie, nombre de Reynolds) ainsi que les caractéristiques de l'écoulement diphasique (nombre de Stokes).*

## Abstract :

*A study of ice accretion on different structures has been conducted in the climatic wind tunnel located at Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) in Nantes. This study has focused on different parameters that affect the accretion of snow with particular attention to the wind speed, temperature during the test and the ratio between water and air of snow particles. The study also includes the fluid characteristics around the structures: shape and dimension of the accretions, Reynolds and Stokes numbers and the particle fly time.*

**Mots clefs :** givrage, accréation, neige collante, soufflerie climatique, écoulement diphasique

## 1 Introduction

Les phénomènes de givrage atmosphérique par accréation de neige collante (cette neige contient de l'eau liquide et est observée pour des températures proches de la température de fusion de l'eau) peuvent occasionner des dommages très divers aux structures. Les processus d'endommagement font, le plus souvent, intervenir soit les surcharges directes induites par les accréations de glace ou de neige [1], soit l'augmentation de la prise au vent due à la forme de ces accréations [2] ou encore les effets dynamiques dus au brusque déchargement au cours des périodes de dégivrage. Afin de modéliser les phénomènes d'accréation de neige collante, une étude expérimentale paramétrique a été entreprise dans une soufflerie climatique en parallèle aux développements de calculs numériques d'écoulements diphasiques. L'objectif des tests expérimentaux est de préciser quantitativement les paramètres qui gouvernent le processus d'accréation de la neige sur les structures. In fine, la recherche s'attachera à définir une fonction de "collage" des particules givrantes qui intègre la répartition des phases solide/liquide au sein même des particules. L'objectif est également de constituer une base de données expérimentale pour la comparaison et la modélisation des phénomènes d'accréation à une échelle locale.

## 2 Mise en œuvre expérimentale en soufflerie climatique

### 2.1 La soufflerie climatique

Les études ont été conduites dans la soufflerie climatique Jules Verne du CSTB à Nantes. Cette installation permet de reproduire des ambiances thermiques variées (de  $-25^{\circ}\text{C}$  à  $+50^{\circ}\text{C}$ ). La chambre d'essai est longue d'environ 21m, avec une largeur de 9m et une hauteur de 7m. Le ventilateur de la soufflerie permet

d'atteindre la vitesse de 40m/s dans la veine d'essai. À partir de mesures préliminaires, on peut faire l'hypothèse que l'écoulement d'air, dans la zone d'essai située à l'aval de la chambre d'essai à 17.5m de la buse de soufflage, est caractérisé, par une échelle intégrale de turbulence de l'ordre de 0,10m et une intensité de turbulence d'environ 5%.

La neige en soufflerie est produite par un canon à neige placé au sol (figure 1 à droite), sur l'axe central de la veine d'essai à 7.30m de la buse de soufflage, soit à environ 10m à l'amont de la structure de test. Le tir s'effectue à contre-courant du vent de façon à garantir le transport des particules de neige par les seules forces aérodynamiques ainsi que pour favoriser l'uniformité spatiale de la concentration en particules de neige (figure 1 à gauche).

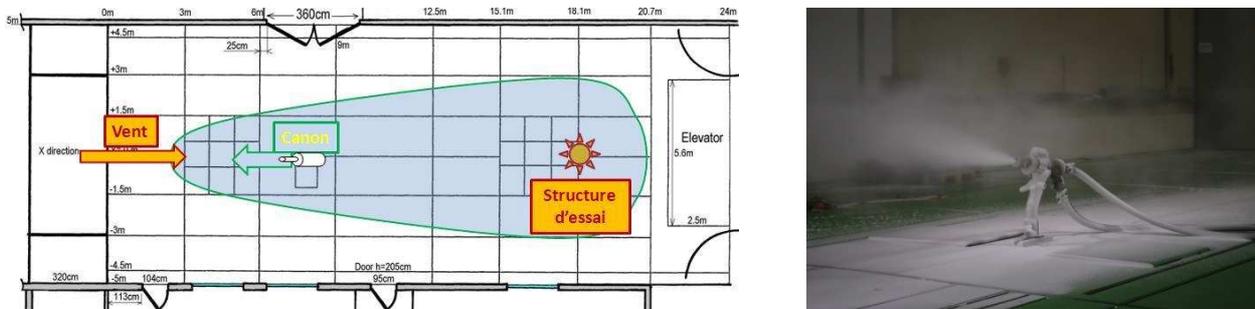


FIG. 1 – Schéma de la soufflerie climatique du CSTB à Nantes.

## 2.2 La neige produite en soufflerie climatique

La production de neige est assurée par des canons à neige haute pression (canons Y10 de la Société York): l'eau et l'air arrivent séparément sous pression (de 6 à 10bar) dans la chambre de mélange du canon, puis sont expulsés à travers un orifice (diamètre 13mm) à haute vitesse (80 à 100m/s) [3]. Ces canons à neige projettent dans la soufflerie de fines gouttelettes d'eau mélangées à l'air. En sortie de canon, les gouttelettes sont à l'état liquide à une température proche de 0°C. Au cours de leurs trajectoires dans l'écoulement de vent, la quantité de chaleur perdue par les particules conduit à leur solidification. En première approche, on peut faire l'hypothèse qu'un front de solidification progresse jusqu'au centre de la particule. Lorsque la particule est entièrement congelée, sa température évolue jusqu'à la température de l'air [3].

Au moment de l'impact sur une surface solide, l'une des caractéristiques les plus importantes des particules de neige qui permet de caractériser le mécanisme d'accrétion est la teneur en eau liquide ( $T_{el}$ ), c'est-à-dire le rapport de la masse d'eau liquide ( $m_l$ ) à la masse globale de la particule ( $m_p$ ):  $T_{el}=m_l/m_p$ .

Les mesures granulométriques (Malverne Spraytec, Aerometrics PDPA), réalisées lors de précédentes études, montrent une distribution de taille médiane de goutte d'environ 250µm.

On remarque également que les modifications apportées aux réglages du ratio air/eau d'alimentation des canons à neige, qui permettent de moduler la  $T_{el}$  dans le cadre d'applications industrielles, ont un impact sur la distribution des tailles de gouttes (figure 2) [3].

Afin de travailler dans des conditions de dynamique et de polydispersion données, nous avons donc choisi un réglage de l'alimentation des canons à neige et de vitesse d'écoulement unique pour ces essais. De plus, pour

les concentrations volumiques obtenues expérimentalement ( $\alpha_p = \frac{\dot{V}_{particules}}{\dot{V}_{air}} \approx 6 \cdot 10^{-6}$ ), on peut montrer que

les interactions particules/particules sont négligeables.

Le paramètre de contrôle de l'état de la neige est alors la température de la soufflerie, qui influe sur la dynamique de changement d'état des particules durant leur vol. Une difficulté vient de la teneur en eau liquide lors de l'impact qui varie avec la classe de taille. Cet aspect est actuellement étudié de façon détaillée. Lors de ces essais, en choisissant des cylindres de caractéristiques géométriques très différentes, nous insisterons sur le rôle des caractéristiques dynamiques, à polydispersion et répartition de  $T_{el}$  données, pour une gamme de températures d'essai.

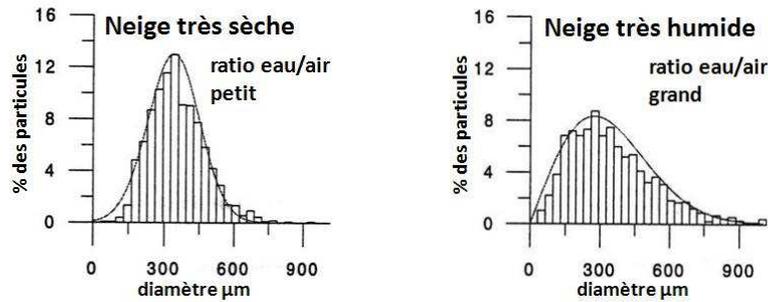


FIG. 2 - Distribution des tailles de gouttes réalisée par un granulomètre vélocimètre laser P.D.P.A. [3]

### 2.3 Le phénomène d'accrétion

La quantité et la position des accrétions de neige collante sont également déterminées par le bilan thermique et massique à la surface de la structure. Dans le cas général où toutes les particules qui impactent la surface ne se fixent pas sur la structure, une partie des particules rebondissent ou se détachent de la paroi. Les particules de neige qui restent en place augmentent le volume de l'accrétion. Si la particule est constituée d'un mélange solide/liquide, le processus d'accrétion peut être abordé par le bilan thermique à la paroi :  $Q_{solid} = Q_{evap} + Q_{sens} + Q_{conv} + Q_{ray}$  et le bilan de masse  $m_{imp} = m_{evap+sub} + m_{giv} + m_{ruiss} + m_{reb}$ .  $Q_{evap}$  est le refroidissement dû à l'évaporation, la chaleur sensible de la neige incidente ( $Q_{sens}$ ) est la quantité de chaleur nécessaire pour amener la température initiale de l'eau contenue dans les particules de neige à la température de congélation ( $0^{\circ}\text{C}$ ),  $Q_{conv}$  est le transfert de chaleur par convection avec l'air ambiant,  $Q_{ray}$  est le rayonnement avec l'environnement, enfin  $Q_{solid}$  est définie comme la quantité de chaleur nécessaire à la solidification de toute l'eau liquide incidente.

Les termes mentionnés précédemment dans le bilan thermique n'ont pas tous la même importance. Par ailleurs, d'autres termes ont été omis compte tenu des conditions usuelles d'apparition du givrage atmosphérique (énergie cinétique des particules de neige au moment de l'impact ainsi que les frottements visqueux à la surface de la structure). La masse givrée (bilan entre la masse totale qui impacte la structure et la masse perdue par évaporation, sublimation, rebond et par ruissèlement) est le résultat du processus de congélation explicité par le bilan thermique. En pratique, on observe que la masse de l'accrétion est dépendante de la fraction d'eau au sein des particules ( $T_{el}$ ). On peut supposer, qu'au moment où la particule impacte la structure, la fraction liquide lui permet d'adhérer à la surface. La particule contribue ainsi à la croissance de l'accrétion. Cela implique que la masse de l'accrétion finale augmente avec la grandeur  $T_{el}$  du spray incident.

### 2.4 Mise en œuvre de la structure de test

Les phénomènes d'accrétion ont été étudiés en utilisant des éléments cylindriques horizontaux placés dans l'axe central de la veine d'essai à 17m de la buse de soufflage (figure 3). Cette structure est réalisée en utilisant deux cylindres de PVC de différents diamètres (50mm et 315mm).

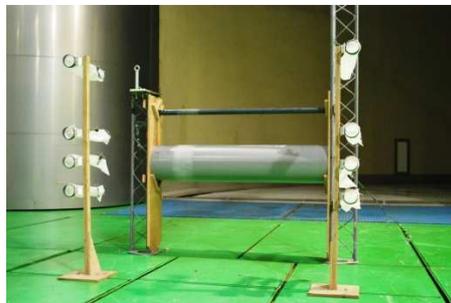


FIG. 3 - La structure utilisée en soufflerie

Le rapport d'aspect  $l/D$  est de 30 pour le plus petit cylindre et 4.76 pour le plus grand; où  $l$  est la longueur du cylindre, et  $D$  est le diamètre.

Les cylindres sont placés à deux hauteurs différentes: 1.30m pour le plus petit et 0.90m pour le plus grand. Pour mesurer le flux de particule en suspension dans l'écoulement qui impacte la structure, des filets

collecteurs ont été positionné à proximité du montage. Ces filets sont constitués d'un tissu poreux à fines mailles (60 $\mu$ m) qui récolte la neige et laisse passer l'air. Les filets sont maintenus en position ouverte face au vent par des couronnes de 8cm de diamètre. Les filets sont placés à quatre hauteurs (0.60m, 0.80m, 1.00m et 1.50m) de part et d'autre de la structure de test.

### 3 Paramètres d'études

Dans le but d'évaluer quantitativement l'accrétion en fonction des conditions amonts, on définit le paramètre  $\beta$  (1) qui représente le rapport de la masse d'accrétion sur les cylindres par unité de surface d'accrétion et par unité temps d'essai  $\psi_a$ , au flux de neige incident  $\varphi_n$  :

$$\beta = \frac{\psi_a}{\varphi_n} \quad (1)$$

La masse de neige qui forme une accrétion sur une structure particulière, est pondérée par la section efficace de la structure et la durée de l'essai:  $\psi_a = \frac{M_n}{(D \cdot l^*) \cdot t}$  où  $M_n$  est la masse de neige récoltée sur le cylindre de diamètre  $D$ , sur un tronçon central du cylindre de longueur  $l^*$  (700mm) pour un temps d'essai  $t$  de 600s pour les tests réalisés dans cette étude. En privilégiant l'étude d'un tronçon central du cylindre, on écarte le risque d'une perturbation des mesures par les effets de bord.

Le flux de neige amont  $\varphi_n = \frac{m_f}{A_f \cdot t}$ , mesuré par les filets collecteurs est évalué en supposant que les effets de contournement aérodynamiques sont négligeables. Où  $m_f$  est la masse de neige qui est récoltée dans le filet et  $A_f$  est l'aire frontale de l'ouverture du filet.

Les particules en mouvement dans l'écoulement turbulent sont soumises aux forces aérodynamiques et à leur poids. Nous évaluons ici le comportement de la classe de taille moyenne seulement. Les nombres sans dimensions pertinents sont ici les nombres de Stokes (rapport du temps de réponse des particules aux temps caractéristiques de l'écoulement) et le nombre de Froude (rapport de la traînée aérodynamique exercée sur la particule et du poids de celle-ci). Le nombre de Froude  $Fr$  est donné par  $Fr = \frac{\langle \|\mathbf{U}_p - \mathbf{U}_f\| \rangle}{\tau_p g}$  où  $\langle \|\mathbf{U}_p - \mathbf{U}_f\| \rangle$  est la moyenne de la norme de la vitesse relative entre les particules et le fluide,  $\tau_p$  est le temps caractéristique des particules et  $g$  l'accélération de la pesanteur. Pour un diamètre moyen des particules de  $d_p=250\mu$ m, la vitesse de chute est relativement importante. Supposant en première approche qu'elle est la contribution principale à la vitesse de glissement moyenne, on mène un calcul itératif tenant compte de la modification du temps de réponse des particules [4]:

$$\tau_p = \frac{\tau_{pST}}{1 + 0,15R_{ep}^{0,687}} \text{ avec } \tau_{pST} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_f} \text{ et } R_{ep} = \frac{\langle \|\mathbf{U}_p - \mathbf{U}_f\| \rangle d_p}{\nu_f} \quad (3)$$

Dans l'équation (3):  $d_p$  est le diamètre moyen des particules,  $\rho_f$  est la densité du fluide,  $\rho_p$  est la densité moyenne des particules et  $\nu_f$  la viscosité cinématique. Pour les essais réalisés à la température de -10°C, la valeur de  $\rho_f$  est 1.34 kg/m<sup>3</sup> et la viscosité cinématique est 1.25·10<sup>-5</sup> kg/ms. On obtient  $\tau_p \approx 90$ ms,  $R_{ep} \approx 18$  et  $\langle \|\mathbf{U}_p - \mathbf{U}_f\| \rangle \approx 0,9$  m/s.

Plusieurs nombre de Stokes, comparant la constante de temps de la particule aux échelles de temps de la turbulence ou de l'écoulement autour des cylindres peuvent alors être calculés. L'échelle de temps intégrale de la turbulence est évaluée avec  $\tau_t = l/u$ . Les temps caractéristiques aérodynamiques du contournement des cylindres sont évalués par :  $\tau_{cyl} = D/U_\infty$ . Les valeurs des nombres de Stokes calculées pour une vitesse d'écoulement de 10m/s sont:

$S_{k\_turb} = \frac{\tau_p}{\tau_t} = 0,45$	$S_{k\_cyl315} = \frac{\tau_p}{\tau_{cyl315}} = 2,8$	$S_{k\_cyl50} = \frac{\tau_p}{\tau_{cyl50}} = 18$
--	--	---

Tableau 1 - Les valeurs des nombres de Stokes

Les particules considérées répondent très partiellement à la turbulence de la soufflerie, d'autant plus qu'elles ont une vitesse de glissement importante due à leur chute. Le choix de deux cylindres de diamètres très différents permet de faire varier de façon significative le temps caractéristique aérodynamique du contournement des cylindres. Les particules de neige auront donc un comportement nettement plus inertiel avec le petit cylindre, ce qui est favorable à un impact sur la structure d'une large partie de la polydispersion. L'effet de polydispersion devra être mieux pris en compte dans l'avenir afin de bien distinguer:

- (i) l'effet de variation des propriétés mécaniques des particules (variations de distribution de tailles - voir figure 2; variation de la réponse à la turbulence et à l'écoulement autour des cylindres, ...)
- (ii) l'effet des propriétés thermodynamiques fortement liées à la  $T_{el}$  qui ont un rôle majeur sur l'accrétion. La simulation numérique sera utilisée afin d'évaluer le comportement dynamique et thermique des différentes classes de taille. Le logiciel libre « OpenFOAM » sera utilisé.

## 4 Résultats expérimentaux

Parmi les paramètres expérimentaux qui impactent l'état thermodynamique des particules de neige au cours de leur trajectoire, la température ambiante est sans doute celui qui est le plus simple à faire varier dans l'environnement climatique. Les conséquences d'une variation de la température ambiante sont également significatives vis-à-vis des caractéristiques des accrétions de neige [5]. De plus la vitesse de la soufflerie et le débit eau/air des canons étant constants, la distribution granulométrique des particules de glace est a priori la même pour tous les essais. En revanche, le changement de température modifie l'historique de la thermique des particules, et par conséquent leur  $T_{el}$  à l'impact.

Une série de tests expérimentaux de givrage des cylindres a été réalisée en ajustant la température ambiante aux valeurs  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-6^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-4^{\circ}\text{C}$  et  $-2^{\circ}\text{C}$ . La durée des tests était de 600s, et la vitesse du vent proche de 10m/s. La fidélité des résultats des mesures était assurée par la vérification de la stationnarité des conditions expérimentales, en particulier le flux de particule de neige, et par leur reproductibilité.

Les résultats montrent que pour les températures ambiantes de  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $-2^{\circ}\text{C}$ , l'état des particules de neige au moment de l'impact sur les cylindres est radicalement différent. A  $-10^{\circ}\text{C}$ , la quantité de neige qui adhère sur les cylindres est très faible et ne peut pas être mesurée. Pour cette température, la neige très sèche qui atteint les cylindres ne forme aucune accrétion. A l'opposé, pour la température de  $-2^{\circ}\text{C}$ , l'accrétion observée sur les cylindres est formée d'un mélange très humide de particules de glace et d'eau que l'on ne peut pas assimiler à de la neige.

Pour les conditions de température ambiante de  $-6^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$  et  $-4^{\circ}\text{C}$ , l'évolution du paramètre de captation normalisé  $\beta^* = \frac{\beta_t}{\beta_{-6^{\circ}}}$  en fonction de la température ambiante, montre une augmentation de la masse de

l'accrétion sur les deux cylindres avec la température (figure 4). Qualitativement, les températures ambiantes plus élevées induisent des accrétions plus humides et plus denses. Enfin on observe que l'accrétion est plus importante à la surface du petit cylindre. Ceci s'explique par la dynamique des particules par rapport au contournement des obstacles. Comme le montre le calcul des nombres de Stokes, pour des conditions expérimentales données, les particules auront un comportement très inertiel vis-à-vis du contournement du petit cylindre. Elles seront donc susceptibles de l'impacter. Au contraire, elles auront un comportement moins inertiel par rapport au grand cylindre et pourront plus facilement le contourner.

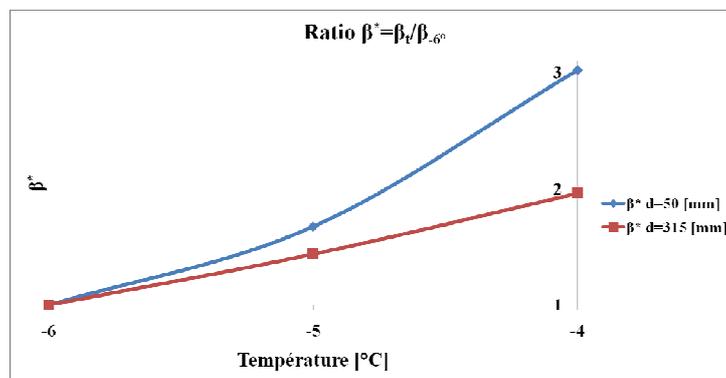


FIG. 4 – Évolution du coefficient de captation normalisé  $\beta^*$  en fonction de la température ambiante

Bien que l'augmentation du coefficient de captation avec la température soit due à une évolution des épaisseurs et volumes des accrétions sur les cylindres tests, les morphologies des accrétions observées étaient similaires d'un test à l'autre (figure 5). Il s'agit de formes d'accrétion typiques des vitesses de vent faibles. Dans le domaine aéronautique, les formes obtenues sont caractéristiques des accrétions de type "streamwise ice". Des vitesses de vent plus élevées conduiraient probablement à des formes différentes.



FIG. 5 – Les formes d'accrétion sur les cylindres tests (diamètre 50mm à gauche et 315mm à droite).

## 5 Conclusions

Une série de tests expérimentaux a été réalisée dans le cadre d'une étude dont le but est de préciser les paramètres qui déterminent l'accrétion de neige collante sur les structures. Un des paramètres qui influence ces accrétions de neige, est la teneur en eau liquide ( $T_{el}$ ) des particules au moment de l'impact avec la surface de la structure. Lors de ces essais, nous avons choisi des cylindres de caractéristiques géométriques très différentes, afin d'insister sur le rôle des caractéristiques dynamiques, à polydispersion et répartition de  $T_{el}$  données pour une gamme de températures d'essai.

Les premiers résultats ont montrés que l'augmentation de la température ambiante induit une augmentation du poids et une diminution de la consistance de l'accrétion (l'accrétion est plus humide): Il est probable que le changement de la température ambiante ait un impact direct sur la  $T_{el}$ . De plus, nous avons pu montrer que la dynamique des particules dans un écoulement contournant une structure, est un paramètre essentiel. Un nombre de Stokes aérodynamique a été proposé pour caractériser ce comportement. Il sera nécessaire d'affiner l'analyse pour prendre en compte la polydispersion.

Dans le cadre de cette étude, la mesure et le contrôle de la  $T_{el}$  des particules en suspension dans l'écoulement d'air de la soufflerie est un des aspects les plus difficiles à appréhender. Une des perspectives de travail est la mise en œuvre d'un moyen de mesure ponctuel de la  $T_{el}$  (sonde King, sonde Nevzorov).

Parallèlement à ce travail expérimental, des simulations numériques des écoulements diphasiques sont entreprises. Elles seront exploitées afin de caractériser la vitesse des particules dans l'écoulement d'air en fonction de la distribution granulométrique.

## 6 References

- [1] Thiis, T., Delpech, P., & Dufresne de Virel, M. (2004). *The use of deflectors to remove snowdrifts around buildings*.
- [2] Gjelstrup, H., & Georgakis, C. (2009). Aerodynamic Instability of a Cylinder with Thin Ice Accretion.
- [3] Boisson-Kouznietzoff, S. (1997). Qualification de la neige produite dans la soufflerie climatique Jules Verne: mise au point du dispositif expérimental et modélisation numérique du procédé. *Thèse de doctorat*.
- [4] Crowe, C., Sommerfeld, M., & Tsuji, Y. (1998). *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. CRC Press.
- [5] Mazin, I., Korolev, A., Heymsfield, A., Isaac, G., & Cober, S. (2001). Thermodynamics of Icing Cylinder for Measurements of Liquid Water Content in Supercooled Clouds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 543-558.