



N°d'ordre NNT : 2017LYSEI014

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**  
opérée au sein de  
**L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA)**

**École Doctorale** : ED 162  
**École doctorale ED MEGA** : Mécanique, Énergétique, Génie Civil,  
Acoustique  
**Spécialité** : Thermique Énergétique

Soutenue publiquement le 17/02/2017, par :

**Aurélia LÉONI**

---

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET MODÉLISATION DE  
LA FORMATION ET DU DÉVELOPPEMENT DU  
GIVRE SUR UNE PLAQUE REFROIDIE**

---

Devant le jury composé de :

Yves Bertin	Professeur des Universités	ENSMA	Président
Jean-Pierre Bedecarrats	Professeur des Universités	UPPA	Rapporteur
Laurence Fournaison	Directrice de Recherche	IRSTEA	Rapporteuse
Philippe Haberschill	Maître de conférence HDR	INSA-LYON	Directeur de thèse
Rémi Revellin	Professeur des Universités	INSA-LYON	Directeur de thèse
François Durier	Dir Développement et Partenariats	CETIAT	Invité
Michèle Mondot	Resp Systèmes Thermodynamiques	CETIAT	Invitée



## Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
<b>CHIMIE</b>	<b>CHIMIE DE LYON</b> <a href="http://www.edchimie-lyon.fr">http://www.edchimie-lyon.fr</a>  Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 <sup>e</sup> etage <a href="mailto:secretariat@edchimie-lyon.fr">secretariat@edchimie-lyon.fr</a> Insa : R. GOURDON	<b>M. Stéphane DANIELE</b> Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Equipe CDFA 2 avenue Albert Einstein 69626 Villeurbanne cedex <a href="mailto:directeur@edchimie-lyon.fr">directeur@edchimie-lyon.fr</a>
<b>E.E.A.</b>	<b>ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</b> <a href="http://edeea.ec-lyon.fr">http://edeea.ec-lyon.fr</a>  Sec : M.C. HAVGOUDOUKIAN <a href="mailto:Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr">Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr</a>	<b>M. Gérard SCORLETTI</b> Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60.97 Fax : 04 78 43 37 17 <a href="mailto:Gerard.scorletti@ec-lyon.fr">Gerard.scorletti@ec-lyon.fr</a>
<b>E2M2</b>	<b>EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION</b> <a href="http://e2m2.universite-lyon.fr">http://e2m2.universite-lyon.fr</a>  Sec : Sylvie ROBERJOT Bât Atrium - UCB Lyon 1 04.72.44.83.62 Insa : H. CHARLES <a href="mailto:secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr">secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr</a>	<b>M. Fabrice CORDEY</b> CNRS UMR 5276 Lab. de géologie de Lyon Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Géode 2 rue Raphaël Dubois 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 <a href="mailto:cordey@univ-lyon1.fr">cordey@univ-lyon1.fr</a>
<b>EDISS</b>	<b>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE</b> <a href="http://www.ediss-lyon.fr">http://www.ediss-lyon.fr</a>  Sec : Sylvie ROBERJOT Bât Atrium - UCB Lyon 1 04.72.44.83.62 Insa : M. LAGARDE <a href="mailto:secretariat.ediss@univ-lyon1.fr">secretariat.ediss@univ-lyon1.fr</a>	<b>Mme Emmanuelle CANET-SOULAS</b> INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 avenue Jean Capelle INSA de Lyon 696621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax :04 72 68 49 16 <a href="mailto:Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr">Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr</a>
<b>INFOMATHS</b>	<b>INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES</b> <a href="http://infomaths.univ-lyon1.fr">http://infomaths.univ-lyon1.fr</a>  Sec :Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 <sup>e</sup> etage <a href="mailto:infomaths@univ-lyon1.fr">infomaths@univ-lyon1.fr</a>	<b>Mme Sylvie CALABRETTO</b> LIRIS – INSA de Lyon Bat Blaise Pascal 7 avenue Jean Capelle 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax 04 72 43 16 87 <a href="mailto:Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr">Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr</a>
<b>Matériaux</b>	<b>MATERIAUX DE LYON</b> <a href="http://ed34.universite-lyon.fr">http://ed34.universite-lyon.fr</a>  Sec : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Direction <a href="mailto:Ed.materiaux@insa-lyon.fr">Ed.materiaux@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Jean-Yves BUFFIERE</b> INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 71.70 Fax 04 72 43 85 28 <a href="mailto:jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr">jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr</a>
<b>MEGA</b>	<b>MECANIQUE,ENERGETIQUE,GENIE CIVIL,ACOUSTIQUE</b> <a href="http://mega.universite-lyon.fr">http://mega.universite-lyon.fr</a>  Sec : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Direction <a href="mailto:mega@insa-lyon.fr">mega@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Philippe BOISSE</b> INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72 .43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 <a href="mailto:Philippe.boisse@insa-lyon.fr">Philippe.boisse@insa-lyon.fr</a>
<b>ScSo</b>	<b>ScSo*</b> <a href="http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/">http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/</a>  Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04 78 69 72 76 <a href="mailto:viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr">viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr</a>	<b>M. Christian MONTES</b> Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 <a href="mailto:Christian.montes@univ-lyon2.fr">Christian.montes@univ-lyon2.fr</a>

\*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie



# Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL UMR5008) et le Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT), sous la direction de Philippe Haberschill (CETHIL), Rémi Revellin (CETHIL), François Durier (CETIAT) et Michèle Mondot (CETIAT). Cette thèse a été financée par une bourse CIFRE, supportée par l'ANRT que je souhaiterais vivement remercier.

Mes premiers remerciements s'adressent à Jocelyn Bonjour et Bernard Brandon respectivement directeur du laboratoire CETHIL et directeur général du CETIAT pour m'avoir permis d'effectuer ma thèse au sein des deux entités. Je remercie ensuite Rémi Revellin pour ses conseils avisés et pour la combativité qu'il m'a insufflée, qui m'ont permis de mener ce projet à terme. Merci ensuite à Philippe Haberschill pour sa constante bonne humeur, son partage de connaissances et son accompagnement dans mon parcours professionnel. Je remercie également François Durier pour la qualité de son suivi et pour la bienveillance dont il a fait preuve à mon égard. J'adresse enfin mes remerciements à Michèle Mondot pour son implication, sa gentillesse et sa rigueur qui m'ont permis de progresser dans bien des domaines. L'encadrement mis en place m'a permis d'acquérir autonomie et confiance en soi.

Je souhaite ensuite remercier Jean-Pierre Bedecarrats de l'UPPA, Yves Bertin de l'ENSMA ainsi que Laurence Fournaison de l'IRSTEA pour avoir accepté d'être membre de mon jury.

Mes remerciements sont ensuite adressés à tout le personnel technique qui a grandement participé à la réussite de ce projet. Je pense notamment à Éric, Bernard, Bertrand, Antoine, Loïc, Joel, Nicolas (désolée pour ce que je vous ai fait faire), Serge et Anthony (et leurs découvertes musicales!) et Christophe. Je les remercie également pour les deux superbes cadeaux de thèse qui trônent dans mon salon!

Je tiens aussi à remercier l'équipe du secrétariat, et plus particulièrement Christine, Rémy, Silas, Marilyne et Florence, qui constitue le socle sur lequel repose la bonne organisation de ce laboratoire.

Un grand merci à Soukaina qui a pu partager avec moi durant 6 mois les peines et les joies de travailler sur le banc expérimental. Encadrer Soukaina fut un plaisir et très formateur.

Mes remerciements s'adressent ensuite à mes collègues du CETIAT et du CETHIL. Merci à Hervé pour ses calculs CFD et à Pascal pour la grille perforée. Merci à François pour ces supers discussions durant mes deux mois passés au CETIAT et à Laure pour sa gentillesse. Merci à Pierre pour les informations qu'il m'a fournies et pour ses encouragements. Et un grand merci à Eveline qui s'est occupée de moi comme une chef.

Je souhaite aussi remercier un nombre important de collègues au sein du CETHIL, sans qui les journées auraient été beaucoup moins agréables. Je remercie d'abord Stéphane pour sa gentillesse et son expertise scientifique qui m'ont été d'une grande aide. Je remercie Antoine pour ses nombreuses compétences qui m'ont permis de ne pas me laisser abattre face à des problèmes techniques. Je remercie chaleureusement mes co-bureaux, passés et actuels : Auline (qui m'a intégrée au sein du laboratoire), Léon (merci pour les corrections des textes en anglais), Nicolas (merci pour l'aide scientifique et les blagues pourries) et Thomas (pour ces discussions riches et culturelles).

Je tiens particulièrement à remercier Damien et Rémi pour l'aide physique qu'ils m'ont

apporté sur le banc expérimental, mais aussi pour leur présence dans les moments difficiles.

Je souhaite enfin remercier tous les autres collègues doctorants et post-doctorants, partenaires de coinche et de pauses café. Je pense notamment à Sandra, Éloïse, Martin, Quentin (et ses questions), Thibaut, Adrien, Kévin ( $\times 2$ ), Damien, Nicolas, Virginia, Philémon, Loïc ( $\times 2$ ), Hazem, Samuel, Étienne, Florine, Olivier, Yiqin, Luyi, Christophe, Wassim, Sébastien, Pierrick, Ali, Romain, Lucie et bien d'autres encore.

Je remercie également toutes les personnes avec qui j'ai échangé qui ont contribué à rendre cette expérience riche et intéressante.

Je finirai mes remerciements en m'adressant à mes amis avec une pensée particulière pour Anaïs qui est venue me soutenir le jour de ma soutenance et me supporte depuis presque 10 ans! Je remercie bien entendu ma famille. Merci Papa et Maman (pour m'avoir fait réciter mes leçons quand j'étais petite). Merci Romain d'avoir pris le relais quand les connaissances de papa et maman n'étaient plus suffisantes. Et un énorme merci à mon petit Florian qui m'a encouragée et soutenue dans mes décisions malgré les changements qu'elles ont pu engendrer. Merci de m'avoir réconfortée dans les moments difficiles. Tout simplement merci d'être là.

# Abstract

In the energy consumption and environmental impact reduction goal, heat pumps emerged as an alternative to fossil fuel systems for space heating and hot water production in residential and tertiary sectors.

Manufacturers still try to improve energy performance of heat pumps. However, a non-controlled phenomenon is limiting progress : frosting. Indeed, in some outdoor air temperature and relative humidity conditions, frost can form on the heat pump evaporator surface, leading to performance reduction. On the French market, almost 98 % of the heat pumps are using outdoor air as heat source and are thus affected. Despite more and more sophisticated defrosting strategies, the frosting/defrosting cyclic operation strongly reduces heat pump performance.

For optimizing defrosting strategies, there is a need understanding frost appearance and growth mechanisms. This PhD work thus proposes to study frost formation and development on a cold plane plate. An in-depth bibliography study helped establishing databases gathering experimental points on frost thickness and frost density. Models and correlations of frost formation available in the literature have been reproduced and applied to the databases in order to evaluate their prediction capacity. The most performing models have been identified.

Meanwhile, an experimental bench allowing visualization of frost formation and development on a cold plane plate has been set up. The sensitivity analysis on air temperature, cold plate temperature, air velocity and relative humidity allowed an evaluation of these parameters impact on frost formation, and more particularly on three of its properties : thickness, density and thermal conductivity. Relative humidity and cold plate temperature have been identified as the leading parameters.

One of the main results of this work was to highlight the frost crystal structure role on properties (i.e. density and thermal conductivity). Experimental data points obtained with the test bench have been compared to the results provided by literature models. Predictive methods identified as satisfying in the bibliography study gave similar results (from a statistical point of view).

Perspectives for future work have also been proposed.



# Résumé

Dans un objectif de réduction des consommations énergétiques et des impacts environnementaux, la pompe à chaleur (PAC) s'est imposée comme une alternative aux systèmes à combustion fossile pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire dans les secteurs résidentiel et tertiaire.

Les industriels ne cessent de chercher à accroître la performance énergétique des pompes à chaleur. Toutefois, un phénomène encore mal maîtrisé limite les progrès : le givrage. En effet, dans certaines conditions de température et d'humidité de l'air extérieur, du givre peut se former sur la surface de l'évaporateur de la PAC, provoquant ainsi une chute de performance. En France, près de 98 % des PAC du marché utilisent l'air extérieur comme source de chaleur et sont donc exposés à ce phénomène. Malgré des logiques de dégivrage de plus en plus sophistiquées mises en œuvre par les industriels, le fonctionnement cyclique givrage /dégivrage réduit fortement les performances des PAC.

Pour optimiser les méthodes de dégivrage, il est nécessaire de comprendre en amont, les mécanismes d'apparition et de croissance du givre. Ce travail de thèse propose ainsi d'étudier la formation et le développement du givre sur une plaque plane refroidie.

Une étude approfondie de la bibliographie a permis d'établir des bases de données regroupant des points expérimentaux de l'épaisseur et de la masse volumique du givre. Des modèles et corrélations de formation du givre disponibles dans la littérature ont été reproduits et appliqués à ces bases de données afin d'évaluer la capacité de prédiction de chacun de ces modèles. Les plus performants ont ainsi pu être identifiés.

En parallèle, un banc d'essais a été conçu pour observer la formation et la croissance du givre sur une plaque plane. L'étude de sensibilité menée sur la température de l'air, la température de la plaque froide, la vitesse de l'air et l'humidité relative a permis d'évaluer l'impact de ces paramètres sur la formation du givre, et plus particulièrement sur trois de ses propriétés : l'épaisseur, la masse volumique et la conductivité thermique. L'humidité relative et la température de la plaque froide ont été identifiées comme les paramètres prépondérants.

Un des résultats importants de ce travail a été de mettre en évidence le rôle de la structure du givre sur ses propriétés (masse volumique et conductivité). Les points expérimentaux obtenus sur le banc d'essais ont été comparés aux résultats issus des modèles de la littérature. Les méthodes de prédiction identifiées comme satisfaisantes dans la partie bibliographique de cette thèse ont fourni des résultats similaires d'un point de vue statistique.

Des perspectives de travail ont également été proposées.



# Nomenclature

## Symboles

$A$	paramètre d'une équation	
$a$	coefficient (Negrelli and Hermes [64])	
$a_1$	coefficient (Hermes [23])	
$b$	coefficient (Negrelli and Hermes [64])	
$bi$	paramètre binaire	
$c_p$	capacité thermique massique	$J.K^{-1}.kg^{-1}$
$D$	diamètre	m
$d_0$	coefficient	
$d_1$	coefficient	
$e$	épaisseur	m
$f$	fonction	
$F_t$	paramètre d'une équation	
$H$	enthalpie	J
$h$	enthalpie massique	$J.kg^{-1}$
$h_{air}$	coefficient de transfert de chaleur	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_m$	coefficient de transfert de masse	$kg_{AS}.m^{-2}.s^{-1}$
HR	humidité relative	%
$k_e$	intervalle de confiance	
$L$	longueur	m
$l$	longueur	m
$M$	masse molaire	$g.mol^{-1}$
$\dot{m}$	débit massique	$kg.s^{-1}$
$m$	masse	kg
$n$	paramètre d'une équation	
$nb$	nombre	
$P$	périmètre	m
$P$	pression	Pa
$p$	pression partielle de vapeur dans l'air	Pa
$p'$	pression partielle de vapeur saturante dans l'air	Pa
$p_{00}, p_{10}, p_{20}, p_{11}, p_{02}$	coefficients	
$\dot{Q}$	puissance	W
$q$	densité de puissance	$W.m^{-2}$
$r$	rayon	m
$S$	surface	$m^2$
$T$	température	K
$t$	temps	s
$\dot{V}$	débit volumique	$m^3.s^{-1}$
$V$	volume	$m^3$
$v$	vitesse	$m.s^{-1}$
$X$	grandeur exemple	
$x$	abscisse $x$	m
$x$	grandeur exemple	
$x_v$	fraction molaire	
$Y$	grandeur exemple	
$y$	grandeur exemple	

## Lettres grecques

$\alpha$	diffusivité thermique	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$\Delta$	différence	
$\Delta$	erreur	
$\varepsilon$	porosité	
$\lambda$	conductivité thermique	$\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$\mu$	viscosité dynamique	$\text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
$\xi$	paramètre d'une équation	
$\rho$	masse volumique	$\text{kg}.\text{m}^{-3}$
$\sigma$	écart-type	
$\tau$	temps adimensionné	
$\omega$	humidité absolue	$\text{kg}_{\text{vap}}.\text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$

## Nombres adimensionnels

Fo	nombre de Fourier
Ja	nombre de Jakob
Le	nombre de Lewis
Nu	nombre de Nusselt
Pr	nombre de Prandtl
Re	nombre de Reynolds
Sc	nombre de Schmidt
Sh	nombre de Sherwood

## Lettres souscrites et exposants

0	conditions de référence
0°C	à 0°C
1h	hauteur n°1
1l	largeur n°1
2h	hauteur n°2
2l	largeur n°2
A	incertitude de type A
air (AIR)	air
anémomètre	anémomètre
AS	air sec
atm	atmosphérique
batterie	batterie
c	critique
centre	centre
chaleur	chaleur

Cheikh	Cheikh
consommée	consommée
conv	convectif
dégivrage	dégivrage
e	entrée
eau	eau
$e_{\text{givre}}$	épaisseur du givre
évaporateur	évaporateur
excroissance	excroissance
f	surface du givre
fus	fusion
g	glace
gaine	gaine
GELEE	gelée
géométrique	géométrique
givre	givre
givre <sub>Hayashi</sub>	givre à partir des travaux de Hayashi
givre <sub>Hermes</sub>	givre à partir des travaux de Hermes
givre <sub>Hosoda</sub>	givre à partir des travaux de Hosoda
givre <sub>Kandula</sub>	givre à partir des travaux de Kandula
givre <sub>Yang</sub>	givre à partir des travaux de Yang
h	hauteur
i	élément
l	largeur
l	longueur
laboratoire	laboratoire
Lee	Lee
m	masse
m	diffusion moléculaire
mire	mire
nue	nue
p	paroi
parallèle	parallèle
PC	plaque carbone
PC, inf	surface inférieure de la plaque carbone
PC, sup	surface supérieure de la plaque carbone
pix, échelle	nombre de pixels dans l'échelle
plaque (PLAQUE)	plaque
pt	point triple
ref	référence
rosée (ROSEE)	rosée
s	sortie
s	solidification
sat	saturation
Schneider	Schneider
série	série
sub	sublimation
SURF	interface entre l'air et le givre
AIR/GIVRE	

t	instant t
t	diffusion thermique
TC	entreprise <i>TC SA</i>
thermocouple	thermocouple
tuyau	tuyau
utile	utile
v	vapeur
Vaisala	Vaisala

## Abbréviations

AS	air sec
BLT	bolt-campled Langevin
CETIAT	Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques
CFD	computational fluid dynamics
COP	coefficient de performance
DSC	differential scanning calorimetry (calorimétrie à balayage différentiel)
EG	eau glycolée
EMA	erreur moyenne absolue
EMR	erreur moyenne relative
FPI	fin per inch (ailettes par pouce)
HR	humidité relative
IR	infrarouge
PAC	pompe à chaleur
PC	plaque carbone
PID	proportionnelle intégrale dérivée
PIE	pourcentage inclus dans l'intervalle d'erreur
PMMA	polyméthacrylate de méthyle
PVC	poly-chlorure de vinyle
RT	réglementation thermique
SR	sous-refroidissement
USB	universal serial bus
vol	volumique





# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Contexte de l'étude . . . . .	1
1.2	Principe de fonctionnement de la pompe à chaleur et formulation du problème . . . . .	1
1.3	Objectifs de l'étude . . . . .	4
1.4	Plan de l'étude . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Étude bibliographique</b>	<b>7</b>
2.1	Givrage à l'échelle des pompes à chaleur et des chambres froides . . . . .	8
2.1.1	Impact du givre sur les performances globales de la machine . . . . .	8
2.1.2	Le dégivrage et ses conséquences . . . . .	8
2.2	Formation du givre à l'échelle microscopique . . . . .	11
2.2.1	Géométries étudiées dans la littérature . . . . .	12
2.2.2	Techniques de mesures expérimentales . . . . .	17
2.2.3	Bases de données . . . . .	22
2.3	Synthèse . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Modélisation du phénomène de givrage</b>	<b>27</b>
3.1	Méthodes de prédiction de l'épaisseur et de la masse volumique du givre . . . . .	28
3.1.1	Modèles numériques . . . . .	28
3.1.2	Modèles physiques et corrélations . . . . .	29
3.1.3	Modèles et corrélations choisies . . . . .	31
3.2	Étude comparative des bases de données et méthodes prédictives . . . . .	36
3.2.1	Plaques planes horizontales . . . . .	37
3.2.2	Plaques planes verticales . . . . .	47
3.2.3	Plaques parallèles . . . . .	53
3.3	Revue bibliographique des méthodes de prédiction de la conductivité thermique du givre . . . . .	57
3.4	Synthèse et conclusions . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Description et qualification du banc d'essais</b>	<b>67</b>
4.1	Présentation du banc . . . . .	68
4.1.1	Chambre froide . . . . .	68
4.1.2	Générateur de vapeur . . . . .	69
4.1.3	Veine d'air et ventilateur . . . . .	69
4.1.4	Bain thermostaté . . . . .	70
4.2	Section de test . . . . .	71
4.2.1	Veine en PMMA . . . . .	71
4.2.2	Dispositif de givrage . . . . .	72
4.2.3	Balance . . . . .	75

4.2.4	Caméra infrarouge . . . . .	78
4.2.5	Appareil photo . . . . .	79
4.3	Description du protocole expérimental . . . . .	80
4.4	Grandeurs mesurées et incertitudes associées . . . . .	81
4.4.1	Température . . . . .	82
4.4.2	Humidité relative . . . . .	83
4.4.3	Débit volumique de l'air . . . . .	83
4.4.4	Débit volumique de l'eau glycolée . . . . .	84
4.4.5	Masse du givre . . . . .	84
4.4.6	Épaisseur du givre . . . . .	84
4.5	Grandeurs calculées et incertitudes associées . . . . .	85
4.5.1	Flux de chaleur par conduction transféré dans la plaque en carbone	86
4.5.2	Flux de chaleur sur l'eau glycolée . . . . .	87
4.5.3	Flux et coefficients d'échange . . . . .	87
4.5.4	Nombre de Reynolds . . . . .	90
4.5.5	Nombre de Nusselt . . . . .	90
4.5.6	Masse volumique du givre . . . . .	91
4.5.7	Conductivité thermique effective du givre . . . . .	91
4.5.8	Vitesse de givrage . . . . .	91
4.5.9	Vitesse massique de givrage . . . . .	92
4.6	Qualification du banc d'essais . . . . .	92
4.6.1	Vitesse de l'air . . . . .	92
4.6.2	Température de l'air . . . . .	93
4.6.3	Humidité de l'air . . . . .	95
4.6.4	Bilans thermiques et thermodynamiques . . . . .	95
4.6.5	Température de surface du givre . . . . .	97
4.6.6	Épaisseur du givre . . . . .	97
4.7	Vérification de la reproductibilité des mesures . . . . .	99
4.7.1	Reproductibilité de la mesure d'épaisseur du givre . . . . .	99
4.7.2	Reproductibilité de la mesure de conductivité thermique effective du givre . . . . .	99
4.7.3	Reproductibilité de la mesure de masse volumique du givre . . .	100
4.8	Synthèse . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Présentation et analyse des résultats expérimentaux</b>	<b>103</b>
5.1	Résultats obtenus sur un jeu de conditions . . . . .	105
5.1.1	Étude globale : représentativité des mesures au centre . . . . .	105
5.1.2	Étude locale . . . . .	108
5.2	Vérification de l'hypothèse de Lewis . . . . .	112
5.3	Étude de sensibilité . . . . .	113
5.3.1	Impact de la température de l'air à humidité relative constante .	113
5.3.2	Impact de la température de l'air à humidité absolue constante .	115
5.3.3	Impact de la température de la plaque froide . . . . .	118
5.3.4	Impact de la vitesse de l'air . . . . .	120
5.3.5	Impact de l'humidité relative . . . . .	122
5.4	Lien avec la masse volumique du givre . . . . .	124
5.5	Synthèse . . . . .	126

<b>6</b>	<b>Confrontation des modèles et des résultats expérimentaux</b>	<b>129</b>
6.1	Prédiction de l'épaisseur du givre . . . . .	129
6.1.1	Comparaison des points expérimentaux avec les différents modèles et corrélations . . . . .	129
6.1.2	Impact de la température de la plaque froide et de l'humidité relative sur la prédiction de l'épaisseur du givre . . . . .	131
6.2	Prédiction de la masse volumique du givre . . . . .	133
6.3	Prédiction de la conductivité thermique effective du givre . . . . .	136
6.3.1	Comparaison de la base de données expérimentales aux différentes corrélations . . . . .	136
6.3.2	Impact de l'humidité relative sur la prédiction de la conductivité thermique effective du givre . . . . .	139
6.3.3	Investigations supplémentaires sur la corrélation de Negrelli and Hermes [64] . . . . .	140
6.4	Utilisation des modèles de prédiction de la formation du givre . . . . .	142
6.5	Synthèse . . . . .	145
<b>7</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>149</b>
7.1	Conclusions . . . . .	149
7.2	Perspectives . . . . .	151
7.2.1	Formation du givre . . . . .	151
7.2.2	Banc expérimental . . . . .	152
7.2.3	Modélisation . . . . .	153
<b>A</b>	<b>Résumé des corrélations pour la prédiction de la conductivité thermique du givre proposé par Iraborry et al. [29]</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Procédure de réalisation d'un test expérimental</b>	<b>V</b>
<b>C</b>	<b>Conductivité thermique de la plaque de KC57</b>	<b>VII</b>
<b>D</b>	<b>Programme Labview de traitement des images pour le calcul de l'épaisseur du givre</b>	<b>XVII</b>
<b>E</b>	<b>Caractéristiques du fluide frigopporteur utilisé dans le bain thermostaté : Kryo30</b>	<b>XIX</b>
<b>F</b>	<b>Correction de l'épaisseur du givre en configuration inclinée</b>	<b>XXIII</b>



# Liste des figures

1.1	Fonctionnement d'une PAC sur l'air extérieur : (1) Représentation schématique (2) Cycle thermodynamique . . . . .	2
1.2	Portion de la surface ailetée d'un échangeur de type tubes-ailettes . . . . .	3
1.3	Changements d'état de l'eau . . . . .	3
2.1	Illustrations d'un évaporateur microcanaux en phase de givrage à 0 minutes (a) 3 minutes (b) et 7 minutes (c) issues des travaux de Xu et al. [90] . . . . .	12
2.2	Illustration d'un évaporateur tubes-ailettes en phase de givrage . . . . .	13
2.3	Lien entre températures et types de cristaux (Fukuta [18]) . . . . .	15
2.4	Cartographie des cristaux obtenus dans différentes conditions de température et d'humidité issue des travaux de Kobayashi [40] (figure modifiée par Negrelli and Hermes [64]) . . . . .	15
2.5	Influence de la température de paroi et de l'humidité absolue sur la forme des cristaux de givre. I : gouttelettes d'eau sous refroidie, II : cristaux irréguliers, III : cristaux en forme de flocons, IV : cristaux en forme d'aiguilles et de bâtons, V : cristaux en forme de plumes (Wu et al. [88])	16
3.1	Modèle physique du développement du givre sur une plaque plane . . . . .	33
3.2	Impact des paramètres environnementaux sur l'épaisseur du givre formé sur une plaque plane . . . . .	38
3.3	Impact des paramètres environnementaux sur la masse volumique du givre formé sur une plaque plane . . . . .	39
3.4	Méthodes prédictives appliquées à la base de données de l'épaisseur du givre formé sur une plaque plane (désignation des points dans le tableau 2.5) . . . . .	40
3.5	Comparaison qualitative pour l'épaisseur du givre formé sur une plaque plane : cas de la vitesse . . . . .	42
3.6	Comparaison qualitative pour l'épaisseur du givre formé sur une plaque plane : cas de l'humidité relative . . . . .	43
3.7	Méthodes prédictives appliquées à la base de données de la masse volumique du givre formé sur une plaque plane (désignation des points dans le tableau 2.6) . . . . .	43
3.8	Corrélation développée dans cette étude appliquée à la base de données de la masse volumique de givre formé sur une plaque plane . . . . .	44
3.9	Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur une plaque plane : cas de la température de surface froide . . . . .	45
3.10	Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur une plaque plane : cas de la vitesse d'air . . . . .	46

3.11	Impact des paramètres environnementaux sur l'épaisseur du givre formé sur une plaque verticale . . . . .	48
3.12	Impact des paramètres environnementaux sur la masse volumique du givre formé sur une plaque verticale . . . . .	49
3.13	Méthodes prédictives appliquées à la base de données de l'épaisseur du givre formé sur une plaque verticale (désignation des points dans le tableau 2.7) . . . . .	50
3.14	Comparaison qualitative pour l'épaisseur du givre formé sur une plaque verticale . . . . .	50
3.15	Corrélation développée dans cette étude appliquée à la base de données de la masse volumique du givre formé sur une plaque verticale (désignation des points dans le tableau 2.8) . . . . .	51
3.16	Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur une plaque verticale : cas de l'humidité relative . . . . .	51
3.17	Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur une plaque verticale : cas de la température de surface froide . . . . .	52
3.18	Développement du givre sur deux plaques parallèles . . . . .	53
3.19	Impact des paramètres environnementaux sur l'épaisseur du givre formé sur deux plaques parallèles . . . . .	54
3.20	Impact de la vitesse de l'air sur la masse volumique du givre formé sur deux plaques parallèles . . . . .	54
3.21	Méthodes prédictives appliquées à la base de données de l'épaisseur du givre formé sur deux plaques parallèles (désignation des points dans le tableau 2.9) . . . . .	55
3.22	Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur deux plaques parallèles : cas de la température de surface froide . . . . .	55
3.23	Corrélation développée dans cette étude appliquée à la base de données de la masse volumique du givre formé sur deux plaques parallèles (désignation des points dans le tableau 2.10) . . . . .	56
3.24	Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur deux plaques parallèles : cas de la vitesse de l'air . . . . .	56
3.25	Représentation schématique des résistances thermiques série et parallèle (Negrelli et al. [65]) . . . . .	60
3.26	Comparaison entre les données expérimentales et les résultats fournis par les corrélations de calcul de la conductivité du givre pour les trois types de cristaux envisagés par Negrelli and Hermes [64] . . . . .	61
3.27	Mécanismes de formation du givre . . . . .	65
4.1	Description du dispositif expérimental. (a) : chambre froide, (b) : ventilateurs, (c) : générateur de vapeur, (d) : section d'essais . . . . .	68
4.2	Simulation de l'écoulement d'air au sein de la veine . . . . .	69
4.3	Simulation de la répartition de l'air dans deux demi-sections de la veine . . . . .	70
4.4	Puissance de refroidissement du <i>Lauda WKL 2200</i> . . . . .	70
4.5	Portion de la veine en PMMA . . . . .	71
4.6	Diagramme de transmission de l'optique en germanium . . . . .	72
4.7	Schéma du dispositif de givrage utilisé dans la section de test . . . . .	72
4.8	Représentation 3D de l'assemblage en aluminium dans lequel circule l'eau glycolée . . . . .	73
4.9	Disposition des thermocouples sur la plaque en carbone . . . . .	74

4.10	Comportement d'une goutte d'eau sur deux surfaces : hydrophobe et hydrophile . . . . .	75
4.11	Schéma du circuit d'eau glycolée imaginé pour la mesure automatique de la masse volumique du givre . . . . .	77
4.12	Dispositif réalisé pour le circuit d'eau glycolée gravitaire . . . . .	77
4.13	Processus de mesure de masse de givre déposé sur la plaque refroidie . . . . .	78
4.14	Description de la mire utilisée pour la prise de photo . . . . .	79
4.15	Disposition des thermocouples sur la grille perforée . . . . .	82
4.16	Procédure de traitement des photos pour le calcul de l'épaisseur du givre . . . . .	85
4.17	Illustration du phénomène de givrage sur le montage expérimental . . . . .	85
4.18	Répartition de la vitesse d'air en amont de la section de tests . . . . .	93
4.19	Répartition de la vitesse d'air en aval de la section de tests . . . . .	93
4.20	Répartition de la température de l'air dans la veine . . . . .	94
4.21	Variations des températures fournies par les thermocouples placés sur la grille d'homogénéisation . . . . .	94
4.22	Répartition de l'humidité relative de l'air dans la veine . . . . .	95
4.23	Vérification de l'égalité des bilans thermiques et thermodynamiques . . . . .	96
4.24	Conservation de l'énergie pour différentes conditions de test . . . . .	97
4.25	Validation de la température de surface du givre . . . . .	98
4.26	Illustration de la méthode d'évaluation de l'épaisseur à l'aide de la mire . . . . .	98
4.27	Validation de la mesure d'épaisseur . . . . .	99
4.28	Tests de reproductibilité de l'épaisseur du givre . . . . .	100
4.29	Tests de reproductibilité de la conductivité thermique du givre . . . . .	100
5.1	Répartition des conditions de test de la littérature et du travail de thèse . . . . .	103
5.2	Échanges thermiques le long de la plaque froide . . . . .	106
5.3	Évolution temporelle de la conductivité thermique le long de la plaque froide . . . . .	106
5.4	Interpolation polynomiale de l'inverse de la conductivité thermique du givre . . . . .	107
5.5	Valeur moyenne intégrale de la conductivité effective du givre . . . . .	108
5.6	Évolution des propriétés du givre en fonction du temps . . . . .	109
5.7	Évolution des densités de flux total, de transfert de chaleur et de masse au cours du temps . . . . .	109
5.8	Évolution temporelle des paramètres moteurs de la formation du givre . . . . .	110
5.9	Évolution temporelle de la vitesse de givrage . . . . .	111
5.10	Évolution temporelle de la résistance thermique surfacique de la couche de givre . . . . .	111
5.11	Points de mesure de masse utilisés pour vérifier $Le = 1$ . . . . .	112
5.12	Impact de la température d'air sur les propriétés du givre à humidité relative constante . . . . .	114
5.13	Écart des humidités absolues et des températures pour différentes températures d'air à humidité relative constante . . . . .	115
5.14	Morphologie des cristaux de givre : impact de la température d'air à humidité relative constante (cartographie issue des travaux de Wu et al. [88]) . . . . .	115
5.15	Impact de la température d'air sur les propriétés du givre à humidité absolue constante . . . . .	116

5.16	Évolution de la densité de flux total, de chaleur et de masse pour différentes températures d'air à humidité absolue constante . . . . .	116
5.17	Écarts des humidités absolues et températures du givre pour différentes températures d'air à humidité absolue constante . . . . .	117
5.18	Évolution de la résistance thermique de la couche de givre pour différentes températures d'air à humidité absolue constante . . . . .	117
5.19	Impact de la température de la plaque froide sur les propriétés du givre	118
5.20	Vitesses de givrage pour deux valeurs de températures de plaque froide	119
5.21	Écarts des humidités absolues et des températures pour des températures de plaque différentes . . . . .	119
5.22	Morphologie des cristaux de givre : impact de la température de la plaque froide (cartographie issue des travaux de Wu et al. [88]) . . . . .	120
5.23	Variation des propriétés du givre pour différentes vitesses d'air . . . . .	121
5.24	Évolution des flux de chaleur et de matières pour différentes vitesses d'air	121
5.25	Écarts des humidités absolues et des températures pour des vitesses d'air différentes . . . . .	122
5.26	Variation des propriétés du givre pour différentes humidités relatives . . . . .	122
5.27	Vitesses de givrage pour différentes humidités relatives . . . . .	123
5.28	Écarts des humidités absolues et de températures pour des humidités relatives différentes . . . . .	124
5.29	Masse de givre déposé sur la plaque pour différentes humidités relatives	125
5.30	Évolution de la masse volumique du givre pour différentes humidités relatives . . . . .	125
5.31	Points expérimentaux positionnées sur la cartographie de Wu et al. [88]	126
6.1	Prédictions de l'épaisseur du givre à partir de deux modèles : Hermes [23] et Hermes et al. [24] . . . . .	130
6.2	Prédictions de l'épaisseur du givre à partir de la corrélation de Schneider [76] : impact de la vitesse d'air et de la température de la plaque sur les prédictions . . . . .	131
6.3	Prédictions de l'épaisseur du givre pour différentes températures de plaque froide . . . . .	132
6.4	Prédictions de l'épaisseur du givre pour différentes humidités relatives . . . . .	133
6.5	Prédictions de la masse volumique du givre . . . . .	134
6.6	Prédictions de la masse volumique du givre : variation de l'humidité relative . . . . .	135
6.7	Prédictions de la conductivité thermique effective du givre (* corrélation modifiée) . . . . .	137
6.8	Prédictions de la conductivité du givre : superposition des trois meilleurs couples de corrélations (* corrélation modifiée) . . . . .	138
6.9	Prédictions de la conductivité thermique effective du givre pour différentes humidités relatives (* corrélation modifiée) . . . . .	139
6.10	Impact du temps sur les prédictions de la conductivité thermique effective du givre . . . . .	140
6.11	Répartition des points de la conductivité thermique effective du givre : températures et vitesses d'air . . . . .	141
6.12	Répartition des points de la conductivité thermique effective du givre : température de la plaque froide . . . . .	141

6.13 Répartition des points de la conductivité thermique effective du givre : humidité relative . . . . .	142
6.14 Temps nécessaire pour atteindre une épaisseur de givre donnée pour trois conditions d'essais normatives . . . . .	143
6.15 Temps de demie obstruction pour différents espacements d'ailettes . . .	144
6.16 Temps nécessaire au dégivrage de la machine pour différentes conditions environnementales et différents pas d'ailettes . . . . .	144
6.17 Cycles de givrage/dégivrage pour différentes conditions et différents es- pacements d'ailettes . . . . .	145
F.1 Description de la configuration avec l'appareil photo placé en hauteur .	XXIV
F.2 Diagramme du programme Labview pour la correction de la mesure d'épaisseur . . . . .	XXIV



# Liste des tableaux

2.1	Techniques de mesure de la température de surface du givre . . . . .	18
2.2	Techniques de mesure de l'épaisseur du givre . . . . .	19
2.3	Techniques de mesure de la masse volumique du givre . . . . .	21
2.4	Description des bases de données des points de la littérature . . . . .	22
2.5	Base de données épaisseur - plaque plane horizontale . . . . .	23
2.6	Base de données masse volumique - plaque plane horizontale . . . . .	23
2.7	Base de données épaisseur - plaque plane verticale . . . . .	24
2.8	Base de données masse volumique - plaque plane verticale . . . . .	24
2.9	Base de données épaisseur - plaques parallèles horizontales . . . . .	25
2.10	Base de données masse volumique - plaques parallèles horizontales . . . . .	25
3.1	Domaines de validité des méthodes prédictives de l'épaisseur du givre . . . . .	34
3.2	Domaines de validité des méthodes prédictives de la masse volumique du givre . . . . .	36
3.3	Prédictions de l'épaisseur du givre formé sur une plaque plane . . . . .	41
3.4	Résultats de l'étude quantitative pour la masse volumique du givre formé sur une plaque plane . . . . .	43
3.5	Corrélations de la littérature pour la prédiction de la conductivité thermique du givre . . . . .	59
4.1	Caractéristiques des feuilards . . . . .	75
4.2	Caractéristiques de la caméra infrarouge FLIR T420bx . . . . .	79
4.3	Valeurs des grandeurs nécessaires au calcul de la conductivité thermique de la plaque en carbone . . . . .	86
4.4	Conditions des tests de conservation de l'énergie . . . . .	96
4.5	Conditions des tests de reproductibilité de la mesure de masse volumique du givre . . . . .	101
4.6	Tests de reproductibilité de la masse de givre . . . . .	101
5.1	Conditions du test bidimensionnel . . . . .	105
5.2	Coefficients du polynôme de l'inverse de la conductivité . . . . .	107
5.3	Représentativité des résultats au centre de la plaque pour les deux tests supplémentaires . . . . .	108
5.4	Tableau de résultats pour le calcul du nombre de Lewis . . . . .	113
6.1	Jeux de conditions appliqués aux problématiques industrielles (les températures de l'évaporateur sont issues de tests réalisés au CETIAT sur une PAC) . . . . .	142



# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Contexte de l'étude

Dans un objectif de réduction des consommations énergétiques et des impacts environnementaux, la pompe à chaleur (PAC) s'est imposée comme une alternative aux systèmes à combustion fossile pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire dans les secteurs résidentiel, commercial et tertiaire. En 2013, le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie<sup>1</sup> indiquait que le secteur du bâtiment représentait encore 28 % de l'énergie finale consommée et 20 % des émissions de CO<sub>2</sub>, le plaçant parmi les secteurs les plus consommateurs en énergie.

Depuis 2008, le marché français de la pompe à chaleur n'a cessé de croître pour atteindre un peu plus de 150 000 unités en 2015, dont près de 98 % de pompes à chaleur et chauffe-eau thermodynamiques utilisant l'air extérieur comme source de chaleur.

Les industriels ne cessent de chercher à accroître la performance énergétique des pompes à chaleur. Le développement et l'intégration des compresseurs à vitesse variable et d'échangeurs microcanaux ont fortement contribué à cette amélioration.

La technologie de la pompe à chaleur est basée sur le même principe que celui de la réfrigération. Dans ce dernier cas, l'objectif est de refroidir l'air intérieur. Pour cela, les calories extraites sont rejetées vers le milieu extérieur. Dans le cas de la PAC, c'est l'air extérieur qui est refroidi pour réchauffer le milieu intérieur.

Dans les deux cas, le refroidissement à basse température peut engendrer la formation de givre qui va limiter la performance énergétique du système.

### 1.2 Principe de fonctionnement de la pompe à chaleur et formulation du problème

Le fonctionnement de la pompe à chaleur est présenté sur la figure 1.1. Il repose sur un cycle thermodynamique détaillé sur cette même figure.

La source froide (air extérieur) est refroidie dans un évaporateur, dans lequel elle cède ses calories à un fluide frigorigène, qui passe totalement en phase gazeuse. Ce fluide voit ensuite sa pression mais également sa température augmenter lors de son passage dans un compresseur. Le fluide, ainsi comprimé, cède à son tour sa chaleur à la source chaude (air intérieur ou eau). En cédant sa chaleur, le fluide frigorigène se condense puis se refroidit. En sortie du condenseur, pour clore le cycle thermodynamique, le

---

1. <http://www.developpement-durable.gouv.fr>

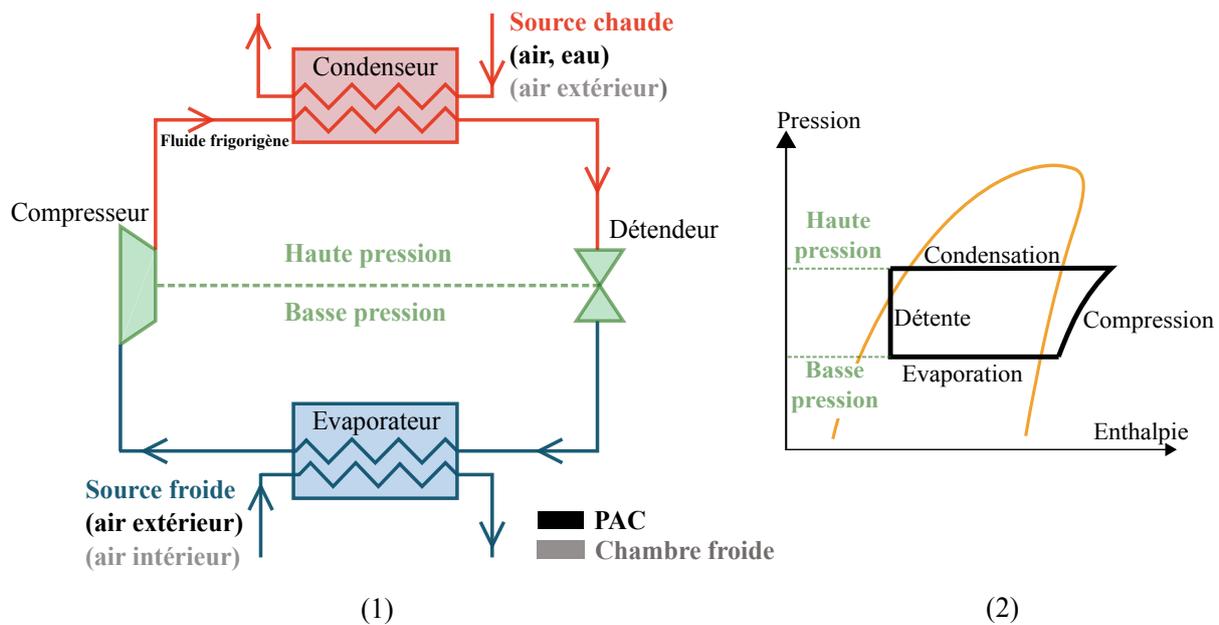


FIGURE 1.1 – Fonctionnement d'une PAC sur l'air extérieur : (1) Représentation schématique (2) Cycle thermodynamique

fluide est ramené à sa pression initiale en passant dans un organe de détente, formant ainsi un mélange liquide/vapeur à l'entrée de l'évaporateur.

L'efficacité énergétique des PAC est donnée par le coefficient de performance (COP) qui est le rapport de l'énergie utile récupérée au condenseur sur l'énergie consommée, principalement par le compresseur et les auxiliaires de circulation des sources froide et chaude (ventilateur et/ou pompe), comme indiqué par l'équation suivante :

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{utile}}}{\dot{Q}_{\text{consommée}}} \quad (1.1)$$

Le COP est toujours supérieur à l'unité puisque l'énergie prélevée à la source froide est une énergie renouvelable et gratuite.

Malgré les améliorations apportées aux pompes à chaleur et systèmes de réfrigération, selon la température et l'hygrométrie de l'air, extérieur ou intérieur respectivement, peut apparaître un phénomène de givrage qui pénalise fortement la performance énergétique.

Dans le cas des PAC utilisant l'air extérieur comme source froide, l'évaporateur est constitué de tubes ailetés. Le fluide frigorigène circule dans les tubes. Pour compenser le faible échange thermique côté air par rapport à celui côté fluide frigorigène, la surface d'échange des tubes est augmentée à l'aide d'ailettes. La figure 1.2 présente une portion de la surface d'échange côté air extérieur d'un échangeur de type tubes-ailettes. Le phénomène de givrage réduit alors l'échange thermique côté air. Ce phénomène apparaît sur les PAC lorsque la température de l'air extérieur est comprise entre 5 °C et -7 °C environ (en saison hivernale). En effet, à cette température, la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air (humidité absolue) est importante. Par exemple, pour une humidité relative de 70 %, un air à 5 °C contient 3,8 g<sub>vap</sub>.kg<sub>AS</sub><sup>-1</sup> alors qu'à -7 °C, l'air ne contient plus que 1,6 g<sub>vap</sub>.kg<sub>AS</sub><sup>-1</sup>. En dessous de -7 °C, l'air, peu chargé en vapeur d'eau risque donc moins de provoquer l'apparition du givre à la surface de l'évaporateur. Au contact de la surface de l'évaporateur, à température négative, la vapeur d'eau vient givrer sur

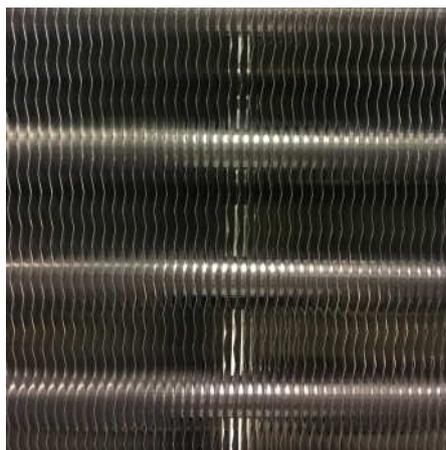


FIGURE 1.2 – Portion de la surface ailetée d'un échangeur de type tubes-ailettes

la surface. Dans les chambres froides, c'est l'air humide s'infiltrant à chaque ouverture de portes qui est responsable du givre. Dans ce cas, les températures d'air peuvent être beaucoup plus élevées que pour la PAC (air ambiant) tandis que la température des évaporateurs est bien plus faible (entre  $-5\text{ °C}$  et  $-20\text{ °C}$ ).

Deux mécanismes peuvent alors être à l'origine de la formation du givre : (i) la vapeur se condense au contact de la paroi froide puis les gouttelettes se solidifient ; (ii) la vapeur d'eau se transforme directement en glace (cf. figure 1.3).

La formation du givre a deux conséquences majeures qui contribuent à la chute des performances :

1. la couche de givre qui se développe agit comme un isolant qui réduit considérablement les échanges entre l'air et le fluide frigorigène dans l'évaporateur ;
2. cette sur-épaisseur provoque une augmentation des pertes de charge de l'évaporateur provoquant une chute du débit d'air, pouvant aller jusqu'à l'obstruction complète de l'évaporateur.

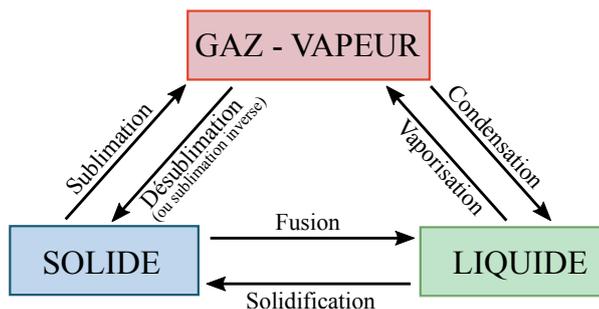


FIGURE 1.3 – Changements d'état de l'eau

Le développement d'une couche de givre trop épaisse conduirait à l'arrêt de la PAC, par manque d'échange thermique à l'évaporateur. Pour anticiper et éviter cette situation, les PAC sont équipées de logiques de dégivrage.

Lorsque la régulation de la PAC détecte des conditions de fonctionnement (température de surface, pression en sortie de l'évaporateur,...) pouvant conduire à une chute de puissance, le fonctionnement de la PAC est modifié pour dégivrer l'évaporateur (vanne d'inversion de cycle, injection de gaz chauds,...). La PAC fonctionne ainsi par cycles de givrage / dégivrage tant que la régulation détecte des conditions de givrage important de l'évaporateur.

Le dégivrage doit être une opération courte et efficace car l'énergie consommée par le compresseur lors de la phase de dégivrage est comptabilisée dans le calcul du coefficient de performance alors que l'énergie utile est réduite. La puissance et le COP sont alors fortement réduits. Une perte de puissance et de COP de l'ordre de 20 % est identifiée lorsque la température extérieure passe de 7 °C à 2 °C.

Le givrage reste donc un phénomène qui impacte très fortement les conditions de fonctionnement et les performances des pompes à chaleur, malgré la sophistication des logiques de dégivrage mises en œuvre par les industriels.

### 1.3 Objectifs de l'étude

Une optimisation des systèmes de dégivrage ou une mise en place d'un dispositif permettant de l'éviter nécessitent tous deux en amont une meilleure maîtrise des phénomènes de givrage. Optimiser les systèmes de dégivrage signifie identifier des critères de déclenchement du processus de dégivrage et adapter les technologies au type de givre formé. De nombreuses études ont été menées sur ces différents sujets mais de nombreux verrous restent encore à lever.

L'un des objectifs principaux est de comprendre quels sont les paramètres importants entrant en jeu lors de la formation du givre. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une étude approfondie de la bibliographie. Ce travail permet d'identifier les différents verrous et faiblesses des études déjà réalisées.

Un autre objectif est d'enrichir les bases de données expérimentales existantes afin de dégager des conclusions plus solides. Pour cela, un banc d'essai est réalisé. Ce banc propose un dispositif permettant de mesurer les propriétés du givre formé. L'acquisition de données automatisée permet une prise de mesure précise et synchronisée.

### 1.4 Plan de l'étude

Cette thèse est divisée en sept chapitres. Ils sont organisés de la manière suivante :

- le **chapitre 1** a pour rôle de resituer l'étude dans son contexte ainsi que d'en présenter les objectifs et les principales motivations ;
- le **chapitre 2** présente une étude approfondie de la littérature scientifique. La première partie est consacrée à la formation du givre sur les PAC et les chambres froides. L'impact du givre sur les performances globales des machines ainsi que les diverses techniques de dégivrage et leur conséquences sont présentées. Une seconde partie est centrée sur la formation du givre à une échelle microscopique. Il s'agit de traiter des géométries plus simples qui permettent de caractériser le givre. Les différentes techniques de mesures utilisées par les auteurs sont aussi discutées afin d'effectuer des choix judicieux pour le banc expérimental. Une dernière partie présente les différentes bases de données qui ont été créées à partir de points de mesures disponibles dans la littérature ;
- le **chapitre 3** présente une comparaison d'un nombre important d'études menées à partir des bases de données présentées dans le chapitre précédent. Ces points sont comparés entre eux ainsi qu'à différentes méthodes prédictives. Les conclusions de cette étude permettent de retranscrire des faiblesses dans les modèles mais aussi dans la manière de présenter les informations ;

- le **chapitre 4** présente le banc de tests et la section d'essais qui ont été réalisés. Une validation du banc de tests ainsi qu'une estimation des incertitudes des mesures y sont proposées ;
- le **chapitre 5** présente les résultats expérimentaux obtenus grâce au banc de tests. Une étude globale (en deux dimensions) ainsi qu'une étude locale (mono dimensionnelle) sont proposées. L'impact des différents paramètres environnementaux est évalué à l'aide d'une étude de sensibilité ;
- le **chapitre 6** propose les résultats de l'application des points expérimentaux aux différents modèles qui ont été traités et développés dans le chapitre 3. Une étude avec une approche plus industrielle vient compléter ces résultats ;
- le **chapitre 7** expose les conclusions qui ont été obtenues suite à ce travail de thèse et présente les perspectives de l'étude.



# Chapitre 2

## Étude bibliographique

Ce chapitre présente un état de l'art des études expérimentales qui traitent de la formation du givre.

La première partie expose l'impact du givre sur les performances globales des PAC et des chambres froides en s'appuyant sur des études disponibles dans la littérature. Une brève description des techniques actuelles de dégivrage ainsi que leurs conséquences sur les performances des machines complète cette première approche.

La seconde partie s'intéresse à la formation et au développement local du givre, à une échelle microscopique. Des études sur des géométries simplifiées y sont présentées afin de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu. Cette étude est complétée par la présentation des différentes techniques de mesures utilisées lors de manipulations expérimentales. Enfin, les différentes bases de données regroupant des points disponibles dans la littérature sont présentées.

## 2.1 Givrage à l'échelle des pompes à chaleur et des chambres froides

### 2.1.1 Impact du givre sur les performances globales de la machine

Afin de bien resituer l'étude dans son contexte, il est essentiel de comprendre pourquoi l'étude du givrage est primordiale. Quelques auteurs ont choisi de s'intéresser à la problématique du givrage à l'échelle des machines frigorifiques / PAC et à son impact sur leur fonctionnement.

En 1989, Votsis et al. [84] ont proposé une étude expérimentale de l'impact du givre sur une pompe à chaleur. Des tests en givrage ont été réalisés pour des températures d'air variant de 4 °C à -2 °C, plage critique de températures pour la pompe à chaleur. Les auteurs ont noté qu'à 4 °C, les pertes de charge au cours du temps n'augmentaient pas de manière significative, cependant, passé 3 °C, ces mêmes pertes de charge n'étaient plus négligeables. Par exemple, la perte de charge mesurée à 1,5 °C pour une durée de 150 minutes est cinq fois plus élevée qu'à 4 °C. Une baisse du COP a de ce fait été enregistrée.

En 1988, une étude présentée par Bigorre [4] (initialement issue des travaux de Tassou and Marquand [82]) a montré que le givrage fait chuter la valeur du COP d'une PAC air-eau. La chute des performances est d'autant plus brutale que le givrage est rapide. Ainsi pour une température d'air de 3 °C et une humidité de 80 %, le COP passe de 2,1 à 1,7 au bout de 100 minutes de test. Pour une humidité de 70 %, le COP varie de 2,1 à 1,8.

L'étude de Guo et al. [19] vient étayer ces conclusions. Les auteurs ont étudié expérimentalement l'impact du givre formé à 0 °C (humidité de 75 %) sur les performances d'une PAC. Ils ont pu observer une diminution importante du COP au fil du temps. Celui-ci passant de 2,65 à 2,25 au bout de 40 minutes de givrage.

En 1989, Heim [22] a mis en évidence à partir d'essais expérimentaux réalisés sur une chambre froide que les performances chutaient considérablement en cas de givrage. Après quatre heures de fonctionnement à une température d'air de 5 °C et une humidité relative de 70 %, la puissance frigorifique relevée n'était plus que de 4,9 kW alors qu'elle était de 8,2 kW en début de test (batterie sèche). La présence du givre a engendré une chute des performances de l'ordre de 40 %.

Ces premières études montrent les lourdes conséquences du givrage sur le fonctionnement des machines en présence d'air humide. Pour pallier ces problématiques de givrage, des techniques de dégivrage ont été mises en place.

### 2.1.2 Le dégivrage et ses conséquences

Cette partie présente différentes stratégies et méthodes permettant de :

1. retarder le givrage ;
2. détecter le moment optimal pour dégivrer la machine ;
3. dégivrer la machine.

#### Retardement du givrage

Une technique utilisée pour enrayer le phénomène de givrage consiste à le retarder au maximum pour à terme essayer de faire en sorte que le givre ne se forme pas.

En 2012, Joppolo et al. [34] ont réalisé une étude expérimentale afin d'observer l'influence de l'application d'un champ électrique sur les performances d'un évaporateur tubes-ailettes en cas de givrage. Les auteurs ont observé que la quantité de givre déposée était fonction de la tension imposée, et qu'elle atteignait un maximum pour une tension donnée. L'application du champ électrique a eu pour conséquence la réduction des pertes de pression dues à la formation du givre, retardant le fonctionnement instable du ventilateur constaté pour de fortes épaisseurs de givre et augmentant la puissance de refroidissement. Ainsi, l'énergie totale consommée, bien que le champ électrique ait nécessité un apport en énergie supplémentaire, a été réduite par rapport à un fonctionnement classique sans champ électrique.

D'autres auteurs comme Liu et al. [50] proposent de modifier le matériau des ailettes. Dans leur étude, ils comparent la formation du givre sur des ailettes classiques d'évaporateurs et sur une surface d'ailettes revêtue d'une peinture "anti-givre". Cette peinture a permis de retarder l'apparition du givre de 15 minutes et de réduire son épaisseur de plus de 40 %. Dans leur étude, Kim and Lee [38] montrent aussi l'influence du matériau sur l'apparition du givre. Un évaporateur revêtu d'une surface hydrophobe présente une prise en givre plus tardive. Les mêmes conclusions ont été observées par Cai et al. [9]. Ces études semblent montrer que remplacer les surfaces métalliques classiques des évaporateurs par une surface traitée hydrophobe permettrait de retarder l'apparition du givre (sans pour autant empêcher sa formation). Cependant, en cas de succession de cycles de givrage-dégivrage, comme c'est le cas dans la réalité, les performances de ces surfaces sont plus mitigées. Moallem et al. [59] montrent en effet dans leur étude que les surfaces hydrophobes présentent plus de difficultés à dégivrer.

Cette première partie montre que quelques études ont été menées afin de trouver une solution pour empêcher la formation du givre. Les meilleurs résultats permettent uniquement de le retarder. Ainsi, dégivrer la machine reste nécessaire. Cependant, le dégivrage a besoin d'être maîtrisé pour être optimisé et des critères de dégivrage doivent être définis.

## Déclenchement du dégivrage

Pour dégivrer sans réduire significativement les performances de la machine, celle-ci doit posséder un système de déclenchement efficace. Quelques études ont été réalisées afin de déterminer des paramètres pertinents de déclenchement du dégivrage.

En 1991, Haberschill et al. [20] ont proposé une étude expérimentale permettant de détecter le moment optimal pour déclencher le système de dégivrage. Cette étude est basée sur une comparaison de bilans d'énergie au cours d'un cycle de givrage-dégivrage entre une batterie prise en givre et une batterie sèche de machine frigorifique. Ils ont montré qu'il existait pour chaque cas, un moment optimal de dégivrage permettant de minimiser la consommation électrique. Cet optimum dépend essentiellement du degré d'hygrométrie et de la température de la chambre froide. Les auteurs attirent cependant l'attention sur le fait que cet optimum expérimental est impacté par les ouvertures de portes, le type d'évaporateur mais aussi le type de méthode de dégivrage, paramètres non pris en compte lors de l'étude.

Dans son étude Benabdelmoumene [3] présente différentes logiques de dégivrage des pompes à chaleur. La plus simple consiste à utiliser une horloge réglée sur une durée de givrage qui se déclenche à intervalles réguliers. Une seconde méthode plus complexe fait appel à une régulation électronique qui se base sur un ou plusieurs des paramètres suivants pour déclencher le dégivrage :

- l'écart entre la température de sortie de l'évaporateur et la température de surface de la batterie ;
- l'écart entre la température en sortie de l'air et la température de saturation à la pression d'évaporation (pincement) ;
- la perte de charge sur l'air ;
- la température de l'air en sortie d'évaporateur et la température extérieure.

La comparaison des PAC testées a montré que la machine présentant les meilleures performances est équipée d'une gestion électronique du cycle de dégivrage basée sur la température de surface de la batterie et la température en sortie de l'évaporateur.

La faible quantité d'études réalisées sur le sujet ne permet pas d'apporter de solides conclusions mais oriente cependant les recherches.

### Méthodes de dégivrage

La plupart des recherches sur le dégivrage ont été concentrées sur les différentes méthodes de dégivrage existantes.

L'une des méthodes les plus utilisées est celle par inversion de cycle. Le principe est d'utiliser l'énergie ayant pour but de chauffer le bâtiment (PAC) pour faire fondre le givre. Par exemple, l'air chaud d'une pièce peut être prélevé et dirigé vers l'évaporateur afin de faire fondre le givre. Dong et al. [15] ont réalisé un banc expérimental qui a permis d'évaluer les performances de leur machine à cycle inversible en dégivrage. L'efficacité maximale du dégivrage a été évaluée à 60 % (l'efficacité du dégivrage étant le rapport entre l'énergie nécessaire pour faire fondre et vaporiser le givre et l'énergie totale utilisée durant l'opération de dégivrage). Cette méthode semble relativement efficace. Cependant, elle possède un inconvénient majeur qui doit être pris en compte : l'air chaud prélevé fait chuter la température de la pièce, il aura besoin d'être réchauffé une fois la PAC repassée en mode chauffage. Ce fonctionnement implique inévitablement une perte d'efficacité.

Une seconde méthode consiste à prélever à la sortie du compresseur une certaine quantité de gaz chauds qui est ensuite réinjectée à l'entrée de l'évaporateur pour permettre la fonte du givre. Huang et al. [27] proposent une étude expérimentale qui compare la méthode par inversion de cycle et celle par injection de gaz chauds. La méthode des gaz chauds présente de meilleures performances car elle ne provoque pas de baisse de température de la pièce contrairement à la méthode par inversion de cycle.

Parmi d'autres techniques plus innovantes se trouve celle de Mader and Thybo [53] qui proposent une nouvelle méthode de dégivrage basée sur une inversion de cycle et complétée par l'utilisation d'une vanne de distribution qui permet de ne diffuser le fluide que dans certaines parties de l'évaporateur, ce qui permet de mieux cibler les zones à dégivrer. Les performances de la machine s'en trouvent donc améliorées.

Zhiyi et al. [98] proposent dans leurs travaux une méthode d'amélioration du dégivrage grâce à l'utilisation d'un compensateur de charge du fluide frigorigène au lieu d'un accumulateur. Cette méthode leur a permis d'atteindre des performances plus intéressantes.

Une autre méthode, peu répandue, est proposée par Wang et al. [85]. Les auteurs proposent d'éliminer le givre présent sur l'évaporateur à l'aide d'un dispositif de vibrations ultrasoniques. L'alimentation électrique délivre une puissance de 300 W et la fréquence de vibrations peut être réglée de 15 à 60 Hz. Un BLT (bolt-camped Langevin-type

transducer) est installé pour faire vibrer l'évaporateur à haute fréquence. Les tests ont principalement montré que la couche de base du givre ne pouvait pas être éliminée avec cette technique. Cependant, les cristaux supérieurs peuvent être fracturés et tomber par gravité dans la partie inférieure de l'évaporateur. Ce dispositif permet de diviser de moitié l'épaisseur du givre et de multiplier par six le temps de fonctionnement de la machine : sans ce dispositif l'épaisseur du givre est de 1,6 mm au bout de 30 minutes alors qu'avec le dispositif, elle est d'environ 0,8 mm après 90 minutes. L'auteur précise toutefois que ce dispositif n'est pas efficace lorsque les ailettes sont totalement obstruées.

D'autres auteurs ont choisi de s'intéresser aux problématiques de dégivrage à travers le drainage de l'eau sur la surface d'échange. En effet, le dégivrage serait plus efficace si la surface d'échange facilitait l'évacuation de l'eau. Pour rappel, il était question en première partie de traitements de surface hydrophobes qui permettaient de retarder l'apparition du givre. En parallèle, les chercheurs ont travaillé sur des surfaces hydrophiles qui permettent de drainer l'eau plus facilement. En 2013, Moallem et al. [59] ont réalisé des expériences basées sur des cycles successifs de givrage-dégivrage. Les auteurs expliquent qu'à terme, la surface hydrophile permet d'augmenter le temps de givrage grâce à sa capacité à drainer l'eau sur la surface. Ainsi, lors du cycle de givrage suivant, la surface est moins humide donc la quantité initiale d'eau pouvant givrer est réduite.

Ces différentes méthodes présentent des avantages et des inconvénients. Certaines ne sont encore qu'à l'état de recherches (vibrations, compensateur de charge, matériaux hydrophiles) alors que d'autres sont déjà bien implantées dans le secteur industriel (inversion de cycle, gaz chauds). Néanmoins, une certaine incompréhension du phénomène de formation du givre se dégage de ces différentes études. Les mécanismes de formation du givre ne sont pas encore suffisamment maîtrisés pour permettre le développement de systèmes efficaces de prévention ou d'élimination du givre.

## 2.2 Formation du givre à l'échelle microscopique

Le début du chapitre a fait état du fonctionnement, des performances et des stratégies de dégivrage des PAC et des chambres froides dans leur globalité. Étant donné que ces études, à une échelle macroscopique, n'ont pas permis d'apporter des éléments d'amélioration évidents, une étude à une échelle réduite est proposée. En effet, l'objectif est de s'affranchir de certains éléments de la machine en ne gardant que son élément principal, du point de vue du givre : l'évaporateur. Il n'est alors plus question d'évaluer les performances globales de la machine mais plutôt d'évaluer les paramètres qui entrent en compte dans la formation du givre. Pour cela, une étude approfondie des différentes géométries disponibles dans la littérature est proposée. Cette étude est complétée par une analyse des techniques de mesures expérimentales présentées dans la littérature afin d'orienter les choix pour le banc d'essais qui sera réalisé. Pour terminer, cette analyse de la bibliographie donne lieu à un travail plus concret de création de bases de données qui est présenté dans une troisième sous-partie.

## 2.2.1 Géométries étudiées dans la littérature

### Évaporateurs microcanaux

La problématique de formation du givre au sein des échangeurs microcanaux a fait l'objet de quelques recherches. L'impact de la géométrie de l'échangeur a été étudié en profondeur par un groupe de chercheurs [56–60]. Ils ont construit un dispositif expérimental qui leur a permis d'effectuer un grand nombre de tests. Ils ont constaté que plus la géométrie de l'évaporateur était fine (ailettes rapprochées), plus les performances hors givrage étaient importantes. Mais, dès apparition du givre, la machine devient beaucoup moins performante. La géométrie de l'évaporateur est un facteur qui tient un rôle important dans le développement de la couche de givre. Xu et al. [90] ont effectué une étude sur un échangeur similaire en réalisant plusieurs cycles de givrage-dégivrage successifs. La figure 2.1 présente une portion d'un évaporateur microcanaux pris en givre. Leurs expériences ont montré que cette géométrie avait tendance à retenir l'eau après dégivrage favorisant le regivrage, et menant à l'obstruction de plus en plus rapide de l'échangeur. En 2010, Shao et al. [78] ont réalisé une étude comparative d'un échangeur microcanaux et d'un échangeur tubes-ailettes conventionnel en condition de givrage. Les auteurs ont remarqué que le temps de givrage était plus important pour l'échangeur tubes-ailettes que pour l'échangeur microcanaux. Les auteurs expliquent en effet que le temps de givrage réduit pour l'échangeur microcanaux vient principalement de la mauvaise répartition du fluide frigorigène. Une étude similaire a été réalisée par Brignoli et al. [8]. Les auteurs comparent l'influence du givre sur un échangeur microcanaux et un échangeur à tubes-ailettes spirale. De nouveau, l'échangeur microcanaux se trouve davantage pénalisé par la présence du givre.

Les études menées sur les échangeurs microcanaux ont montré que cette géométrie ne présentait pas de réels avantages pour une machine devant fonctionner en givrage du fait de la proximité des ailettes et de la mauvaise distribution du fluide frigorigène. Au travers de ces études, aucun auteur ne fait état d'une étude paramétrique approfondie sur l'influence des conditions environnementales sur la formation locale du givre. Il semble nécessaire de simplifier la géométrie pour affiner les recherches.

### Évaporateurs tubes-ailettes

Les échangeurs tubes-ailettes ont été plus largement étudiés du fait de leur plus importante représentativité dans l'industrie. La figure 2.2 présente un évaporateur tubes-

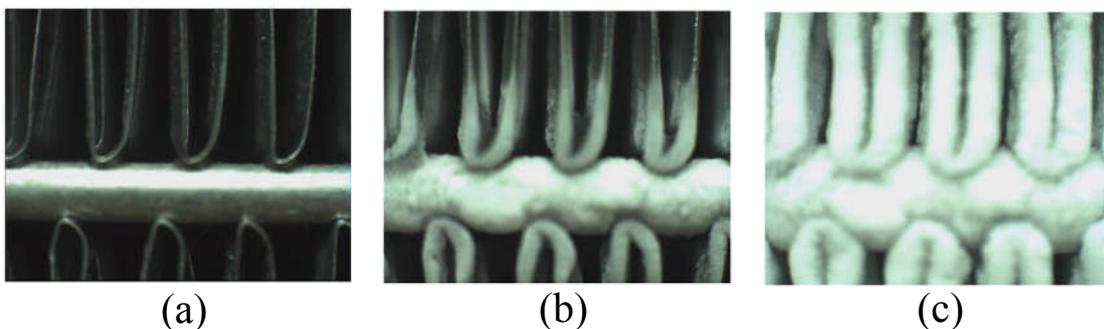


FIGURE 2.1 – Illustrations d'un évaporateur microcanaux en phase de givrage à 0 minutes (a) 3 minutes (b) et 7 minutes (c) issues des travaux de Xu et al. [90]

aillettes de pompe à chaleur en phase de givrage. Avec ce type de géométrie, il devient plus aisé d'évaluer l'influence des paramètres sur le givrage.

Les auteurs se sont principalement orientés vers deux types d'études :

- l'influence du pas d'aillettes sur la formation du givre ;
- l'impact des paramètres environnementaux sur la couche de givre.

Le premier aspect auquel se sont intéressés les auteurs concerne l'influence de la vitesse de l'air sur la formation du givre. Certains ont en effet constaté que la vitesse contribuait à une augmentation de la couche de givre [13, 99].

Diverses études sur l'influence du pas d'aillettes ont montré que ce paramètre ne devait pas être négligé. Dans leur étude, Da Silva et al. [13] ont montré que la densité d'aillettes avait une influence sur l'accumulation du givre. En effet, plus les ailettes sont proches plus la quantité de givre formé est importante. Shao et al. [78] sont aussi arrivés à la conclusion qu'une densité d'aillettes plus importante menait à un temps de fonctionnement plus faible. De manière plus théorique, Yang et al. [93] ont proposé en 2006 une optimisation de l'espacement des ailettes pour un échangeur tubes-aillettes afin de majorer les performances tout en garantissant un fonctionnement correct en cas de givrage. La géométrie optimale permet d'améliorer les transferts de 6 % et le temps de givrage de 13 %. L'étude de Kim and Lee [38] vient conforter l'idée qu'il existe un pas optimal permettant de concilier fonctionnement normal et en givrage. Les auteurs ont observé expérimentalement l'influence du pas d'aillettes sur les échanges en cas de givrage. Ils ont testé trois échangeurs avec trois pas différents de 14, 16 et 18 ailettes par pouce (Fins Per Inch : FPI). Ils ont noté que le pas présentant les meilleurs résultats est le pas moyen de 16 FPI. Cette géométrie présente des transferts de chaleur plus élevés ainsi qu'une accumulation moins importante de givre après plusieurs cycles de givrage-dégivrage.

L'étude des échangeurs tubes-aillettes permet d'approcher de plus près les phénomènes de formation du givre à une échelle un petit peu plus réduite que lorsque que la machine complète est considérée. L'influence d'un paramètre tel que la vitesse d'air a été étudié. Cependant, certains auteurs ont identifié des difficultés liées à la présence des tubes-aillettes. En effet, Kim and Lee [38] font remarquer que le givre ne se forme pas de manière uniforme à la surface de l'évaporateur : les premiers rangs présentent une couche plus épaisse que les rangs secondaires (observations faites aussi par Özkan and Özil [99]).

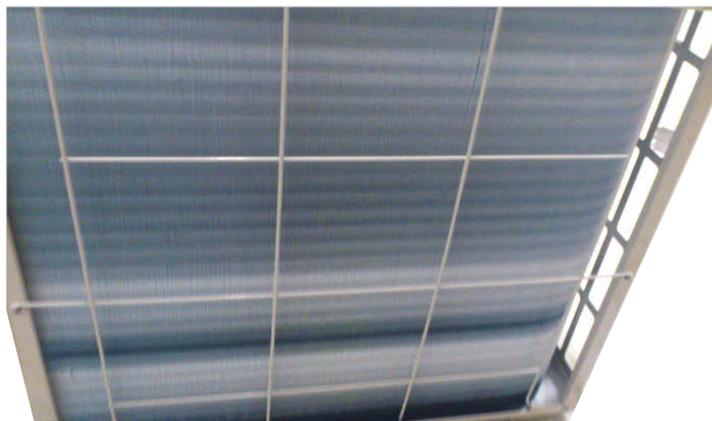


FIGURE 2.2 – Illustration d'un évaporateur tubes-aillettes en phase de givrage

Les évaporateurs tubes-ailettes ne semblent pas être une géométrie suffisamment simple pour permettre d'étudier avec précision la formation locale du givre, notamment à cause des irrégularités de formation du givre au niveau des différents rangs de tubes. Il est nécessaire de simplifier de nouveau la géométrie afin d'obtenir des résultats moins perturbés.

## Plaques planes

Les plaques planes représentent la géométrie la plus étudiée dans la littérature en terme de nombre de publications. Cette géométrie se divise en différentes sous géométries :

- les plaques planes horizontales qui représentent la majeure partie des études ;
- les plaques planes verticales étudiées pour quantifier l'impact de la gravité sur la couche de givre ;
- les plaques parallèles étudiées dans le but de simuler deux ailettes d'évaporateurs et donc quantifier l'influence de deux couches de givre superposées.

Le nombre d'études traitant des plaques planes horizontales est important. Ces études se divisent essentiellement en deux types de travaux :

1. les études paramétriques quantifiant l'influence de la température de l'air, son humidité relative, sa vitesse et la température de la surface froide sur le développement du givre ;
2. les études de la nucléation du givre qui analysent le type de givre formé et le classent dans différentes catégories.

Parmi les études paramétriques, celle de Hermes et al. [24] est particulièrement intéressante. En effet, les auteurs ont mis en place un banc expérimental afin d'évaluer l'influence des différents paramètres environnementaux sur la formation et le développement du givre. Ce montage a permis d'enrichir considérablement les bases de données. Les auteurs ont ainsi pu constater que les faibles températures de surface froide et les humidités relatives élevées favorisaient la croissance du givre. L'étude menée par Mao et al. [55] apporte des précisions quant à l'état de surface du givre en fonction des conditions environnementales. Un givre plus lisse apparaît avec des températures de surface assez élevées et une humidité relative faible, ce qui donne lieu à un givre plus fin et dense. L'étude paramétrique de Yoon et al. [96] complète celle de Hermes et al. [24] en apportant des précisions sur l'influence de la vitesse de l'air et de la température de l'air. Les vitesses et les températures d'air plus faibles favorisent la croissance du givre. Les auteurs enrichissent la littérature avec des points de mesures pour la masse et la masse volumique du givre.

Les études réalisées sur les plaques planes permettent de mieux identifier les paramètres clés de la formation du givre. Le paragraphe suivant fournit plus de précisions sur l'aspect microscopique du givre.

Une première étude de Fukuta [18] apporte quelques informations sur la morphologie des cristaux de glace formés à différentes températures d'air. Les conditions d'apparition des cristaux sont différentes du cas de la plaque plane refroidie : ils se forment dans l'air sans aucun contact avec une surface froide. La figure 2.3 présente les différents types de cristaux observés par les auteurs. La température semble avoir un impact important sur leur morphologie. Bien que les conditions d'apparition des cristaux diffèrent, il est

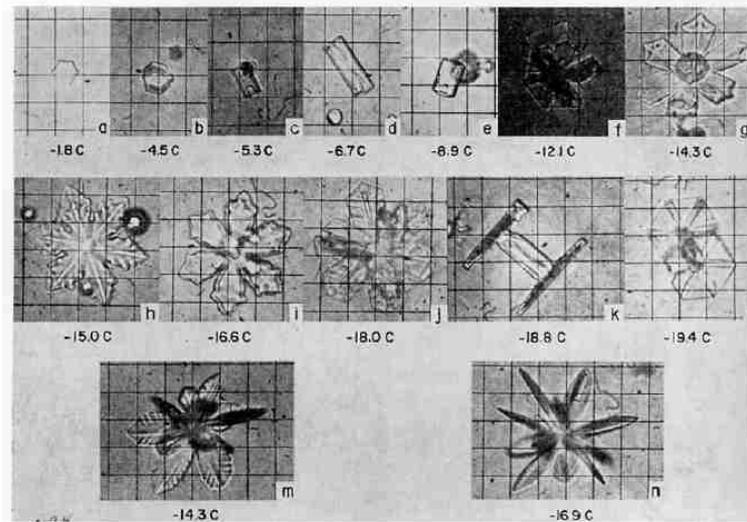


FIGURE 2.3 – Lien entre températures et types de cristaux (Fukuta [18])

évident de penser que la température devrait aussi avoir un impact sur les cristaux de givre formés sur une plaque plane refroidie.

En 1958, Kobayashi [40] a proposé une cartographie des différents types de cristaux de glace formés pour des conditions de température et des degrés de sursaturation différents. Comme pour Fukuta [18], les conditions d'apparition des cristaux ne sont pas identiques mais cette étude vient renforcer l'idée qu'il existe une relation entre la morphologie des cristaux, la température de la plaque froide et l'humidité de l'air. La figure 2.4 présente la cartographie issue des travaux de Kobayashi [40].

En 1977, Hayashi et al. [21] ont séparé le processus de formation du givre en trois étapes :

1. la période de croissance des cristaux ;
2. la période de croissance de la couche de givre ;
3. la période de croissance totale du givre.

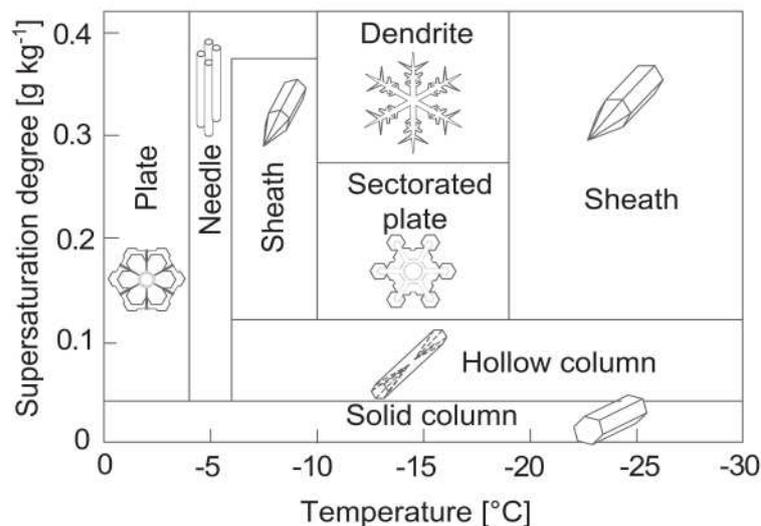


FIGURE 2.4 – Cartographie des cristaux obtenus dans différentes conditions de température et d'humidité issue des travaux de Kobayashi [40] (figure modifiée par Negrelli and Hermes [64])

Par la suite, Wu et al. [88] ont proposé une étude plus complète de la formation du givre en détaillant davantage les différents événements marquant la formation de la couche de givre :

1. formation et croissance des gouttelettes d'eau sur la surface froide ;
2. gel des gouttes condensées ;
3. formation et croissance des premiers cristaux sur les gouttelettes gelées ;
4. croissance des cristaux de givre accompagnée du colmatage de certains cristaux qui remplissent les interstices entre chaque cristaux ;
5. croissance de la couche de givre.

Après avoir décrit le phénomène de formation du givre, les auteurs proposent de classer les cristaux en quatre groupes en fonction de leur forme et de leur apparence. Selon les auteurs, l'aspect des cristaux serait particulièrement lié à l'humidité de l'air et à la température de la surface froide (cf. figure 2.5).

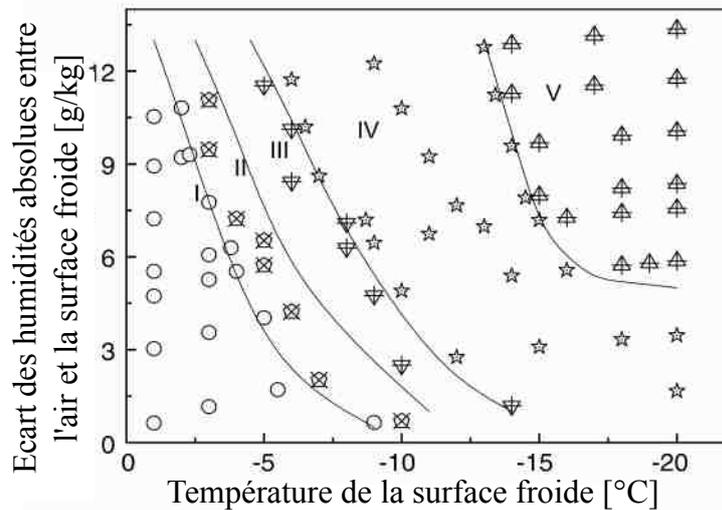


FIGURE 2.5 – Influence de la température de paroi et de l'humidité absolue sur la forme des cristaux de givre. I : gouttelettes d'eau sous refroidie, II : cristaux irréguliers, III : cristaux en forme de flocons, IV : cristaux en forme d'aiguilles et de bâtons, V : cristaux en forme de plumes (Wu et al. [88])

Cette étude est complétée par celle de Qu et al. [71]. Elle décrit la morphologie des cristaux au cours des trois périodes de formation du givre citées par Hayashi et al. [21]. Les auteurs font le lien entre les vitesses de croissance du givre de chacune des périodes et le type de cristaux formés. Cette théorie est reprise par Yaomin et al. [94] qui décrit avec précision la géométrie des cristaux au cours des trois périodes de formation et développement du givre et fait le lien avec la température de surface du givre.

Quelques études ont en parallèle été menées sur des plaques verticales [17, 31, 32, 47, 50, 51, 77, 91] pour examiner l'influence de la gravité sur la formation du givre. D'autres études ont été réalisées sur des plaques parallèles [63, 68] pour étudier l'impact de la présence de couches de givre superposées.

### Autres géométries

Il existe quelques études réalisées sur des géométries moins classiques. Schneider [76] et Barzanoni et al. [2] proposent des études expérimentales réalisées sur des cylindres.

Les résultats expérimentaux de Schneider [76] ont permis de proposer une corrélation empirique pour la prédiction de l'épaisseur de givre qui peut être étendue aux plaques planes. Il a aussi mis en évidence que la croissance du givre n'était pas impactée par le nombre de Reynolds et donc par la vitesse de l'air, ce qui n'est pas en accord avec les conclusions d'autres auteurs. En effet, Barzanoni et al. [2] ont construit un banc expérimental afin d'étudier l'influence des différents paramètres environnementaux sur la formation du givre. Contrairement à Schneider [76], ils ont observé que le nombre de Reynolds avait une influence sur la formation du givre, l'augmentation de la vitesse favorisant la croissance du givre.

Par la suite, Lee et al. [46] ont réalisé une étude sur un échangeur tubes-ailettes en spirale. Ils ont étudié l'influence du pas d'ailettes et des conditions environnementales. En raison de la surface d'échange importante, les auteurs ont observé une croissance du givre plus élevée que pour un échangeur classique. L'influence du pas d'ailettes a été observé : plus le pas est faible, plus le temps de givrage est court, dû au colmatage du givre entre deux ailettes. Cette étude a permis le développement d'une corrélation empirique pouvant prédire l'épaisseur du givre sur des échangeur tubes-ailettes en spirale.

Ces géométries particulières sont assez peu répandues. Cependant, certaines études comme celle de Schneider [76] peuvent s'avérer intéressantes pour la suite de cette thèse, l'auteur affirmant en effet que sa corrélation peut être étendue à des plaques planes. Il est donc pertinent de s'y intéresser.

## 2.2.2 Techniques de mesures expérimentales

Cette partie présente les différentes techniques de mesure utilisées dans la littérature, l'objectif étant d'analyser les moyens mis en œuvre afin d'effectuer les meilleurs choix pour le dispositif expérimental qui doit être construit. Trois types de mesures sont principalement analysées :

1. la mesure de la température du givre qui sera nécessaire lors du calcul des bilans thermiques, de la détermination de la résistance thermique induite par la couche de givre et de la conductivité thermique effective ;
2. la mesure de l'épaisseur de la couche de givre nécessaire à sa caractérisation ;
3. la mesure de la masse volumique du givre nécessaire pour déterminer les propriétés du givre et leurs variations en fonction des paramètres environnementaux.

### Mesure de la température de surface du givre

Ce paragraphe présente les techniques qui ont été utilisées dans la littérature pour mesurer la température de surface du givre au fur et à mesure de sa formation. La liste des auteurs associés à leur technique de mesure et les incertitudes (quand elles sont fournies) sont détaillées dans le tableau 2.1.

Une grande partie des auteurs a utilisé un pyromètre infrarouge pour effectuer la mesure de température de surface. Les incertitudes de chaque appareil semblent assez diverses. De plus, l'utilisation d'un pyromètre infrarouge présente une limite importante car il ne permet de mesurer la température qu'en un seul point (seuls Fossa and Tanda [17] utilisent deux pyromètres infrarouges et calculent la valeur moyenne). Ainsi, si la température du givre n'est pas identique sur toute sa surface, la valeur mesurée

TABLEAU 2.1 – Techniques de mesure de la température de surface du givre

Auteur	Technique de mesure	Incertitudes
Fossa and Tanda [17]	Pyromètre infrarouge	0,8 °C
Hermes et al. [24]	Caméra infrarouge	-
Lee et al. [44]	Pyromètre infrarouge	0,5 °C
Lee and Ro [47]	Pyromètre infrarouge	-
Lee et al. [45]	Pyromètre infrarouge	4,36 %
Qu et al. [71]	Caméra infrarouge	0,5 °C
Tokura et al. [83]	Pyromètre infrarouge	-
Yang and Lee [92]	Pyromètre infrarouge	0,1 °C
Yoon et al. [96]	Pyromètre infrarouge	-

peut ne pas être totalement représentative. C'est pourquoi l'utilisation de la caméra infrarouge [24, 71] semble être plus adaptée. Une caméra infrarouge permet d'obtenir une cartographie de la température de surface de la plaque. Le premier avantage est donc qu'elle permet de vérifier l'uniformité de la température de surface du givre et qu'elle fournit une mesure plus réaliste de la température moyenne. Du point de vue des incertitudes, la caméra infrarouge ne semble pas plus défavorable que certains pyromètres infrarouges.

### Mesure de l'épaisseur

La mesure de l'épaisseur constitue aussi un point essentiel de cette thèse. En effet, l'épaisseur est une donnée importante pour caractériser le givre ; de plus ; elle intervient dans la détermination de sa masse volumique. C'est pourquoi sa mesure doit être précise et adaptée aux besoins. Les techniques de mesure employées par les différents auteurs et leur incertitude sont exposées dans le tableau 2.2. Les techniques sont détaillées ci-dessous afin de comprendre leur fonctionnement.

- *Microtête enregistreuse* : l'auteur ne fournit pas suffisamment d'informations pour bien comprendre le principe de fonctionnement ;
- *Appareil photo numérique* : il permet de photographier le dépôt de givre à différents instants. Les photos sont traitées afin de déduire, à partir du nombre de pixels, l'épaisseur du givre ;
- *Système télescopique* : l'auteur ne fournit pas suffisamment d'informations pour bien comprendre le principe de fonctionnement ;
- *Micromètre* : c'est un appareil qui permet de mesurer les dimensions avec précision. Équipé d'un laser (source lumineuse) et d'un récepteur, il réalise des mesures sans contact. La source lumineuse crée un rideau de lumière dirigé vers le récepteur. Lorsqu'un objet passe entre ces deux éléments, le rideau de lumière est localement interrompu. Cet assombrissement ou interruption est détecté par l'unité de réception qui transformera la valeur obtenue en une dimension ;

TABLEAU 2.2 – Techniques de mesure de l'épaisseur du givre

<b>Auteur</b>	<b>Technique de mesure</b>	<b>Incertitudes</b>
Barzanoni et al. [2]	Microtête enregistreuse	0,01 mm
Cheng and Shiu [11]	Appareil photo numérique	0,03 mm
Fossa and Tanda [17]	Capteur de contact + capteur optique	1-2 mm
Janssen et al. [31]	Appareil photo numérique	2 %
Hermes et al. [24]	Appareil photo numérique	2 %
Huynh [28]	Appareil photo numérique	-
Kim et al. [37]	Micromètre digital	0,04 mm
Kwon et al. [41]	Microscope	-
Kwon et al. [42]	Système télescopique	-
Lee et al. [44]	Micromètre	0,1 mm
Lee and Ro [47]	Appareil photo numérique	1,2 %
Lee et al. [45]	Micromètre	5,57 %
Lee et al. [46]	Micromètre + Cathétomètre	3,3 %
Liu et al. [51]	Appareil photo numérique + microscope	-
Mao et al. [54]	Faisceau laser	3 %
Mao et al. [55]	Faisceau laser	2 à 8 %
Moallem et al. [57]	Appareil photo numérique	0,03 mm
Nascimento et al. [63]	Appareil stéréoscopique	0,05 mm
O'Neal and Tree [67]	Micromètre	-
Ostin and Andersson [68]	Micromètre	0,1 mm
Padhmanabhan et al. [69]	Appareil photo numérique	0,1 mm
Qu et al. [71]	Capteur de déplacement laser + Appareil photo numérique	0,01 mm
Tao et al. [80]	Microscope	-
Wu et al. [88]	Appareil photo numérique	-
Wu et al. [87]	Appareil photo numérique	-
Xia et al. [89]	Appareil photo numérique	-
Xu et al. [90]	Appareil photo numérique	0,02 mm
Yang and Lee [92]	Micromètre digital	5,28 %
Yaomin et al. [94]	Microscope	-
Yoon et al. [96]	Appareil photo numérique	1,2 %

- *Capteur de déplacement laser* : ce capteur permet de réaliser des mesures sans contact. La mesure du déplacement de la surface permet d'en déduire son épaisseur ;
- *Microscope* : l'auteur ne fournit pas suffisamment d'informations pour bien comprendre le principe de fonctionnement ;
- *Appareil stéréoscopique* : c'est un appareil photographique rassemblant deux chambres, donc deux objectifs, placés côte à côte de manière solidaire dans un même boîtier ; ils sont destinés à produire dans un même instant deux photographies jumelles mais non semblables en vue de la restitution du relief. Ces images sont ensuite post-traitées pour déduire l'épaisseur du givre ;
- *Cathétomètre* : c'est un appareil qui permet de mesurer la distance entre deux points. Il renvoie donc directement la valeur de l'épaisseur.

Les méthodes de mesure de l'épaisseur du givre sont variées et présentent des incertitudes assez éparées (même entre techniques de mesure identiques - Tableau 2.2). Les micromètres semblent être des instruments de mesure précis mais la méthode de l'appareil photo présente deux avantages majeurs. Elle permet de visualiser le givre sur toute la largeur de la plaque. Une étude de l'épaisseur du givre en deux dimensions peut être envisagée alors que le micromètre ne fournit que la mesure de l'épaisseur en un point. De plus, elle permet de visualiser le phénomène de givrage et d'étendre les observations à la structure/morphologie du givre. C'est cette méthode qui sera privilégiée par la suite.

## Mesure de la masse volumique

La mesure de la masse volumique constitue l'une des difficultés de l'étude des caractéristiques de givre. En effet, elle est complexe car elle ne peut être mesurée directement et nécessite la connaissance de deux grandeurs : la masse et le volume du givre. Le volume est déterminé à partir de la mesure de l'épaisseur. Travailler avec un appareil photo pour la mesure d'épaisseur permet de vérifier que la couche de givre est uniformément répartie le long de la plaque et donc de calculer plus facilement le volume occupé par le givre (en considérant l'épaisseur constante le long de la plaque). La plus grande difficulté réside dans la détermination de la masse. En effet, la plupart des études utilisent une balance digitale (Tableau 2.3) pour mesurer la masse de givre déposée en fin de test. Pour cela, les auteurs disposent un adhésif sur une partie de la plaque froide. Cette partie est extraite et pesée rapidement en fin de test. Cette méthode oblige les auteurs à répéter la même expérience plusieurs fois (à des temps finaux différents) afin d'obtenir une évolution de la masse volumique du givre en fonction du temps. De plus, l'adhésif, s'il n'est pas constitué de la même matière que le reste de la plaque risque de modifier la formation du givre et donc d'avoir un impact sur la masse mesurée.

Une technique moins habituelle a été proposée par Bong et al. [6]. Les auteurs proposent de comparer les mesures de masse volumique obtenues à l'aide de rayons beta et gamma. Leur étude a montré que la méthode avec les rayons gamma présentait une incertitude de 50 %, alors qu'elle était de 20 % avec les rayons beta.

Les incertitudes sur la mesure de la masse volumique sont plus importantes que pour l'épaisseur. C'est en effet logique puisque l'incertitude sur la mesure de la masse vient s'ajouter à celle de l'épaisseur et donc du volume (sauf pour les mesures par rayons beta et gamma). Dans cette thèse, différents moyens expérimentaux sont testés afin de tenter d'obtenir l'acquisition de la masse de givre au cours du temps.

TABLEAU 2.3 – Techniques de mesure de la masse volumique du givre

Auteur	Technique de mesure	Incertitudes
Barzanoni et al. [2]	Microtête enregistreuse + Balance fin test	$6 \text{ à } 8 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Moallem et al. [57]	Appareil photo numérique + Balance digitale	-
Fossa and Tanda [17]	Capteur de contact/capteur optique + Balance fin test	-
Hermes et al. [24]	Appareil photo numérique + Balance fin test	5 %
Huynh [28]	Appareil photo numérique + Balance pendant test	-
Kwon et al. [41]	Microscope + Balance électronique	-
Lee and Ro [47]	Appareil photo numérique + Balance fin test	5,1 %
Lee et al. [45]	Micromètre + Balance fin test	6,94 %
Mao et al. [54]	Faisceau laser + Balance fin test	4 %
Mao et al. [55]	Faisceau laser + Balance fin test	7 à 60 %
Nascimento et al. [63]	Appareil stéréoscopique + balance fin test	-
O’Neal and Tree [67]	Micromètre + balance fin test	-
Ostin and Andersson [68]	Micromètre + balance digitale fin test	-
Padhmanabhan et al. [69]	Appareil photo numérique + balance pendant test	-
Shin et al. [79]	Appareil photo numérique + Balance précision fin test	-
Yoon et al. [96]	Appareil photo numérique + Balance fin test	8,2 %

### 2.2.3 Bases de données

Cette partie présente les bases de données obtenues à partir des points de mesure de la littérature.

L'objectif est de rassembler un maximum de points, ce qui permettra de comparer les résultats obtenus par les différents auteurs. Pour comparer ce qui est comparable, les différentes bases de données sont séparées selon la géométrie et la caractéristique recherchée. Ainsi, six bases de données ont été créées. La description de la géométrie, du paramètre recherché et du nombre de points collectés sont indiqués dans le tableau 2.4. Toutes les valeurs collectées sont des valeurs moyennes.

TABLEAU 2.4 – Description des bases de données des points de la littérature

Géométrie	Paramètres	Nombre de points
Plaque plane horizontale	Épaisseur	382
Plaque plane horizontale	Masse volumique	149
Plaque plane verticale	Épaisseur	180
Plaque plane verticale	Masse volumique	122
Plaques parallèles horizontales	Épaisseur	24
Plaques parallèles horizontales	Masse volumique	25

Pour être utilisé, chacun de ces points est associé à un certain nombre de données d'entrée qui sont indispensables lors de l'implémentation dans les modèles. Ces données d'entrée sont les suivantes :

- la température de l'air ;
- la température de la surface froide ;
- l'humidité relative ;
- la vitesse de l'air ;
- la longueur de la plaque ;
- le temps.

Si l'une de ces données d'entrée n'est pas fournie par l'auteur, le point n'est pas retenu car il ne pourra pas être utilisé dans tous les modèles ; les comparaisons ne peuvent pas être effectuées de manière rigoureuse. C'est ce qui explique que le nombre de points des bases de données réalisées soit inférieur à ce qu'il est possible de trouver dans la littérature. Un grand nombre d'auteurs ne fournissent pas toutes les informations, ce qui exclut malheureusement leurs études.

Les bases de données sont détaillées dans les tableaux 2.5 à 2.10. Ces tableaux fournissent des informations sur les auteurs dont les points expérimentaux ont été collectés, les symboles qui leur sont associés sur les figures du chapitre suivant ainsi que les intervalles de variation de chacun des paramètres environnementaux.

TABLEAU 2.5 – Base de données épaisseur - plaque plane horizontale

Données expérimentales			Intervalle des paramètres			
Auteur	Symbole	Nombre de points	Température de l'air [°C]	Température de la surface froide [°C]	Humidité relative [%]	Vitesse de l'air [m · s <sup>-1</sup> ]
Yonko and Sepsy [95]	*	74	[ 21 ; 23 ]	[ -28 ; -8 ]	[ 57 ; 80 ]	[ 0,27 ; 2,96 ]
Jones and Parker [33]	♦	21	[ 22 ; 25 ]	[ -30 ; -8 ]	[ 38 ; 26 ]	[ 1,19 ; 2,96 ]
Lee et al. [44]	▽	40	25	-15	[ 50 ; 80 ]	[ 0,18 ; 5,00 ]
Lee et al. [45]	◀	21	[ 5 ; 15 ]	[ -20 ; -15 ]	[ 60 ; 70 ]	[ 1,0 ; 2,5 ]
Hermes et al. [24]	▲	125	[ 16 ; 22 ]	[ -16 ; -4 ]	[ 50 ; 80 ]	[ 0,7 ; 1,0 ]
Cai et al. [9]	+	6	15	-10	65	0,25
Wang et al. [86]	○	90	[ -8 ; 19 ]	[ -16 ; -8 ]	[ 42 ; 80 ]	[ 2,22 ; 5,00 ]
Kandula [36]	×	5	22,1	-9,1	72	1,77
Total		382	[ -8 ; 25 ]	[ -30 ; -4 ]	[ 38 ; 80 ]	[ 0,18 ; 5,00 ]

TABLEAU 2.6 – Base de données masse volumique - plaque plane horizontale

Données expérimentales			Intervalle des paramètres			
Auteur	Symbole	Nombre de points	Température de l'air [°C]	Température de la surface froide [°C]	Humidité relative [%]	Vitesse de l'air [m · s <sup>-1</sup> ]
Hayashi et al. [21]	★	58	25	[ -18,6 ; -5,1 ]	38	[ 2 ; 6 ]
Lee et al. [45]		21	[ 5 ; 15 ]	[ -20 ; -15 ]	[ 60 ; 70 ]	[ 1,0 ; 2,5 ]
Shin et al. [79]	*	4	12	-22	[ 38 ; 80 ]	[ 0,7 ; 6,0 ]
Hermes et al. [24]	▲	52	[ 16 ; 22 ]	[ -16 ; -4 ]	[ 50 ; 80 ]	0,7
Wang et al. [86]	♦	15	[ -8 ; 19 ]	[ -16 ; -8 ]	[ 12 ; 80 ]	5
Kandula [36]	●	3	22,1	-9,3	71,6	1,77
Total		149	[ -8 ; 25 ]	[ -22 ; -4 ]	[ 12 ; 80 ]	[ 0,7 ; 6,0 ]

TABLEAU 2.7 – Base de données épaisseur - plaque plane verticale

Données expérimentales			Intervalle des paramètres			
Auteur	Symbole	Nombre de points	Température de l'air [°C]	Température de la surface froide [°C]	Humidité relative [%]	Vitesse de l'air [m · s <sup>-1</sup> ]
El Cheikh and Jacobi [16]	■	20	[ 5 ; 20 ]	[ -20 ; -10 ]	[20 ;56]	[ 0,18 ; 0,35 ]
Janssen et al. [32]	■	92	[ -7,72 ; 0.03 ]	[ -19 ; -9 ]	[42,5 ;60,8]	[ 0.7 ]
Fossa and Tanda [17]	■	26	[ 26 ; 28 ]	[ -13 ; -4 ]	[31 ;58]	[ 0.1 ]
Lee and Ro [48]	■	32	[ 7 ; 18 ]	[ -15 ; -10 ]	[ 60 ; 74 ]	1,1
Yamashita et al. [91]	■	10	[ -20 ; 0 ]	[ -30 ; -10 ]	[ 52 ; 72 ]	0,5
Total		180	[ 5 ; 20 ]	[ -20 ; -10 ]	[ 20 ; 74 ]	[ 0,18 ; 1,10 ]

TABLEAU 2.8 – Base de données masse volumique - plaque plane verticale

Données expérimentales			Intervalle des paramètres			
Auteur	Symbole	Nombre de points	Température de l'air [°C]	Température de la surface froide [°C]	Humidité relative [%]	Vitesse de l'air [m · s <sup>-1</sup> ]
El Cheikh and Jacobi [16]	■	94	[ 5 ; 20 ]	[ -20 ; -10 ]	[ 20 ; 56 ]	[ 0,18 ; 0,35 ]
Lee and Ro [48]	■	20	[ 7 ; 18 ]	[ -15 ; -10 ]	[ 60 ; 74 ]	1,1
Yamashita et al. [91]	■	8	[ -14,5 ; -0,6 ]	[ -29,1 ; -10 ]	[ 52 ; 71,9 ]	[0,5 ; 0,53 ]
Total		122	[ 5 ; 20 ]	[ -20 ; -10 ]	[ 20 ; 74 ]	[ 0,18 ; 1,10 ]

TABLEAU 2.9 – Base de données épaisseur - plaques parallèles horizontales

Données expérimentales			Intervalle des paramètres			
Auteur	Symbole	Nombre de points	Température de l'air [°C]	Température de la surface froide [°C]	Humidité relative [%]	Vitesse de l'air [m · s <sup>-1</sup> ]
Ostin and Andersson [68]	▼	24	[ 20,5 ; 21,1 ]	[ -19,9 ; -7,0 ]	[ 31,1 ; 72,0 ]	3

TABLEAU 2.10 – Base de données masse volumique - plaques parallèles horizontales

Données expérimentales			Intervalle des paramètres			
Auteur	Symbole	Nombre de points	Température de l'air [°C]	Température de la surface froide [°C]	Humidité relative [%]	Vitesse de l'air [m · s <sup>-1</sup> ]
Ostin and Andersson [68]	▼	12	[ 20,5 ; 21,1 ]	[ -19,9 ; -7,0 ]	[ 31,1 ; 72,0 ]	3
Hermes et al. [25]	▼	13	[ 4,9 ; 15,9 ]	[ -24,8 ; -10,3 ]	[ 65 ; 75 ]	[ 0,9 ; 1,9 ]
Total		25	[ 4,9 ; 21,0 ]	[ -24,8 ; -10,3 ]	[ 32 ; 75 ]	[ 0,9 ; 5,7 ]

## 2.3 Synthèse

Ce chapitre propose une étude bibliographique détaillée sur le givre, sa formation et ses conséquences à différentes échelles. Dans une première partie, une étude est proposée à l'échelle macroscopique. Ainsi, les conséquences du givre sur les pompes à chaleur et les chambres froides sont détaillées. Les méthodes permettant de le retarder et de l'éliminer sont présentées. Dans une seconde partie, la formation du givre est traitée à une échelle plus petite. Un premier descriptif du développement du givre sur les évaporateurs complets est donné puis la géométrie est simplifiée pour se concentrer sur les mécanismes physiques qui entrent en jeu. Les différentes techniques de mesure de la température de surface du givre, de son épaisseur et de sa masse volumique sont présentées dans le but d'orienter les choix pour le dispositif expérimental. Enfin une présentation des six bases de données, constituées à partir des résultats exploitables de la littérature, est proposée. Ces informations sont utilisées dans le chapitre suivant qui en proposera une analyse critique.

# Chapitre 3

## Modélisation du phénomène de givrage

Ce chapitre a pour objectif de compléter l'étude bibliographique. Le but est de confronter des méthodes prédictives de l'épaisseur et de la masse volumique du givre aux bases de données qui ont été présentées dans le chapitre précédent. Ce travail permet d'avoir un regard critique sur les travaux de la littérature, d'en identifier les faiblesses pour à terme, proposer des solutions. Ce travail est complété par une étude bibliographique des différentes méthodes de prédiction de la conductivité thermique du givre.

La première partie de ce chapitre passe en revue les différents modèles disponibles dans la littérature. Une présentation générale des modèles complexes qui nécessitent un calculateur performant ou font appel à des connaissances en thermodynamique très pointues est proposée. Des modèles plus simples, pouvant être rapidement reprogrammés par le lecteur sont présentés par la suite. Les différents modèles et corrélations qui ont été choisis sont exposés en fin de cette première partie.

La seconde partie expose les résultats des études menées sur les bases de données. Elle propose les résultats d'une étude paramétrique et d'études quantitatives et qualitatives. Cette partie est divisée en sous-parties. Chaque sous-partie correspond à l'une des géométries citées dans le chapitre précédent. Ces travaux ont donné lieu à la publication d'un article dans un journal scientifique (Léoni et al. [52]).

La troisième partie présente une étude bibliographique des méthodes de prédiction de la conductivité thermique du givre. Une revue similaire à celle effectuée pour l'épaisseur et la masse volumique dans cette thèse a déjà été proposée dans la littérature par un groupe de chercheurs. La conductivité thermique présente un nombre de points expérimentaux inférieur à ceux de l'épaisseur ou de la masse volumique, dû à un nombre d'études sur le sujet plus réduit. Ainsi, le même type d'étude n'a donc pas été effectué dans ce travail, le contenu est principalement issu de la littérature.

## 3.1 Méthodes de prédiction de l'épaisseur et de la masse volumique du givre

Cette section présente les méthodes de prédiction existant dans la littérature. Elles sont classées selon trois types :

1. les corrélations ;
2. les modèles physiques ;
3. les modèles numériques.

Les corrélations et modèles physiques sont des méthodes simples à reproduire. Les modèles numériques sont considérés plus complexes et nécessitent plus de temps pour être reprogrammés. Leur complexité peut être due à une géométrie complexe (2D ou 3D), un maillage important ou encore à l'utilisation d'équations complexes dépendant de nombreux paramètres qui sont généralement inconnus (cf. l'équation utilisée pour calculer le taux de nucléation dans les travaux de Cui et al. [12]). Ces modèles requièrent l'utilisation de logiciels de simulation (CFD par exemple) ou de schémas numériques complexes. Cette thèse étant en priorité consacrée à une étude expérimentale, ces modèles numériques très intéressants sont cités, mais ne font pas l'objet d'une exploitation approfondie.

### 3.1.1 Modèles numériques

Lenic et al. [49] proposent un modèle transitoire à deux dimensions de la formation du givre sur un évaporateur tubes-ailettes. Cette modélisation nécessite une approche mathématique complexe et une puissance de calcul importante étant donnée la géométrie considérée (les calculs sont résolus à l'aide de la méthode des volumes finis). Ce modèle, validé à l'aide de données expérimentales permet de prédire les baisses des flux de chaleur liés à la formation du givre sur l'échangeur.

Le modèle proposé par Knabben et al. [39] se veut plus simple mais nécessite quand même une puissance de calcul importante en raison de la géométrie choisie. Ils proposent un modèle bi-dimensionnel permettant de prédire le blocage de l'évaporateur tubes-ailettes au cours du temps ainsi que les transferts de masse et de chaleur. La validation expérimentale du modèle a permis de montrer qu'il était capable de prédire dans un intervalle d'erreur de 10 % les pertes de pression, la masse de givre déposée, la puissance frigorifique et le débit d'air.

En parallèle, Cui et al. [12] réalisent un modèle sur une géométrie plus simple : une plaque plane. Ce qui rend ce modèle complexe, c'est l'implémentation de la théorie de la nucléation. En effet, les auteurs souhaitent avoir une vision plus fine de la formation du givre. Ils veulent modéliser la structure du givre. Ce modèle peut être utilisé pour décrire la période de formation initiale du givre ainsi que l'influence de l'état de surface du givre sur son développement. Ils proposent une étude spatio-temporelle du phénomène de nucléation du givre. Sa validation a permis de montrer que pendant la période initiale de croissance du givre, le transfert de masse contribue principalement à l'augmentation de l'épaisseur tandis que dans la période suivante, il conduit à l'augmentation de la masse volumique du givre.

En 2015, Huynh [28] a proposé un modèle numérique tridimensionnel basé sur la théorie de la nucléation pour décrire la formation du givre sur une plaque plane. Les résultats obtenus ont pu être validés à partir de points expérimentaux. Les test effectués ont mis

en lumière l'importance de l'angle de contact. Ce modèle a été étendu à une géométrie plus complexe : une partie d'un échangeur de chaleur. Cette étude montre des résultats encourageants. Cependant, malgré un matériel informatique performant, cet outil nécessite des temps de calcul importants.

### 3.1.2 Modèles physiques et corrélations

Dans cette thèse, les recherches se sont donc concentrées sur des méthodes plus simples. Cette simplicité est essentiellement apportée par un choix particulier de géométrie. Ainsi, la plupart des modèles et des corrélations présentés dans cette section ont été établis pour des géométries basiques telle que la plaque plane. Il existe de nombreux modèles simplifiés au sein de la littérature.

En 1975, Jones and Parker [33] et Sami and Duong [74] (1989) proposent des premiers modèles basés sur la diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans la couche de givre et sur les équations de conservation de la masse et de l'énergie. Face à des résultats encore assez éloignés de la réalité mais néanmoins encourageants, O'Neal and Tree [67] développent un modèle théorique permettant de prédire la croissance et la densification du givre. Les auteurs proposent de traiter la couche de givre comme un milieu poreux. Cette hypothèse sera reprise dans de nombreux modèles [23–25, 35, 47].

En se basant sur le modèle de Jones and Parker [33], Lee et al. [44] ont proposé un modèle transitoire unidimensionnel de la formation du givre sur une plaque plane. En plus de s'appuyer sur le principe de la diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans la couche de givre, les auteurs s'intéressent à la génération de chaleur due à la sublimation de la vapeur d'eau. Ils introduisent un coefficient d'absorption dans les calculs. Ce modèle donne lieu à certaines hypothèses énumérées ici :

1. le processus est supposé quasi-stationnaire ;
2. les transferts thermiques diffusifs entre l'interface air/givre et la plaque refroidie sont unidimensionnels ;
3. la masse volumique de la couche de givre à chaque instant est une valeur moyenne ;
4. la conductivité du givre est fonction de sa masse volumique ;
5. la quantité de vapeur d'eau absorbée dans la couche de givre est proportionnelle à la masse volumique de la vapeur d'eau dans la couche de givre (facteur d'absorption) ;
6. l'analogie entre les transferts de chaleur et de masse est applicable (Analogie de Lewis) ;
7. la pression de l'air à l'extérieur et à l'intérieur de la couche de givre sont considérées uniformes.

Ce modèle permet de bien modéliser le phénomène de givrage.

Un modèle relativement similaire a été développé par Cheng and Cheng [10].

En parallèle, Le Gall and Griot [43] développent un modèle transitoire unidimensionnel pour prédire la croissance et la densification du givre. Des écarts importants entre les données expérimentales et les résultats fournis par le modèle ont été notés. Les auteurs émettent l'hypothèse que des mécanismes autres que la simple diffusion de la vapeur dans la couche de givre pourraient avoir lieu dans les phénomènes de transfert de masse.

Dans les publications antérieures à 2004, l'air à la surface du givre était la plupart du temps considéré comme saturé. En 2004, Na and Webb [62] proposent de considérer l'air à la surface du givre comme sursaturé et non plus saturé. Ils introduisent aussi un facteur de tortuosité afin de quantifier la diffusion de la vapeur d'eau dans la couche de givre. Leur hypothèse de sursaturation sera confortée par le modèle de Lee and Ro [48]. Na and Webb [62] ont réalisé deux modèles, le premier avec l'hypothèse de saturation, le second avec l'hypothèse de sursaturation. Les résultats obtenus montrent que le modèle le plus proche de la réalité est celui qui considère une sursaturation. Bien avant ces années, seule une corrélation pour prédire l'épaisseur de givre avait été proposée avec l'hypothèse de sursaturation. Il s'agit de celle de Schneider [76], qui date de 1978. L'équation pour prédire l'épaisseur du givre était fonction des propriétés de la glace, de la chaleur latente de désublimation, des températures du givre et de la surface froide et des pressions partielles de la vapeur d'eau à différentes températures. Les résultats ont été validés à l'aide de résultats expérimentaux obtenus sur un cylindre refroidi. L'auteur précise que cette corrélation peut être étendue aux plaques planes.

En 2002, Yun et al. [97] proposent de s'intéresser aux propriétés du givre telles que sa rugosité et sa conductivité. Après avoir développé une corrélation empirique pour la rugosité du givre, ils l'implémentent dans leur modèle. Ils déterminent ainsi les coefficients de transfert de masse et de chaleur à l'aide d'une méthode de Prandtl modifiée en tenant compte de la rugosité et de l'épaisseur de la couche limite. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre données expérimentales et modèle. Inspiré par ces derniers modèles [44, 61, 62, 97], Wang et al. [86] proposent un modèle prédictif de la croissance du givre sur une plaque plane. Il utilise une corrélation empirique (basée sur celle de Hayashi et al. [21]) pour la masse volumique initiale du givre et utilise des hypothèses similaires à celles de Lee et al. [44].

Une série d'études vient fortement enrichir les précédentes recherches sur le sujet. En 2009, Hermes et al. [24] proposent un premier modèle qui considère le givre comme un milieu poreux, l'air à saturation à l'interface givre-air et prend en compte la rugosité du givre. Pour connaître la masse volumique du givre, ils utilisent une corrélation empirique inspirée de celle de Hayashi et al. [21] qui prend en plus en compte la température de surface du givre. La résolution des équations de conservation de la masse et de l'énergie conduisent à des résultats satisfaisants : l'erreur maximum entre les données expérimentales et le modèle est de 10 %. Dans une autre étude, Da Silva et al. [13] proposent une corrélation pour la masse volumique dépendant de la température de surface du givre et de la température de rosée de l'air. Cette corrélation, appliquée à des évaporateurs tubes-ailettes a montré de bons résultats. En 2012, Hermes [23] complète cette étude en proposant une solution analytique pour déterminer l'épaisseur et la masse volumique du givre. La résolution analytique permet d'obtenir une expression pour l'épaisseur du givre en fonction du temps, du nombre de Nusselt et du degré de sursaturation. La résolution des équations étant lourde d'un point de vue informatique, les auteurs proposent en complément une simplification de leur modèle qui présente peu de déviation par rapport à la solution exacte. Enfin, en 2014, ils proposent une corrélation semi-empirique pour calculer la masse volumique du givre basée sur le calcul de la porosité.

Ces années de recherches ont permis de proposer des méthodes complexes et simplifiées de calcul des propriétés du givre. Une étude très complète de Iraborry et al. [29] propose un état de l'art des différents modèles simplifiés et corrélations. Les auteurs listent des modèles et corrélations disponibles dans la littérature permettant de prédire la conduc-

tivité, l'épaisseur et la masse volumique du givre ainsi que le coefficient d'échange convectif. Toutes les méthodes prédictives sont présentées avec leurs intervalles de définition. Les auteurs ont identifié que des études traitant de températures d'air très froides manquaient. Ils suggèrent aussi que la température de surface du givre, souvent utilisée dans les corrélations, le soit aussi comme paramètre indicatif lors des stratégies de dégivrage. Enfin, ils insistent sur la nécessité de fournir plus d'études comparatives sur les différentes méthodes prédictives afin d'obtenir des modèles numériques de plus en plus performants. C'est à ce besoin particulier que répond ce chapitre.

### 3.1.3 Modèles et corrélations choisis

Cette partie présente les modèles et corrélations qui ont été choisis pour être testés et confrontés les uns aux autres. Les recherches sont concentrées sur les méthodes de prédiction de la formation et du développement du givre sur une plaque plane puisque c'est la géométrie qui est étudiée dans le volet expérimental de cette étude. Cette section est divisée en deux sous-parties. La première présente les méthodes prédictives qui ont été choisies pour prédire l'épaisseur du givre et la seconde pour prédire sa masse volumique. Ces deux paramètres seront aussi mesurés lors de l'étude expérimentale.

#### Prédiction de l'épaisseur du givre

Quatre méthodes prédictives pour le calcul de l'épaisseur du givre en fonction du temps sont évaluées dans cette partie. Parmi ces études, la corrélation de Schneider [76] est testée (voir Équation (3.1)). Pour rappel il s'agit d'une corrélation qui a été validée par des données expérimentales obtenues sur un tube cylindrique. L'auteur précise que l'équation peut être étendue aux plaques planes. Cette corrélation a été choisie car c'est l'une des premières qui a été établie, il est donc intéressant de la comparer à des méthodes plus récentes. L'objectif étant aussi de vérifier son application aux plaques planes.

$$e_{Schneider} = 0,465 \cdot \left( \frac{\lambda_g}{\Delta h_{sub} \rho_g} \cdot t \cdot (T_{givre} - T_p) \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{t}{t_{ref}} \right)^{-0,03} \left( \frac{T_{givre} - T_{fus}}{T_{ref}} \right)^{0,01} \times \left( \frac{p - p'_{givre}}{p' - p'_{givre}} \right)^{0,25} \cdot F_t \quad (3.1)$$

où  $t_{ref}$  représente une heure et  $T_{ref}$  représente un Kelvin. Ces deux constantes sont ajoutées pour introduire des paramètres adimensionnels dans l'équation.  $F_t$  est défini par l'équation (3.2) :

$$F_t = 1 + 0,052 \cdot \frac{T_{givre} - T_{fus}}{T_{fus} - T_p} \quad (3.2)$$

$p$ ,  $p'$  et  $p'_{givre}$  représentent respectivement la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air, la pression partielle de la vapeur d'eau à saturation dans l'air et la pression de la vapeur à saturation à la température de surface du givre.

Cette corrélation dépend du temps et des paramètres environnementaux comme la température de la surface froide et la quantité de vapeur d'eau dans l'air. La faiblesse de cette corrélation est qu'elle ne peut être appliquée à toutes les conditions expérimentales. En effet, les tests avec des températures d'air élevées combinées à des humidités relatives faibles ne peuvent être simulés avec cette corrélation à cause du rapport de

pressions partielles. Certaines conditions environnementales rendent ce rapport négatif et, avec la puissance inférieure à l'unité, donnent des nombres complexes, ce qui n'a pas de sens physique.

Les autres méthodes prédictives choisies sont des modèles et représentent une grande partie de ce qui est proposé dans la littérature. Comme l'objectif premier de cette thèse est la réalisation du banc expérimental, un grand nombre de modèles ne peut pas être testé. Toutefois, trois modèles théoriques ont été choisis et reproduits. La justification du choix est fournie pour chaque modèle.

Les trois modèles sont ceux de Lee et al. [44], Hermes et al. [24] et Hermes [23].

Le modèle de Lee et al. [44] a été choisi car c'est l'un des premiers modèles les plus complets qui a été réalisé. En effet, il prend en compte la diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans la couche de givre et fait l'hypothèse que la quantité de vapeur d'eau absorbée dans la couche de givre est proportionnelle à la masse volumique de la vapeur d'eau dans la couche de givre. De plus, l'air à l'interface est considéré à saturation.

Le second modèle, celui de Hermes et al. [24] a été choisi car il prend en compte la porosité et la tortuosité de la couche de givre. Son avantage est qu'il propose aussi un grand nombre de données expérimentales qui permettent de valider sa bonne reproduction.

Il a aussi été décidé de tester un modèle plus récent de Hermes [23]. Les recherches se sont concentrées sur la version simplifiée de l'équation algébrique permettant de calculer à partir de nombres adimensionnels l'épaisseur du givre. La reproduction de ce modèle rapide à mettre en place permet de quantifier les imprécisions apportées par la simplification, i.e. voir si celles-ci sont négligeables. En effet, il peut être très intéressant d'avoir un modèle rapide à implémenter qui permette d'approcher les valeurs des paramètres relatifs à la croissance du givre. Pour certaines applications une telle approche pourrait peut être s'avérer suffisante.

Pour compléter cette étude, le modèle de Wang et al. [86] a aussi été reproduit. Cependant, les informations fournies par l'auteur n'ont pas permis de reproduire le modèle de manière satisfaisante. En effet, avec les résultats expérimentaux des auteurs, des résultats identiques n'ont pas pu être obtenus. De ce fait, ce modèle a été écarté de l'étude comparative.

Dans leurs modèles, Lee et al. [44] et Hermes et al. [24] supposent que le débit massique de vapeur d'eau contribue à l'augmentation de l'épaisseur comme illustré sur la figure 3.1. L'épaisseur de givre est définie par :

$$e_{\text{givre}}|_{t+\Delta t} = e_{\text{givre}}|_t + \Delta t \cdot \frac{\dot{m}_{e_{\text{givre}}}}{\rho_{\text{givre}}}|_t \quad (3.3)$$

Les deux modèles diffèrent dans le calcul de la masse volumique. Hermes et al. [24] calculent la masse volumique du givre à chaque pas de temps avec une corrélation empirique. A l'opposé, Lee et al. [44] considèrent la masse volumique du givre comme une fonction du débit massique de densification (Figure 3.1). Le modèle de Hermes et al. [24] nécessite une valeur pour l'épaisseur initiale qui est donnée et vaut 0,1  $\mu\text{m}$ . Le modèle de Lee et al. [44] nécessite une épaisseur et une masse volumique initiales du givre. Les deux valeurs ne sont pas renseignées par les auteurs. Cependant, une analyse de leurs tests a montré que l'épaisseur initiale pouvait être définie à 0,1  $\mu\text{m}$  et la masse volumique initiale à 47  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Il faut cependant garder à l'esprit que ces choix peuvent

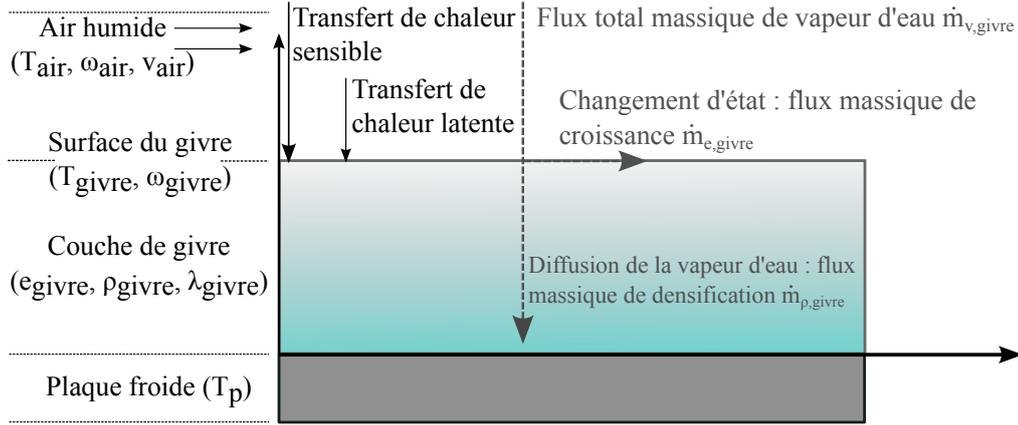


FIGURE 3.1 – Modèle physique du développement du givre sur une plaque plane

induire des imprécisions lorsque le modèle sera appliqué à toute la base de données. Ces valeurs étaient cohérentes pour les gammes de températures, humidités relatives et vitesses de Lee et al. [44] mais ne le seront pas forcément pour d'autres intervalles de mesures.

Ces deux premiers modèles présentent des équations différentielles dépendantes du temps qui doivent être intégrées numériquement. Appliquée à une base de données, cette opération demande un temps de calcul important.

C'est pourquoi l'étude du modèle simplifié de Hermes [23] est proposée. L'épaisseur de givre est donnée par l'équation (3.4) :

$$e_{\text{givre}} = l \cdot \frac{\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_0 \cdot \tau} - d_1}{2} \quad (3.4)$$

Avec  $d_1$  et  $d_0$  des fonctions de la température de l'air, de la température de la surface froide, de l'humidité absolue et de la vitesse de l'air.

Les corrélations de Mao et al. [54] et Mao et al. [55] n'ont pas été testées dans cette étude car elles nécessitent la connaissance du rapport de position adimensionné. Ce rapport dépend de la position le long de la plaque, ce qui implique que l'épaisseur doit être connue pour chaque abscisse  $x$ . Comme les valeurs collectées sont des valeurs moyennées, ces deux corrélations ne peuvent être appliquées. Le tableau 3.1 regroupe les méthodes prédictives pour l'épaisseur de givre présentées ci-dessus ainsi que leurs intervalles d'application.

### Prédiction de la masse volumique du givre

Cinq corrélations empiriques sont utilisées pour prédire la masse volumique du givre au cours du temps. La première relation utilisée est donnée par Hayashi et al. [21] (Équation (3.5)).

$$\rho_{\text{givreHayashi}} = 650 \cdot \exp(0,277 \cdot T_{\text{givre}} - 273,15) \quad (3.5)$$

Cette équation, déterminée à partir de données expérimentales, dépend uniquement de la température de surface du givre.

La seconde corrélation testée est celle de Kandula [36]. Son étude est intéressante car l'auteur passe en revue un nombre important de corrélations existantes. Il propose une corrélation adimensionnelle, dépendant de la température de surface du givre, comme

TABLEAU 3.1 – Domaines de validité des méthodes prédictives de l'épaisseur du givre

Méthode prédictive	Intervalle d'application
Hermes et al. [24]	$-16 \leq T_p \leq -4 \text{ °C}$ $16 \leq T_{\text{air}} \leq 22 \text{ °C}$ $50 \leq \text{HR} \leq 80 \%$ $6\,000 \leq \text{Re} \leq 50\,000$ $50 \leq \rho_{\text{givre}} \leq 400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ $0 \leq t \leq 120 \text{ min}$
Lee et al. [44]	$T_p = -15 \text{ °C}$ $T_{\text{air}} = 25 \text{ °C}$ $50 \leq \text{HR} \leq 80 \%$ $6\,000 \leq \text{Re} \leq 50\,000$ $50 \leq \rho_{\text{givre}} \leq 400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ $0 \leq t \leq 120 \text{ min}$
Schneider [76]	$-30 \leq T_p \leq -5 \text{ °C}$ $5 \leq T_{\text{air}} \leq 15 \text{ °C}$ $96 \leq \text{HR} \leq 99 \%$ $4\,000 \leq \text{Re} \leq 32\,000$ $60 \leq t \leq 480 \text{ min}$
Hermes [23]	$5,3 \leq a_1 \cdot (T_{\text{air}} - T_p) \leq 8,5 \text{ °C}$ $0,0057 \leq w_{\text{air}} - w_{\text{givre}} \leq 0,0090 \text{ kg}_v \cdot \text{kg}_a^{-1}$ $\text{Re} \leq 3 \times 10^7$ $29,3 \leq \text{Nu} \leq 40,6$ $82 \leq \rho_{\text{givre}} \leq 318 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ $0 \leq t \leq 120 \text{ min}$

la corrélation précédente. La masse volumique du givre est exprimée par l'équation (3.6) :

$$\rho_{\text{givre}_{Kandula}} = \rho_g \cdot \left[ 0,5 \cdot \left( \frac{T_{\text{givre}} - T_p}{T_{\text{fus}} - T_p} \right) \cdot \exp \left( - \left( 0,376 + 1,5 \cdot \left( \frac{T_{\text{givre}} - T_p}{T_{\text{fus}} - T_p} \right) \right) \right) \times \left( 1 - \sqrt{\frac{\text{Re}}{\text{Re}_c}} \right) \right] \quad (3.6)$$

avec  $\rho_g$  la masse volumique de la glace, Re le nombre de Reynolds et  $\text{Re}_c$  le nombre de Reynolds critique.

Kandula [36] considère que prendre en compte la température de surface du givre dans le calcul de la masse volumique permet de meilleures prédictions. Cependant, dans cette étude, ces deux premières corrélations sont considérées comme restrictives. En effet, la nécessité de connaître la température de surface du givre est un frein majeur à son utilisation. Cette température n'est que très rarement fournie dans les articles de la

littérature, car elle est difficile à mesurer et aucun des deux auteurs n'explique comment calculer cette température en fonction des paramètres environnementaux classiques (température de l'air, de la surface froide, vitesse et humidité relative). La nécessité de connaître la température de surface du givre constitue la faiblesse majeure de ces corrélations. Pour contourner ce problème et tester ces corrélations, il a été décidé que la température de surface du givre serait déterminée par l'intermédiaire du modèle de Hermes et al. [24] - modèle présenté dans le paragraphe précédent pour le calcul de l'épaisseur du givre.

La troisième corrélation ayant fait l'objet de cette étude est celle de Hosoda and Uzuhashi [26] (Équation (3.7)).

$$\rho_{\text{givre}_{\text{Hosoda}}} = 340 \cdot |T_p|^{-0,445} + 85 \cdot v_{\text{air}} \quad (3.7)$$

Cette corrélation dépend de la température de la surface froide et de la vitesse d'air. Elle n'est pas exprimée en nombre adimensionnel mais ne nécessite pas la connaissance de la température de surface du givre.  $T_p$  doit être exprimée en degré Celsius dans cette équation.

Yang and Lee [92] ont développé la quatrième corrélation de cette étude (Équation (3.8)) basée sur des nombres adimensionnels.

$$\rho_{\text{givre}_{\text{Yang}}} = \rho_g \cdot \left[ 1,54 \times 10^{-4} \cdot \text{Re}^{0,351} \cdot \text{Fo}^{0,311} \cdot w_{\text{air}}^{-0,368} \cdot \left( \exp \left( \frac{T_{\text{air}} - T_{\text{pt}}}{T_{\text{air}} - T_p} \right) \right)^{2,4} \right] \quad (3.8)$$

Avec  $\text{Fo} = \frac{\alpha t}{l_c^2}$  le nombre de Fourier et  $T_{\text{pt}}$  la température du point triple de l'eau.

Cette relation est normalisée par la masse volumique de la glace et dépend fortement de la température adimensionnée. À travers cette relation, il peut être noté que les auteurs ne considèrent pas la diffusion massique comme l'unique phénomène responsable de la densification du givre, puisque l'exposant associé au temps est de 0,311 au lieu de 0,5 (pour un phénomène de diffusion seul). Cette corrélation, comparée aux résultats expérimentaux des mêmes auteurs donne des masses volumiques de givre avec une erreur maximum de 10 %.

La dernière relation, qui est semi-empirique est proposée par Hermes et al. [25]. Un modèle ainsi que des données expérimentales ont permis d'établir la relation (Équation (3.9)).

$$\rho_{\text{givre}_{\text{Hermes}}} = 2,2 \cdot \text{Ja}^{-1,5} \cdot t^{0,5} \quad (3.9)$$

Cette relation dépend fortement du nombre de Jakob modifié  $\text{Ja} = \frac{c_{p,\text{air}} \cdot (T_{\text{air}} - T_p)}{\Delta h_{\text{sub}} \cdot (w_{\text{air}} - w_{p,\text{sat}})}$  et du temps. Dans cette étude, les auteurs considèrent que seul le phénomène de diffusion a lieu dans la couche de givre (l'exposant du paramètre temps est de 0,5), contrairement à Yang and Lee [92]. Cette corrélation présente une erreur maximum de 10 % pour la prédiction de la masse volumique.

Comme pour l'épaisseur, Mao et al. [55] ont proposé une corrélation pour la masse volumique qui dépend aussi du rapport de position adimensionnel. Cette corrélation n'a ainsi pas pu être étudiée dans ce chapitre.

Le tableau 3.2 présente les méthodes prédictives et leurs intervalles de définition pour la masse volumique.

TABLEAU 3.2 – Domaines de validité des méthodes prédictives de la masse volumique du givre

Méthode prédictive	Intervalle d'application
Hayashi et al. [21]	$-18,6 \leq T_p \leq -5 \text{ }^\circ\text{C}$ $2 \leq v_{\text{air}} \leq 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $w_{\text{air}} = 0,0075 \text{ kg}_v \cdot \text{kg}_a^{-1}$ $0 \leq t \leq 450 \text{ min}$
Kandula [35]	$-20 \leq T_p \leq -5 \text{ }^\circ\text{C}$ $10 \leq T_{\text{air}} \leq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ $50 \leq \text{HR} \leq 80 \%$ $0,7 \leq v_{\text{air}} \leq 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Hosoda and Uzuhashi [26]	$-20 \leq T_p \leq -5 \text{ }^\circ\text{C}$ $0 \leq T_{\text{air}} \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ $1 \leq v_{\text{air}} \leq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $0,00188 \leq w_{\text{air}} \leq 0,00604 \text{ kg}_v \cdot \text{kg}_a^{-1}$ $0 \leq t \leq 240 \text{ min}$
Yang and Lee [92]	$-35 \leq T_p \leq -15 \text{ }^\circ\text{C}$ $-5 \leq T_{\text{air}} \leq 15 \text{ }^\circ\text{C}$ $1,0 \leq v_{\text{air}} \leq 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $0,00322 \leq w_{\text{air}} \leq 0,00847 \text{ kg}_v \cdot \text{kg}_a^{-1}$
Hermes et al. [25]	$-15 \leq T_p \leq -5 \text{ }^\circ\text{C}$ $16 \leq T_{\text{air}} \leq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ $v_{\text{air}} = 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $5 \leq \text{HR} \leq 80 \%$ $0 \leq t \leq 120 \text{ min}$

Les cinq relations ci-dessus vont être testées pour évaluer leur capacité à prédire les résultats expérimentaux. Une remarque peut être faite concernant ces équations. Elles semblent s'améliorer avec le temps car les plus anciennes présentent peu de paramètres influents qui ne sont pas adimensionnés. Au contraire, les corrélations développées ces dernières années présentent des nombres adimensionnels et prennent plus de paramètres environnementaux en compte, ainsi que le temps.

## 3.2 Étude comparative des bases de données et méthodes prédictives

Cette section présente les résultats d'une étude comparative issue des bases de données introduites dans le chapitre précédent ainsi que les différents modèles explicités dans la section ci-dessus. Trois types d'études distinctes sont réalisées :

1. **une étude paramétrique** : elle consiste à comparer uniquement les résultats expérimentaux obtenus par les différents auteurs pour évaluer l'impact de la tem-

pérature de la surface froide, de la vitesse et de l'humidité relative sur l'épaisseur et la masse volumique du givre ;

2. **une étude quantitative** : elle est réalisée à partir de tous les points des différentes bases de données et des modèles. Chaque point d'une base de données est implémenté dans les modèles correspondants. Cette étude permet de quantifier la différence entre les résultats expérimentaux et théoriques ;
3. **une étude qualitative** : cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact des paramètres environnementaux sur la dispersion des modèles. Ainsi, deux points de données sont choisis, avec un unique paramètre variant. Ces points sont implémentés dans tous les modèles associés.

Chacune de ces méthodes est appliquée aux différentes géométries présentées dans le chapitre précédent : la plaque plane horizontale, qui regroupe le plus de points de données, la plaque plane verticale et les deux plaques planes parallèles.

Pour compléter ce travail, il pourrait être intéressant de travailler sur une dernière géométrie : les cylindres. Peu d'études ont été menées sur ce sujet. Raju and Sherif [72] ont proposé un modèle transitoire pour prédire le développement du givre sur les cylindres qu'ils ont comparé à des données expérimentales.

### 3.2.1 Plaques planes horizontales

Cette partie traite uniquement de la base de données sur les plaques planes horizontales.

#### Étude paramétrique

Cette section présente les résultats de l'étude paramétrique. Cette étude consiste en la comparaison des différents points de données de la littérature. L'objectif est de quantifier l'impact des paramètres environnementaux sur la formation du givre et observer si les différents auteurs obtiennent des résultats cohérents.

L'influence de la température de la surface froide sur l'épaisseur du givre est présentée sur la figure 3.2a. Les autres paramètres (vitesse et humidité relative) sont gardés constants. Les données expérimentales fournies par Hermes [23] montrent que plus la température de surface est faible, plus la couche de givre est épaisse. Il peut être conclu que la température de surface froide a un impact conséquent sur la croissance du givre. Cette tendance est confirmée par tous les points de la base de données concernés par cette étude.

L'impact de la vitesse est illustré sur la figure 3.2b. Les données expérimentales sont fournies par Lee et al. [44] et Hermes [23]. Pour ces expériences, toutes les conditions sont constantes excepté la vitesse de l'air. La figure 3.2b montre que l'épaisseur de givre augmente avec la vitesse pour les données de Lee et al. [44]. Cependant, les résultats obtenus par Hermes [23] ne montrent pas d'influence particulière, ce qui peut être dû à la faible différence de vitesse entre ses deux expériences. De manière générale, une vitesse élevée semble entraîner le givrage d'une quantité plus importante de vapeur d'eau, résultat de coefficients de transfert de masse et de chaleur élevés.

L'influence de l'humidité relative est étudiée à l'aide des données de Lee et al. [44]. L'évolution de l'épaisseur de givre est donnée pour des humidités relatives de 50 %, 70 % et 80 %. Comme pour les deux premiers tests, les autres paramètres sont gardés constants. La figure 3.2c montre que l'épaisseur augmente avec l'humidité relative. Son

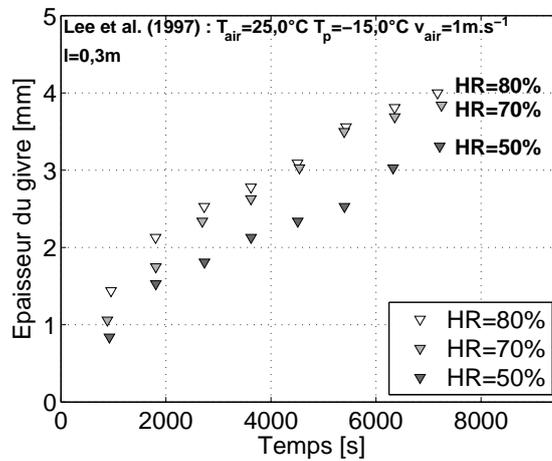
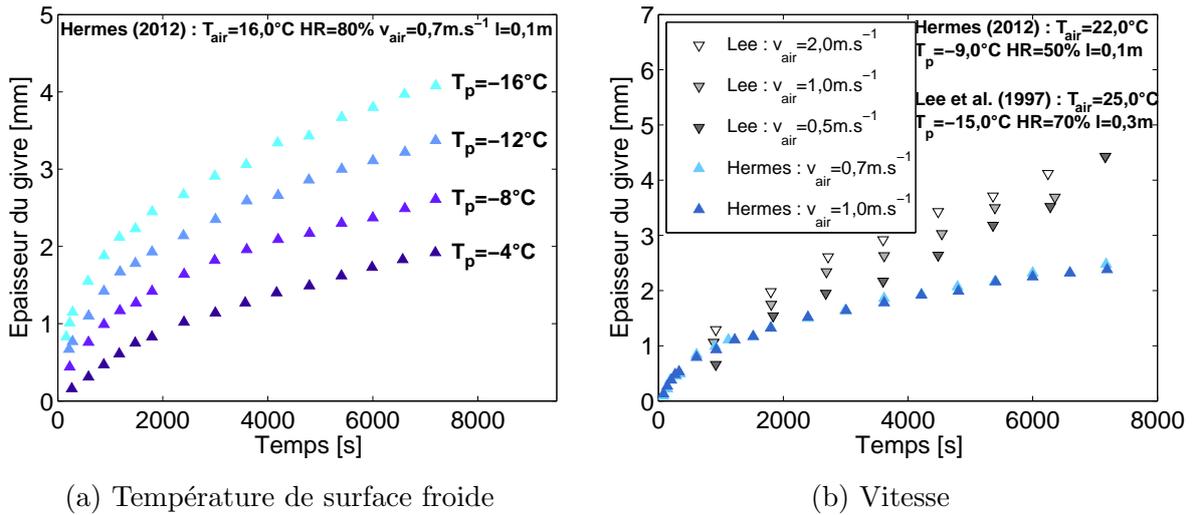


FIGURE 3.2 – Impact des paramètres environnementaux sur l’épaisseur du givre formé sur une plaque plane

influence est simple à comprendre. En effet, à la même température d’air, une humidité relative plus élevée est synonyme d’une quantité d’eau plus importante soumise au givrage. Quand l’air entre en contact avec la surface froide, une quantité plus importante de vapeur givre sur la plaque. De plus, la vitesse de croissance du givre est plus élevée au début du test pour une humidité relative plus importante.

La même étude paramétrique a été réalisée pour la masse volumique du givre.

Le figure 3.3 montre l’évolution de la masse volumique du givre en fonction des mêmes trois paramètres que pour l’épaisseur. Comme pour l’épaisseur du givre, lorsqu’un paramètre est étudié les autres sont gardés constants. Les résultats sont donnés pour différentes températures de surface froide, humidités relatives et vitesses d’air.

La figure 3.3a montre l’impact de la température de surface froide. Il peut être observé que la masse volumique du givre diminue avec les faibles températures. Les températures élevées favorisent la densification de la couche de givre : le flux massique contribuant à l’augmentation de la masse de la couche est plus élevé que celui contribuant à l’augmentation de l’épaisseur.

Pour les vitesses d’air, la conclusion est plus claire que pour l’épaisseur : la masse

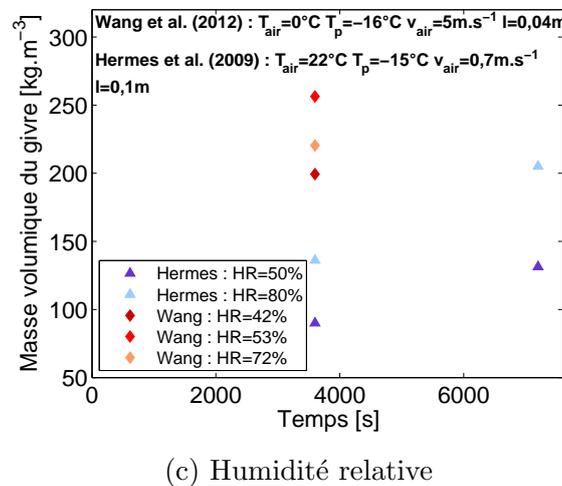
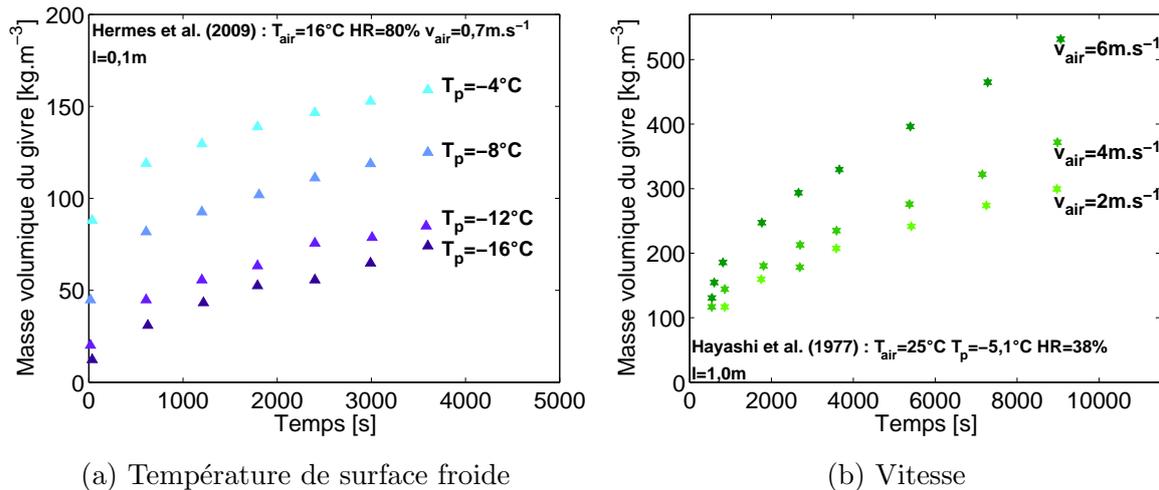


FIGURE 3.3 – Impact des paramètres environnementaux sur la masse volumique du givre formé sur une plaque plane

volumique augmente avec la vitesse. L'augmentation du nombre de Reynolds provoque l'apparition d'une couche de givre plus dense. Les transferts de masse et de chaleur sont localement plus importants laissant moins de place à l'air dans la couche poreuse.

Pour l'impact de l'humidité relative, les conclusions sont moins évidentes. En effet, les résultats obtenus par les deux auteurs ne sont pas en accord. Dans leurs travaux, Hermes et al. [24] observent que la couche de givre est plus dense lorsque l'humidité relative est élevée alors que les données expérimentales de Wang et al. [86] montrent que la masse volumique est plus importante pour une humidité relative moyenne. Comme le phénomène de densification du givre est un phénomène qui est moins intuitif que l'épaisseur du givre, il n'est pas possible d'apporter des conclusions solides. La masse volumique dépend de la masse de givre déposée mais aussi de l'épaisseur de la couche de givre : la prédominance de l'un des deux facteurs nécessite d'être clarifiée.

Cette étude paramétrique des données expérimentales disponibles dans la littérature montre que le phénomène de formation du givre n'est pas encore bien compris. Plus particulièrement en ce qui concerne la densification, davantage de tests expérimentaux sont nécessaires pour comprendre l'impact des différents paramètres. L'attention doit se focaliser sur l'humidité relative.

## Études quantitatives et qualitatives

Cette section propose des études quantitatives ainsi qu'une étude qualitative. Pour les comparaisons quantitatives, les différentes méthodes prédictives sont appliquées aux bases de données de l'épaisseur et la masse volumique. Pour la comparaison qualitative, chaque méthode (modèles et corrélations) est utilisée pour différentes conditions de test. Une première partie présente les résultats obtenus pour l'épaisseur et la seconde pour la masse volumique.

Les meilleurs résultats des études quantitatives pour l'épaisseur du givre sont présentés sur la figure 3.4. Ils ont été obtenus avec la corrélation de Schneider [76] et le modèle de Hermes et al. [24]. Ils sont représentés sur les figures 3.4a et 3.4b respectivement.

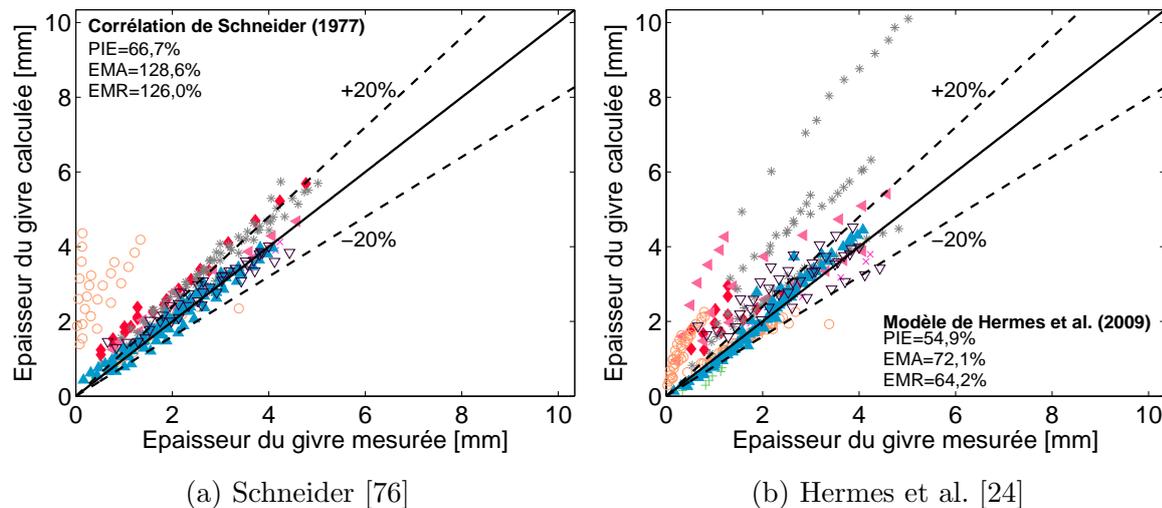


FIGURE 3.4 – Méthodes prédictives appliquées à la base de données de l'épaisseur du givre formé sur une plaque plane (désignation des points dans le tableau 2.5)

À première vue, la corrélation de Schneider [76] semble prédire les données expérimentales efficacement mais, tous les points de la base de données ne sont pas reportés sur la figure 3.4a. La formulation de la corrélation de Schneider [76] ne permet pas de déterminer l'épaisseur du givre dans certaines conditions environnementales. De ce fait, 7 % des points de la base de données ont été exclus. La corrélation de Schneider [76] est une bonne méthode prédictive quand les conditions de tests sont incluses dans le domaine de validité. Pour les autres conditions, il est nécessaire de trouver une autre méthode prédictive.

Les résultats de la figure 3.4b ont été obtenus avec le modèle de Hermes et al. [24] ; les résultats sont plus dispersés que ceux obtenus avec Schneider [76]. Pour certains points, le modèle permet de prédire la formation du givre avec une bonne précision, mais pour d'autres, les erreurs commises peuvent être importantes. Cependant, contrairement à Schneider [76], aucune condition environnementale n'est ignorée.

Pour compléter les résultats, les pourcentages de points compris dans un intervalle d'erreur de  $\pm 20\%$  (PIE), l'erreur moyenne absolue (EMA) et l'erreur moyenne relative (EMR) sont spécifiées sur les figures 3.4a et 3.4b. Le tableau 3.3 présente les pourcentages des points inclus dans l'intervalle pour chaque auteur de la base de données et chaque méthode prédictive.

TABLEAU 3.3 – Prédications de l'épaisseur du givre formé sur une plaque plane

<b>Modèle</b>	Hermes et al. [24]	Lee et al. [44]	Schneider [76]	Hermes [23]
<b>Données expérimentales</b>				
Jones and Parker [33]	26,7 %	19,0 %	14,3 %	<b>42,9 %</b>
Kandula [35]	<b>100,0 %</b>	80,0 %	<b>100,0 %</b>	40,0 %
Cai et al. [9]	0,0 %	0,0 %	<b>83,3 %</b>	0,0 %
Lee et al. [45]	23,8 %	0,0 %	<b>64,3 %</b>	19,1 %
Wang et al. [86]	55,6 %	38,9 %	<b>66,2 %</b>	35,6 %
Yonko and Sepsy [95]	31,5 %	17,8 %	<b>47,9 %</b>	37,0 %
Hermes et al. [24]	<b>87,4 %</b>	1,1 %	83,9 %	87,4 %
Lee et al. [44]	55,0 %	47,5 %	<b>87,5 %</b>	47,5 %
Total des données expérimentales	54,9 %	23,8 %	<b>66,7 %</b>	40,8 %

Le modèle de Lee et al. [44] semble être celui qui reproduit le moins bien les résultats expérimentaux. Les hypothèses qui ont été faites pour l'épaisseur et la masse volumique initiales du givre peuvent en être la cause. Schneider [76] et Hermes et al. [24] montrent des résultats parfaitement acceptables. Néanmoins, des améliorations sont encore nécessaires sur le sujet afin de pouvoir proposer une méthode non restrictive pour prédire l'épaisseur du givre.

Une étude qualitative vient compléter les précédents résultats. Pour rappel, cette étape a pour objectif d'observer la dispersion des modèles en fonction des paramètres environnementaux.

La figure 3.5 montre les résultats pour des vitesses de  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Les autres paramètres sont gardés constants. Les prédictions sont plus dispersées pour une faible vitesse que pour une vitesse élevée. Ce travail montre que des améliorations sont nécessaires pour étendre les gammes de validité des modèles et des corrélations.

La figure 3.6 montre le même test avec l'humidité relative comme paramètre variant. Comme pour la vitesse, les méthodes prédictives présentent plus de dispersion pour l'humidité relative faible. Plus l'humidité relative est élevée, plus les modèles et corrélations sont proches des résultats expérimentaux.

Les simulations ont aussi été réalisées pour différentes températures de plaque : plus la température est basse, moins la dispersion est importante.

Le même travail appliqué à la base de données de la masse volumique est présenté dans les paragraphes suivants. Pour rappel, les données expérimentales de Lee et al. [45] ont été exclues de cette étude.

Les résultats de l'étude quantitative obtenus pour chaque corrélation sont présentés dans le Tableau 3.4. Les erreurs moyennes absolues et relatives (EMA et EMR) ainsi que les pourcentages de points inclus dans intervalle d'erreur (PIE) y sont donnés. D'après ce tableau, les prédictions de la masse volumique du givre sont moins performantes que celles de l'épaisseur. Les deux corrélations apportant les meilleurs résultats sont présentées sur les figures 3.7a et 3.7b. Les deux meilleures méthodes prédictives sont celles de Yang and Lee [92] et Hermes [23].

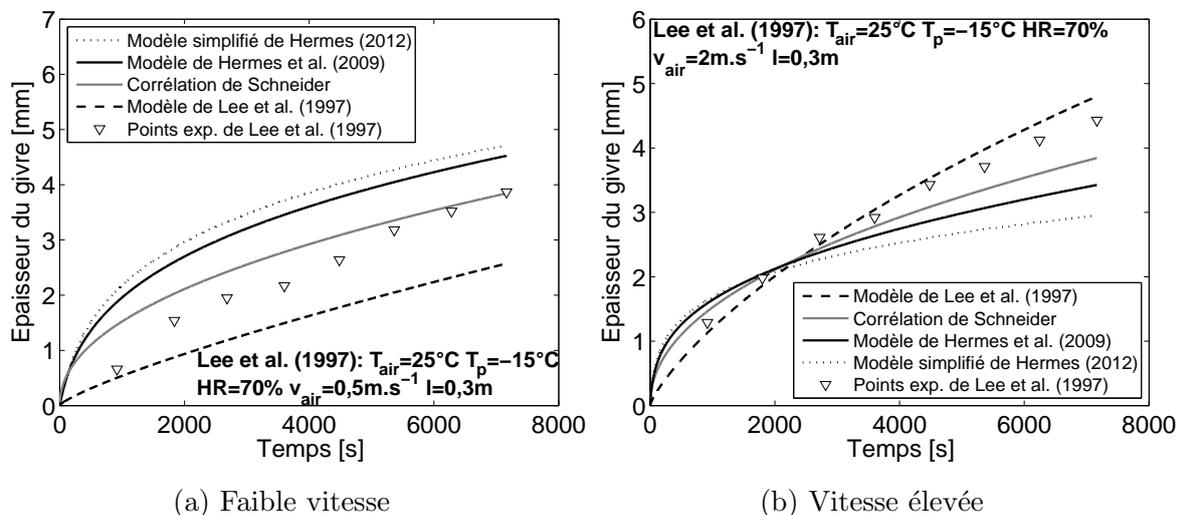
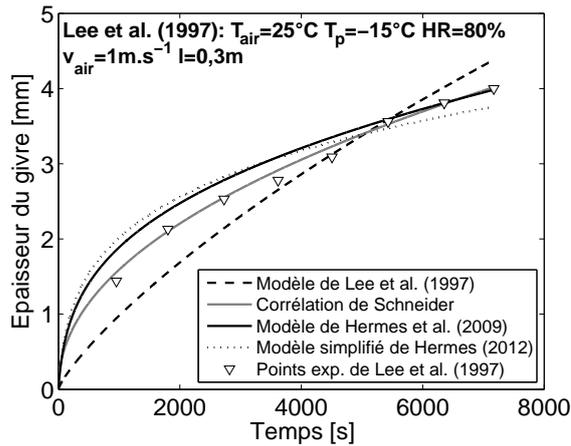
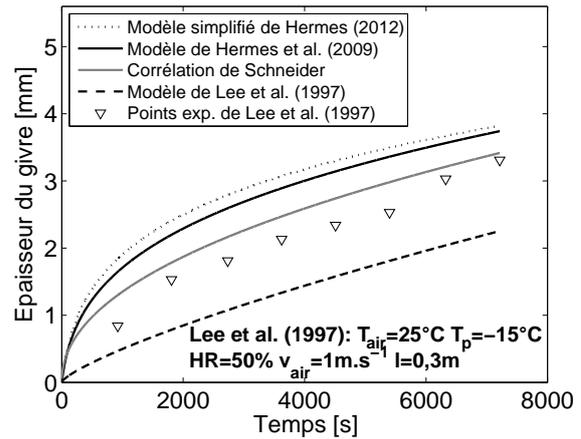


FIGURE 3.5 – Comparaison qualitative pour l'épaisseur du givre formé sur une plaque plane : cas de la vitesse



(a) Humidité relative élevée

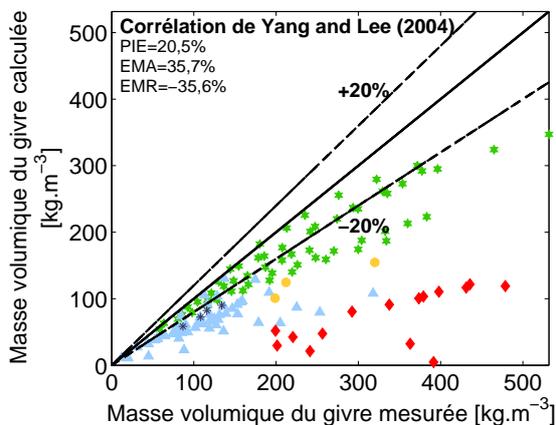


(b) Faible humidité relative

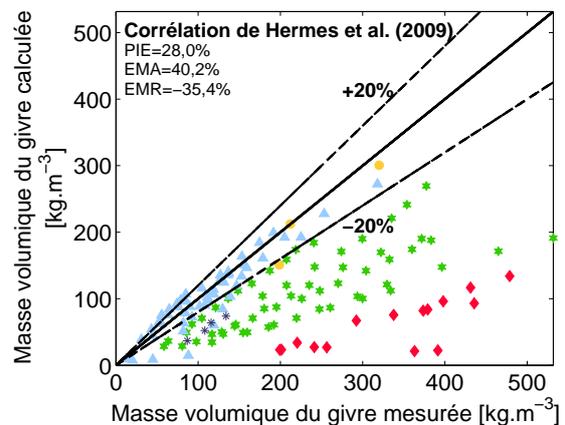
FIGURE 3.6 – Comparaison qualitative pour l'épaisseur du givre formé sur une plaque plane : cas de l'humidité relative

TABLEAU 3.4 – Résultats de l'étude quantitative pour la masse volumique du givre formé sur une plaque plane

Modèles	Statistiques		
	EMA	EMR	PIE
Hayashi et al. [21]	61,4 %	-24,8 %	14,5 %
Kandula [35]	87,9 %	7,0 %	10,6 %
Hosoda and Uzuhashi [26]	121,8 %	120,2 %	13,6 %
Hermes [23]	40,2 %	35,4 %	<b>28,0 %</b>
Yang and Lee [92]	35,7 %	35,6 %	<b>20,5 %</b>



(a) Corrélation de Yang and Lee [92]



(b) Corrélation de Hermes [23]

FIGURE 3.7 – Méthodes prédictives appliquées à la base de données de la masse volumique du givre formé sur une plaque plane (désignation des points dans le tableau 2.6)

La meilleure des méthodes prédictives ne peut prédire que 28 % des points de la base de données. Face à ces résultats peu satisfaisants, il a été décidé d'établir une nouvelle corrélation déterminée à partir des 149 points de données présentés auparavant. La corrélation est la suivante :

$$\rho_{\text{givre}} = 5,47 \cdot \text{Re}^{0,16} \cdot \text{Ja}^{0,29} \cdot \left( \frac{w_{\text{p,sat}}}{w_{\text{air}}} \right)^{0,61} \cdot t^{0,34} \quad (3.10)$$

où  $\text{Re} = \frac{\rho_{\text{air}} \cdot v_{\text{air}} \cdot l_{\text{plaque}}}{\mu_{\text{air}}}$  représente le nombre de Reynolds,  $\mu_{\text{air}}$  la viscosité dynamique de l'air et  $\text{Ja} = \frac{c_{\text{p,air}}(T_{\text{air}} - T_{\text{p}})}{\Delta h_{\text{sub}}(w_{\text{air}} - w_{\text{p,sat}})}$  le nombre de Jakob modifié.

Appliquée à la base de données, cette corrélation montre une meilleure prédiction des points expérimentaux (cf. figure 3.8). Cette corrélation est basée sur des nombres sans dimension tels que, le nombre de Reynolds, le nombre de Jakob modifié (inspiré de l'étude de Hermes et al. [24]), le rapport des humidités absolues ainsi que le temps. Ainsi, les paramètres principaux que sont la vitesse de l'air, la température de la surface froide et l'humidité relative sont pris en compte. Comme pour Yang and Lee [92] et contrairement à Hermes [23], le temps est à l'exposant 0,34, et est, par conséquent différent de 0,5 (la même corrélation, avec un exposant de 0,5 pour le temps prédit 37,1% de la base de données). Cela signifie que dans la plupart des études, la densification ne se fait pas uniquement par diffusion massique.

56,8 % des points de la base de données sont inclus dans la marge d'erreur de  $\pm 20\%$ . Cette corrélation permet de doubler le nombre de prédictions comprises dans cet intervalle.

En comparant les études sur l'épaisseur et la masse volumique, il peut être noté que la base de données de la masse volumique manque cruellement de points. En effet, des points supplémentaires sont nécessaires pour s'assurer que cette corrélation n'est pas trop impactée par les données d'un auteur en particulier.

Le paragraphe suivant présente les résultats de l'étude qualitative pour la masse volumique. Seuls les résultats concernant l'impact de la vitesse de l'air et de la température

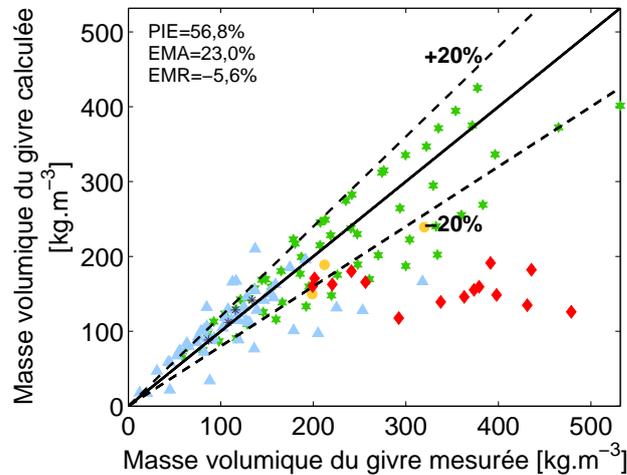


FIGURE 3.8 – Corrélation développée dans cette étude appliquée à la base de données de la masse volumique de givre formé sur une plaque plane

de la surface froide sont présentés. En effet, il n'a pas été possible de conclure quant à l'impact de l'humidité relative sur la masse volumique du givre en se basant uniquement sur l'étude paramétrique. Il ne semble donc pas pertinent de comparer les méthodes prédictives aux points expérimentaux sans connaître le phénomène physique. Suite aux conclusions précédentes, les corrélations de Hayashi et al. [21], Kandula [35] et Hosoda and Uzuhashi [26] n'ont pas été prises en compte étant donnée leur efficacité très limitée.

La figure 3.9 montre les prédictions des corrélations pour deux tests effectués avec des températures de surfaces différentes. Il est observé que les points expérimentaux sont mieux prédits pour les températures de surface froide faibles. Concernant les corrélations, celle de Hermes [23] semble être celle qui prédit avec le moins de précision les données expérimentales de Hayashi et al. [21]. Dans les deux cas, la corrélation développée au cours de cette thèse montre les meilleurs résultats.

La figure 3.10 présente le même travail pour deux vitesses différentes. Les résultats sont plus dispersés pour les vitesses élevées. De nouveau, la corrélation proposée est la plus performante.

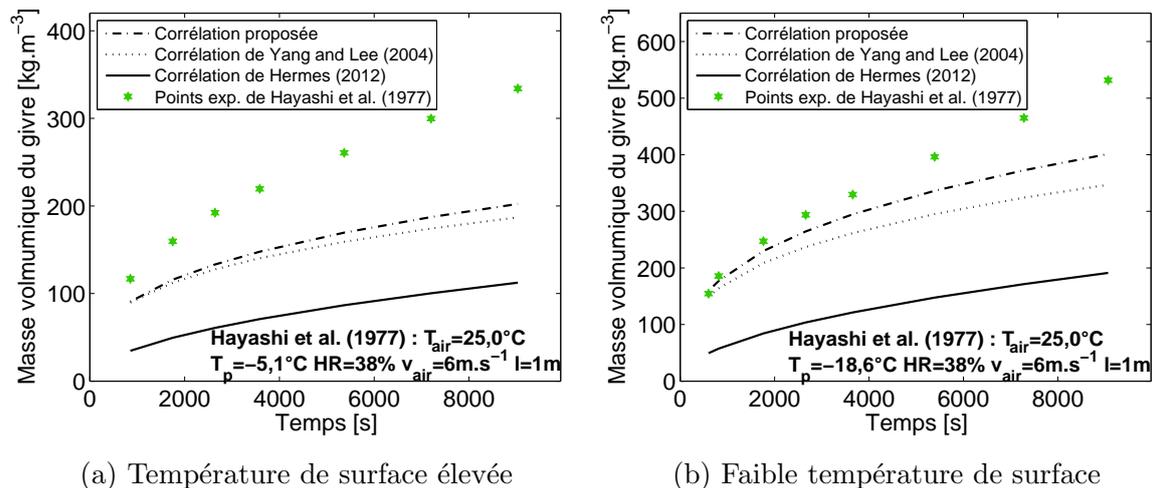


FIGURE 3.9 – Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur une plaque plane : cas de la température de surface froide

## Synthèse

Ce travail sur les modèles de prédiction de l'épaisseur et de la masse volumique a permis d'identifier les informations qui suivent. L'épaisseur du givre augmente :

- quand la vitesse augmente ;
- quand l'humidité relative augmente ;
- quand la température de la surface froide diminue.

La couche de givre est plus dense :

- quand la température de la surface froide est plus élevée ;
- quand la vitesse est plus élevée.

Aucune relation n'a pu être établie entre l'humidité relative et la masse volumique du givre à cause de données expérimentales contradictoires.

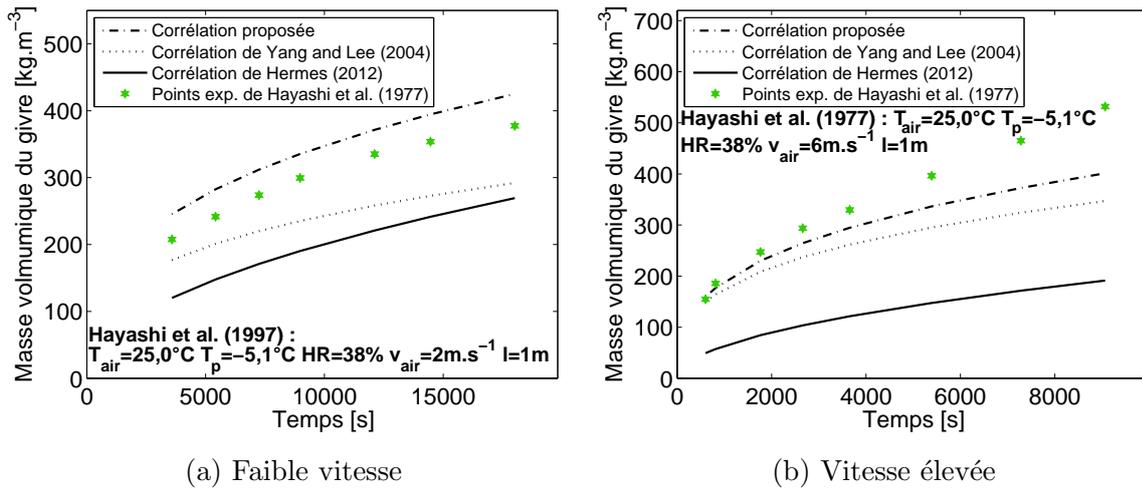


FIGURE 3.10 – Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur une plaque plane : cas de la vitesse d’air

Les corrélations et modèles disponibles dans la littérature peuvent prédire l’épaisseur de givre avec satisfaction mais certaines améliorations sont encore nécessaires pour obtenir des prédictions plus précises. Pour identifier les faiblesses des travaux analysés, il est proposé de s’intéresser à l’hypothèse principale effectuée par les auteurs de la meilleure méthode prédictive (Hermes et al. [24]) et de discuter des sources d’erreur probables.

Hermes et al. [24] utilisent une corrélation empirique pour calculer la masse volumique du givre. Cette corrélation a été développée à partir des données expérimentales des mêmes auteurs. L’application à la base de données a montré que la corrélation n’était efficace que pour la prédiction de leurs propres points mais que ceux des autres auteurs étaient sous-évalués. L’épaisseur étant directement liée à la masse volumique dans le modèle, il n’est pas étonnant que les résultats obtenus ne soient pas pleinement satisfaisants.

Les commentaires précédents permettent d’identifier une première source de divergence entre les résultats numériques et expérimentaux. Des biais entre mesures expérimentales et calculs numériques peuvent aussi être issus des données expérimentales. Des erreurs pouvant se produire durant les tests expérimentaux sont listées ci-dessous :

- les installations peuvent induire une température de plaque froide non-homogène. Cette non-uniformité peut être responsable de la formation d’un givre irrégulier. Les valeurs obtenues pour l’épaisseur et la masse volumique peuvent être moins précises qu’attendues. Les hypothèses d’une formation de givre unidimensionnelle utilisée dans les méthodes prédictives n’est plus adaptée ;
- la température de surface du givre est un paramètre difficile à mesurer. Elle est, la plupart du temps, mesurée avec des pyromètres monochromatiques. Ces pyromètres permettent d’obtenir la température en un point et non sur toute la surface. Si la distribution de la température n’est pas uniforme, la valeur mesurée n’est pas représentative ;
- le flux de chaleur échangé entre l’air et la surface froide et aussi difficile à mesurer et peut ainsi être à l’origine d’erreurs ;
- dans la plupart des études expérimentales, les caractéristiques de la surface (ru-

gosité et angle de contact) ne sont pas fournies. Cependant, ces paramètres ont été identifiés comme ayant un impact significatif sur la nucléation des premiers cristaux de givre. Comme ces paramètres sont rarement fournis, ils ne sont pas pris en compte dans les corrélations, ce qui peut aussi expliquer les différences entre résultats expérimentaux et numériques.

Malgré le nombre important d'études sur la formation du givre, des améliorations ont encore besoin d'être apportées. Historiquement, la majeure partie des études traitait essentiellement de l'épaisseur du givre, ce qui explique les meilleurs résultats sur ce sujet. L'épaisseur du givre est aussi plus simple à mesurer que la masse volumique. Les recherches à propos de la masse volumique sont plus récentes, et de ce fait, ont besoin d'être approfondies du point de vue des modèles et enrichies de données expérimentales. De manière générale, les articles traitant d'études expérimentales devraient mieux expliquer leurs procédures (comment démarrer les mesures en régime permanent sans que le givre ne se soit formé pendant l'établissement du régime par exemple). Pour les modèles, il a été montré que certaines méthodes étaient compliquées voire impossibles à reproduire. Ainsi, les auteurs devraient définir clairement chaque terme utilisé dans les équations et suggérer un test qui permette de valider la reproduction du modèle.

### 3.2.2 Plaques planes verticales

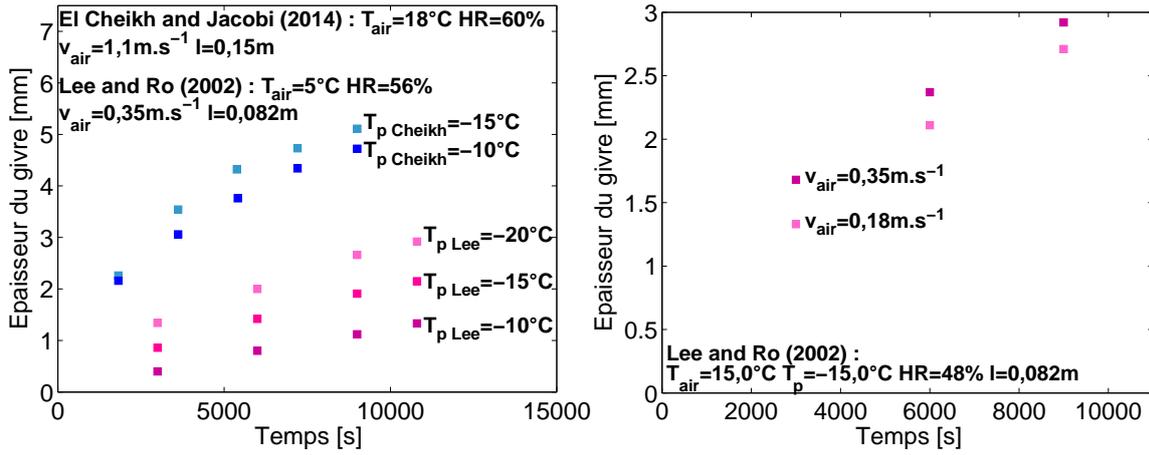
Une grande partie des études traite des plaques horizontales. Cependant, quelques auteurs ont essayé d'approcher des problématiques plus industrielles en travaillant sur des géométries plus complexes, comme les plaques planes disposées verticalement dans le conduit d'air humide. Cette partie présente un travail similaire à celui qui a été réalisé précédemment sur cette nouvelle géométrie. Les résultats sont également présentés dans l'article de Léoni et al. [52].

Pour le cas de la plaque plane verticale, les bases de données sont similaires à celles de la plaque plane horizontale. 88 points ont été recueillis pour l'épaisseur du givre et 122 pour sa masse volumique. Les points sont issus des travaux de Lee and Ro [47]; El Cheikh and Jacobi [16]; Janssen et al. [32]; Fossa and Tanda [17] et Yamashita et al. [91].

#### Étude paramétrique

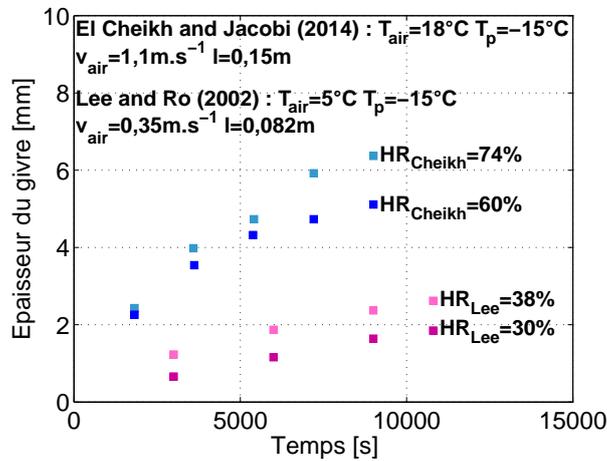
L'impact des paramètres environnementaux est étudié dans cette section. Le but est d'évaluer l'influence de la température de la surface froide, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air sur la formation et le développement du givre sur une plaque plane verticale, et de comparer ces résultats à ceux obtenus pour la plaque plane horizontale. La figure 3.11 montre que l'épaisseur du givre augmente avec les faibles températures de surface froide, les vitesses et humidités relatives élevées. Les mêmes observations avaient été faites pour la plaque horizontale.

Les résultats obtenus pour la masse volumique du givre sont présentés sur la figure 3.12. Contrairement à l'épaisseur du givre, la masse volumique diminue avec les faibles températures de surface froide. Concernant l'impact de la vitesse de l'air, la masse volumique suit la même évolution que l'épaisseur. La figure 3.12c apporte des informations supplémentaires. En effet, les résultats obtenus pour la plaque plane ne permettaient pas de conclure quant à l'impact de l'humidité relative sur la masse volumique du givre. Pour la plaque verticale, les résultats obtenus par les deux auteurs (Lee and Ro [47] et



(a) Température de surface froide

(b) Vitesse de l'air



(c) Humidité relative

FIGURE 3.11 – Impact des paramètres environnementaux sur l'épaisseur du givre formé sur une plaque verticale

El Cheikh and Jacobi [16]) sont en accords. La masse volumique du givre diminue avec les faibles humidités relatives.

### Études quantitatives et qualitatives

Dans cette section, des études quantitatives et qualitatives sont réalisées sur l'épaisseur et la masse volumique du givre. Les bases de données utilisées sont celles présentées dans les Tableaux 2.7 et 2.8. Les méthodes prédictives testées sont celles qui ont été utilisées pour les plaques horizontales. Ce travail permet de voir si ces méthodes prédictives réalisées pour des plaques planes horizontales peuvent être étendues à des plaques planes verticales.

Les résultats obtenus pour l'épaisseur sont présentés en premier et sont suivis de ceux pour la masse volumique.

Pour la comparaison quantitative, les meilleurs modèles et corrélations déterminés dans la section précédente (plaques planes horizontales) sont testés. La figure 3.13 présente la quantité de points de données inclus dans l'intervalle de  $\pm 20\%$ . Les graphes montrent que ces deux méthodes de prédiction de l'épaisseur du givre sur une plaque plane

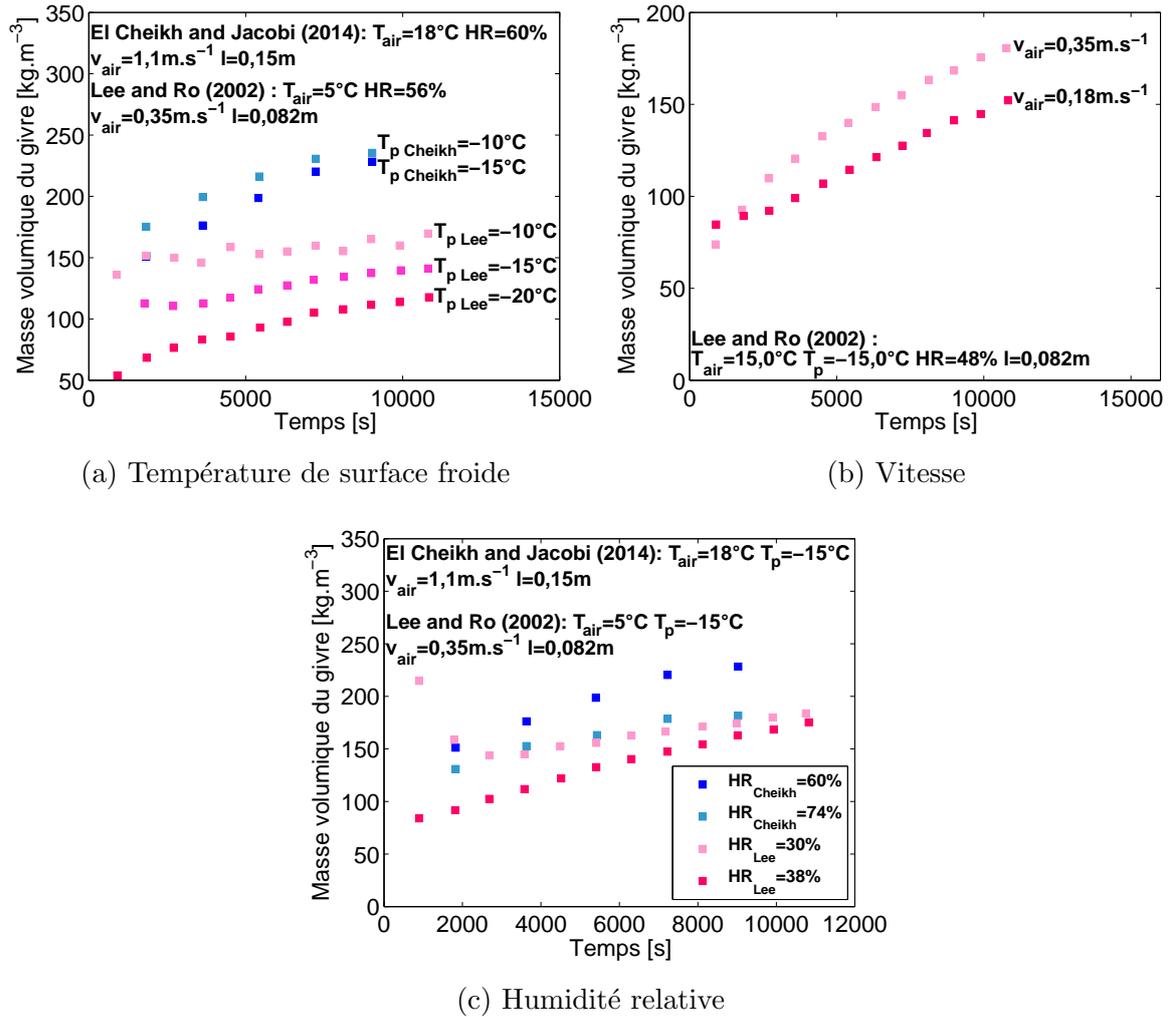


FIGURE 3.12 – Impact des paramètres environnementaux sur la masse volumique du givre formé sur une plaque verticale

horizontale ne peuvent être appliquées au cas d'une plaque plane verticale. En effet, les pourcentages de prédiction sont respectivement de 4,4 % et 2,2 %.

Pour la comparaison qualitative, les méthodes prédictives sont appliquées à différentes conditions environnementales. La figure 3.14 montre les résultats obtenus pour des variations de la température de surface froide et de l'humidité relative. La comparaison des figures 3.14a et 3.14b montre que les méthodes prédictives sont meilleures quand l'humidité relative est faible. Concernant la température de surface froide, les méthodes prédictives sont éloignées des résultats expérimentaux. Comme illustré dans le paragraphe précédent, les méthodes de prédiction de l'épaisseur du givre ne sont pas adaptées aux plaques verticales. Les mêmes conclusions ont été observées pour la vitesse de l'air à partir des résultats expérimentaux de Lee and Ro [47].

Cette section présente les résultats des études quantitatives et qualitatives pour la masse volumique du givre.

L'utilisation de la corrélation développée au cours de cette étude (Équation (3.10)) permet d'obtenir des résultats pour l'étude quantitative plus satisfaisants pour la masse volumique que pour l'épaisseur. En effet, la figure 3.15 montre que 36,1 % des points de données sont compris dans l'intervalle des  $\pm 20$  %. Cependant, cette corrélation

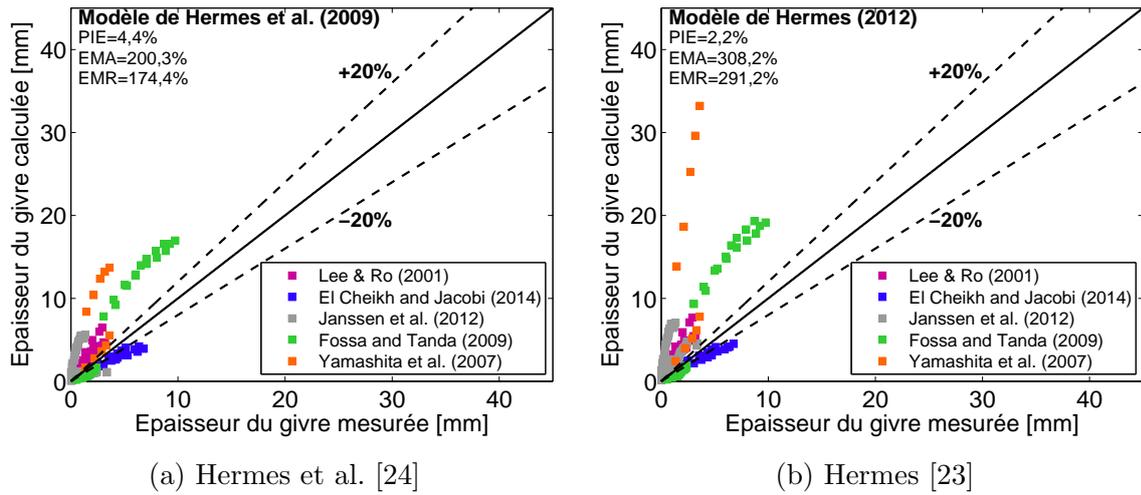


FIGURE 3.13 – Méthodes prédictives appliquées à la base de données de l'épaisseur du givre formé sur une plaque verticale (désignation des points dans le tableau 2.7)

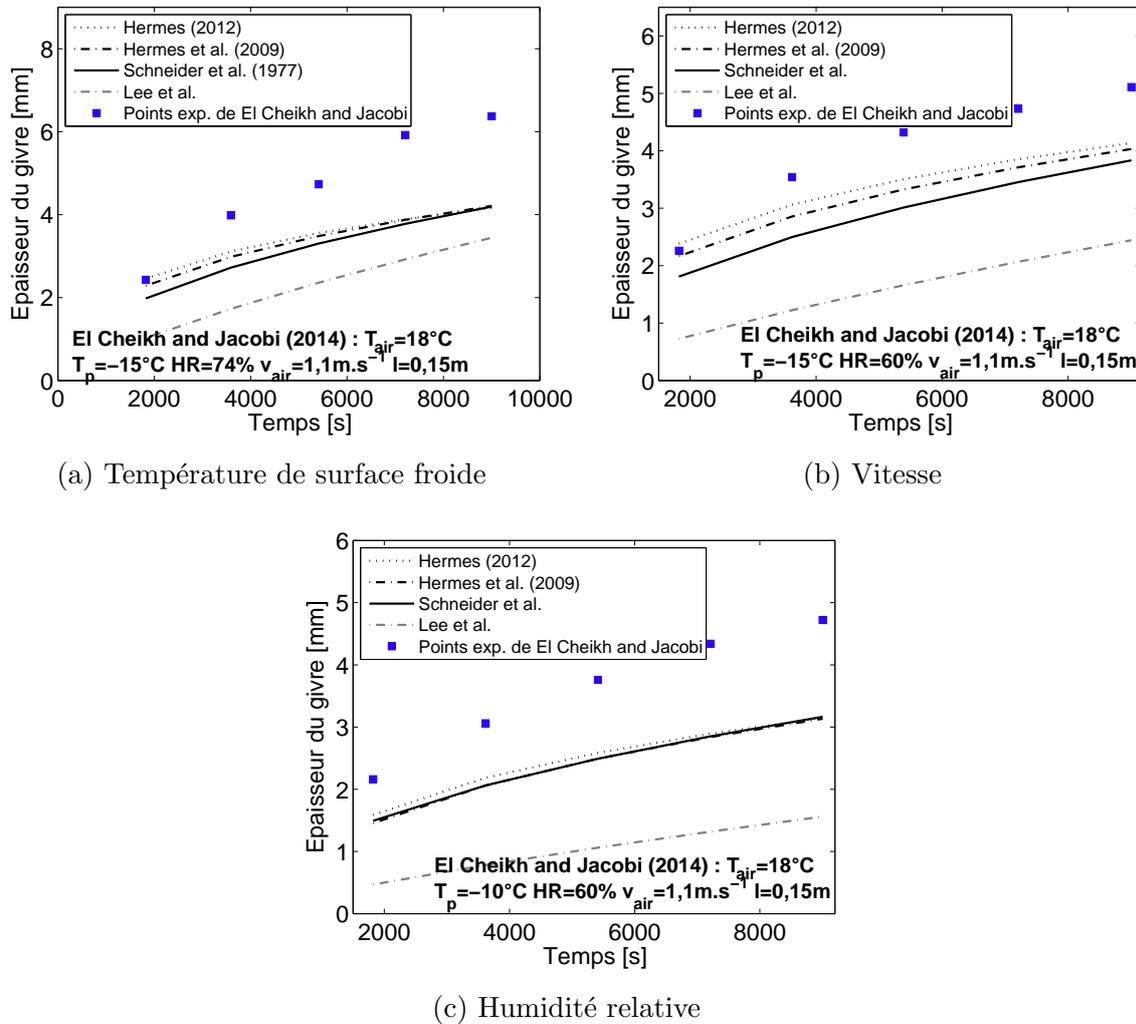


FIGURE 3.14 – Comparaison qualitative pour l'épaisseur du givre formé sur une plaque verticale

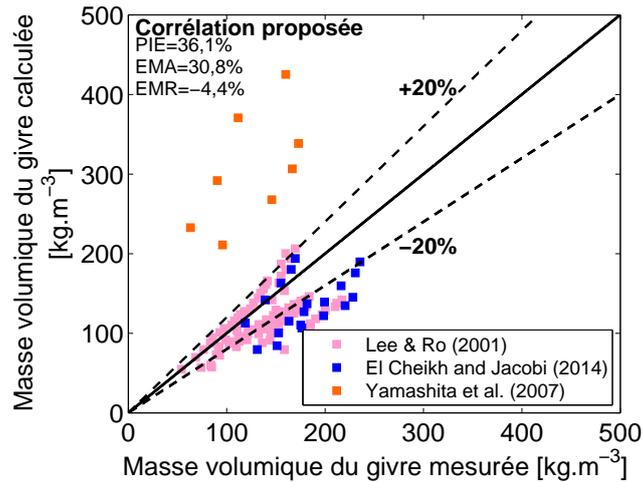


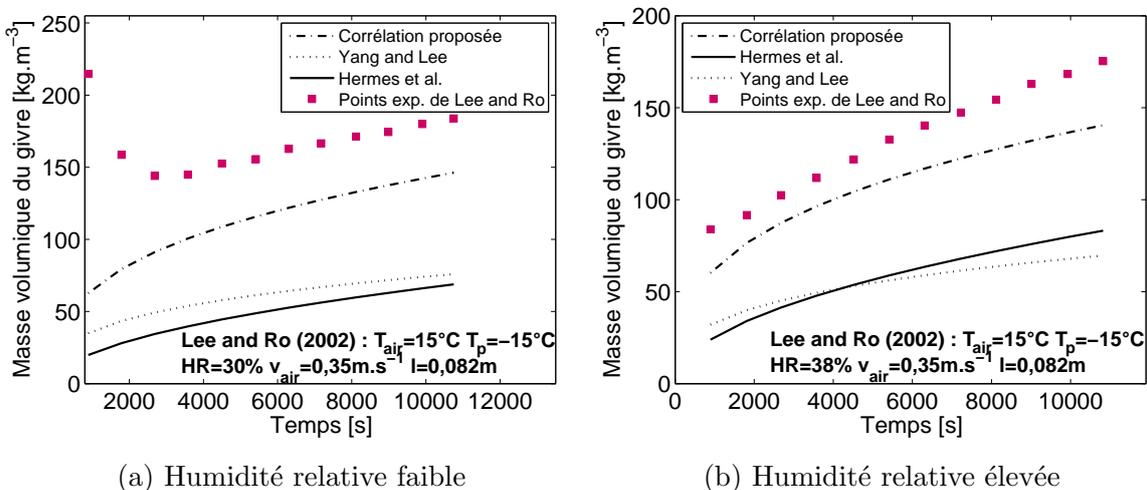
FIGURE 3.15 – Corrélation développée dans cette étude appliquée à la base de données de la masse volumique du givre formé sur une plaque verticale (désignation des points dans le tableau 2.8)

n'est pas aussi appropriée pour les plaques verticales qu'elle ne l'est pour les plaques horizontales.

Des tests supplémentaires sur des plaques planes verticales sont cependant nécessaires pour trouver une relation permettant de calculer la masse volumique du givre et renforcer cette corrélation.

Les résultats de la comparaison qualitative pour la masse volumique du givre sont montrés sur les figures 3.16 et 3.17.

La figure 3.16 présente les résultats obtenus en appliquant les méthodes prédictives aux points de données de Lee and Ro [47] à deux humidités relatives différentes. Seule la corrélation développée lors de cette étude fournit des résultats satisfaisants. En effet, les corrélations de Hermes [23] et Yang and Lee [92] ne sont pas adaptées à des plaques verticales. Aucune prédominance de l'impact d'humidités relatives faibles ou élevées n'est constaté. Les résultats semblent un petit peu moins dispersés pour les humidités



(a) Humidité relative faible

(b) Humidité relative élevée

FIGURE 3.16 – Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur une plaque verticale : cas de l'humidité relative

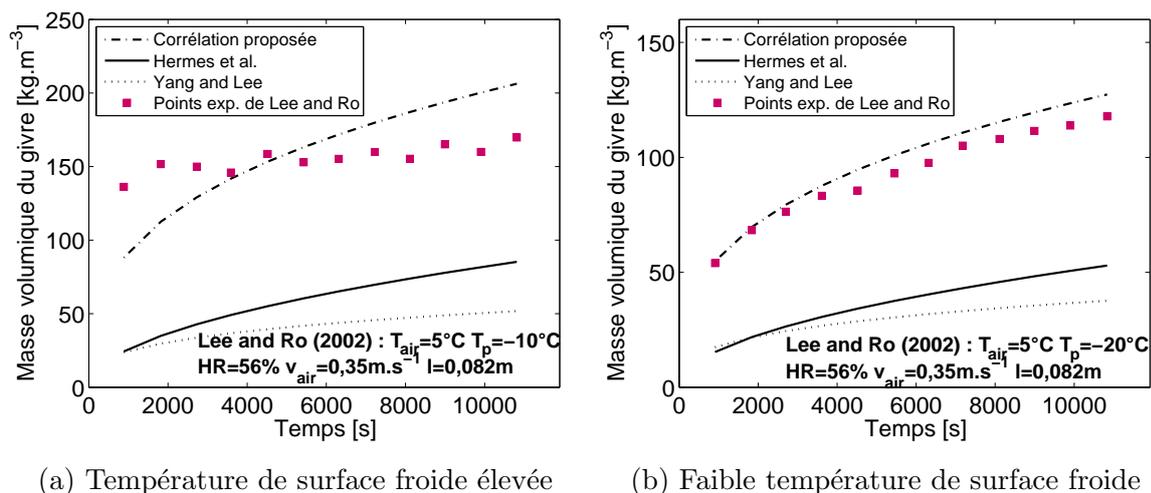


FIGURE 3.17 – Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur une plaque verticale : cas de la température de surface froide

relatives élevées. Cependant, les deux humidités testées sont trop proches pour apporter de solides conclusions.

La figure 3.17 montre l'impact de la température de la surface froide sur la prédiction de la masse volumique. Une fois de plus, la corrélation proposée dans cette étude permet de mieux prédire les points expérimentaux. Les prédictions semblent être meilleures pour les températures de plaque plus faibles.

## Synthèse

Le travail sur la base de données des points expérimentaux relevés sur une plaque plane verticale a montré que l'épaisseur du givre augmente (les mêmes conclusions que pour la plaque plane horizontale ont été observées) :

- quand l'humidité relative est élevée ;
- quand la température de surface froide est faible.

La masse volumique augmente :

- quand la température de la surface froide augmente ;
- quand la vitesse augmente ;
- quand l'humidité relative diminue (cette observation est en opposition avec les résultats de Hermes et al. [24] obtenus en première partie).

Contrairement au cas des plaques horizontales, les méthodes prédictives utilisées pour prédire l'épaisseur du givre ne peuvent être utilisées. Certaines hypothèses de Hermes et al. [24] peuvent l'expliquer. Pour le cas de la plaque plane horizontale, les auteurs supposent que la couche de givre est uniforme le long de la plaque et que les processus de diffusion de masse et de chaleur dans la couche sont unidimensionnels. Ces hypothèses ne sont pas adaptées aux plaques verticales à cause de l'effet de la gravité. En effet, quand les conditions environnementales menant à la condensation puis à la solidification sont réunies, les gouttelettes d'eau peuvent subir les effets de la gravité et s'écouler le long de la paroi, impliquant la formation d'une couche de givre non-uniforme le long de la plaque. De ce fait, la composante verticale du flux d'air participant à la densification du givre ne doit pas être négligée et les données expérimentales doivent être fonction de la distance au bord d'attaque de la plaque.

La formation du givre sur une plaque plane verticale nécessite plus de recherches. En effet, cette configuration est plus proche des problématiques industrielles que la plaque plane horizontale. La plupart du temps, les ailettes des échangeurs de chaleur sont positionnées verticalement, ce qui implique de tenir compte des effets de gravité. Des études expérimentales supplémentaires sont nécessaires afin de compléter les bases de données déjà existantes. Une comparaison entre les résultats des plaques verticales et horizontales mènerait à une meilleure identification de l'impact de la gravité. Il serait aussi intéressant de travailler sur différents angles d'orientation de la plaque. Cela permettrait de se rapprocher des configurations d'ailettes persiennes et d'observer graduellement l'impact de la gravité.

### 3.2.3 Plaques parallèles

Dans cette nouvelle partie, un travail équivalent au précédent est proposé pour des plaques planes parallèles disposées horizontalement. Le travail sur deux plaques parallèles permet de représenter le comportement de deux ailettes d'un échangeur. La base de données pour l'épaisseur du givre, proposée dans le tableau 2.9 est composée de 24 points issus des travaux de Ostin and Andersson [68]. Pour la masse volumique, la base de données (cf. tableau 2.10) est composée de 26 points collectés chez deux auteurs : Ostin and Andersson [68] et Nascimento et al. [63]. Les deux auteurs ont réalisé leurs tests expérimentaux sur des plaques planes horizontales (cf. figure 3.18). Ostin and Andersson [68] n'ont pas fourni dans leur article la distance entre les deux plaques. La seule information donnée est que la section de passage de l'air peut être modifiée. Nascimento et al. [63] ont aussi travaillé sur des sections variables. La distance entre les plaques pouvait varier de 8,4 mm à 19,0 mm.

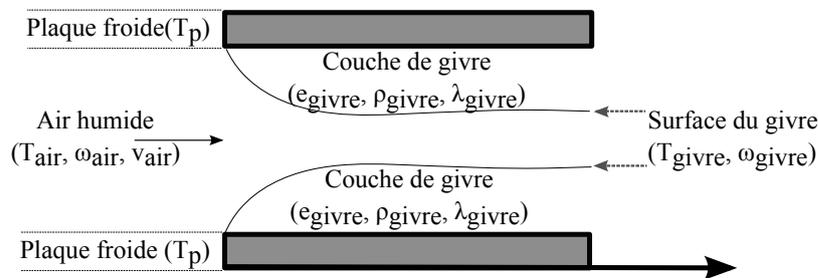
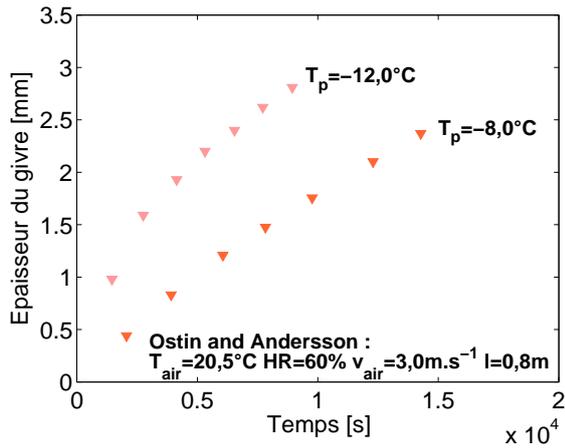


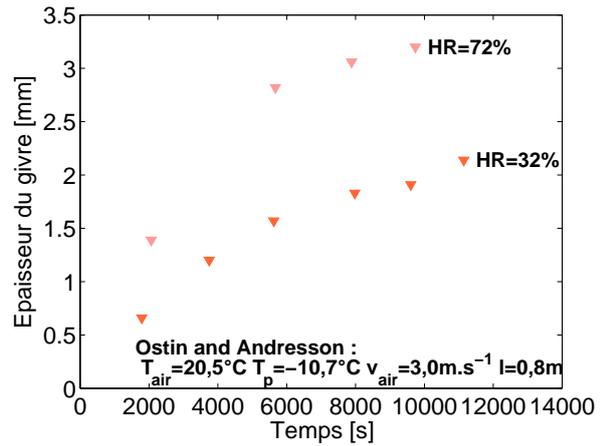
FIGURE 3.18 – Développement du givre sur deux plaques parallèles

### Étude paramétrique

La figure 3.19 présente l'impact de la température de surface froide et de l'humidité relative sur l'épaisseur du givre. Comme pour les précédentes études paramétriques, la couche de givre est plus épaisse avec les faibles températures de surface froide et les humidités relatives élevées. L'impact de la température de surface froide est le même pour les trois géométries étudiées (plaque horizontale seule - plaque verticale seule et plaques parallèles horizontales). Pour le paramètre d'humidité relative, les conclusions ne sont pas très solides. En effet, en excluant les résultats expérimentaux de Wang et al. [86], il peut être considéré que les plaques planes horizontales simple et double présentent un comportement similaire (l'épaisseur augmente avec l'humidité relative). Des conclusions contraires sont observées pour la plaque verticale. L'impact de la vitesse n'a pas pu être étudié pour cette géométrie à cause du manque de points expérimentaux.



(a) Température de surface froide



(b) Humidité relative

FIGURE 3.19 – Impact des paramètres environnementaux sur l'épaisseur du givre formé sur deux plaques parallèles

La figure 3.20 montre l'impact de la vitesse sur la masse volumique du givre. Les résultats sont en accord avec les conclusions obtenues avec les plaques simples horizontale et verticale : la masse volumique augmente avec la vitesse de l'air. Des études similaires n'ont pas pu être réalisées pour l'impact de la température de surface froide et de l'humidité relative parce que les données expérimentales de Nascimento et al. [63] ne pouvaient pas être utilisées pour ce type de test. En effet, le nombre de points de données est faible et les conditions de test très variables ce qui rend les comparaisons deux à deux difficiles.

### Études quantitatives et qualitatives

Ce paragraphe présente les résultats des études quantitatives et qualitatives pour l'épaisseur et la masse volumique réalisées pour les deux plaques planes parallèles.

La première partie est consacrée aux résultats pour l'épaisseur du givre. La figure 3.21 présente la quantité de points inclus dans l'intervalle des  $\pm 20\%$  pour les deux meilleures

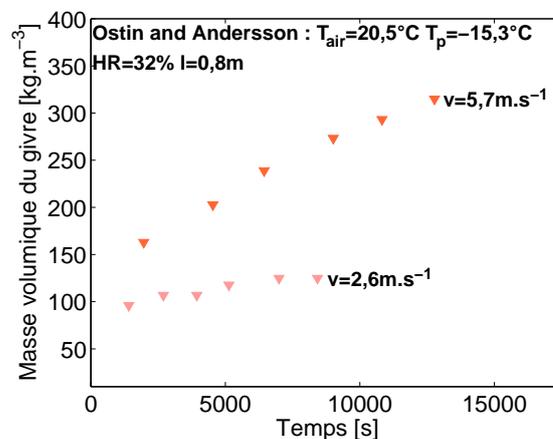
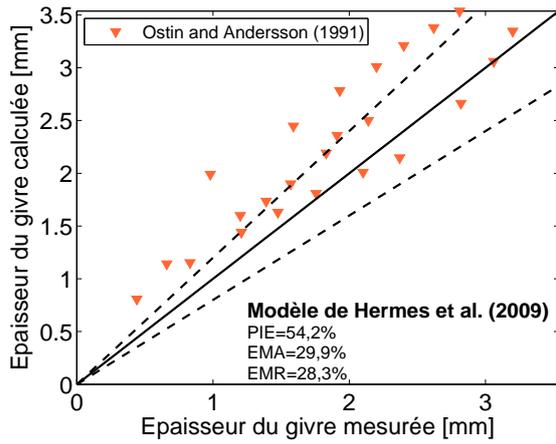
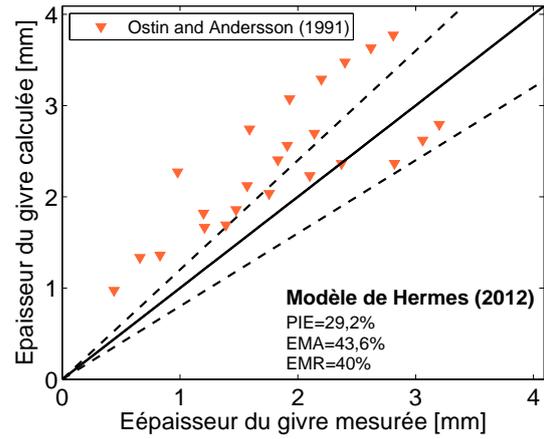


FIGURE 3.20 – Impact de la vitesse de l'air sur la masse volumique du givre formé sur deux plaques parallèles



(a) Hermes et al. [24]



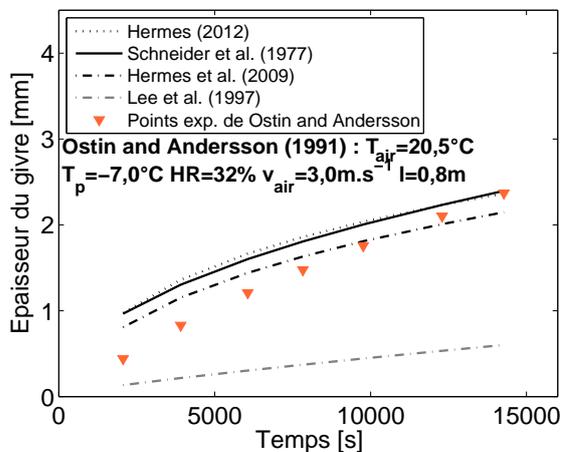
(b) Hermes [23]

FIGURE 3.21 – Méthodes prédictives appliquées à la base de données de l'épaisseur du givre formé sur deux plaques parallèles (désignation des points dans le tableau 2.9)

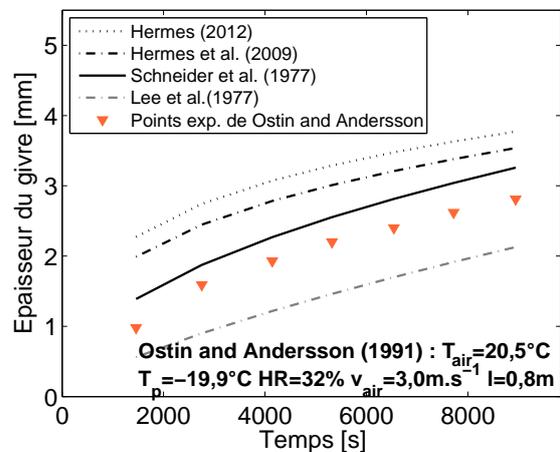
méthodes prédictives : Hermes et al. [24] (figure 3.21a) et Hermes [23] (figure 3.21b). Les résultats de l'étude quantitative sont satisfaisants. Les pourcentages de prédiction sont de 54,2 % et 29,2 % respectivement. Le modèle de prédiction de l'épaisseur de Hermes et al. [24] pour les plaques planes horizontales (seules) peut être étendu aux plaques parallèles horizontales.

La figure 3.22 présente les résultats des comparaisons qualitatives pour l'épaisseur du givre : les différentes corrélations sont appliquées aux points de Ostin and Andersson [68]. Comme pour la plaque plane verticale, la meilleure corrélation est celle de Hermes et al. [24] et les résultats sont plus dispersés pour les faibles températures de surface froide. Aucun test n'a été mené pour la vitesse de l'air ou l'humidité relative par manque de points de données.

Les résultats de l'étude quantitative obtenus pour la masse volumique du givre sont présentés sur la figure 3.23. Les résultats sont seulement présentés pour les corrélations



(a) Température de surface froide élevée



(b) Température de surface froide faible

FIGURE 3.22 – Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur deux plaques parallèles : cas de la température de surface froide

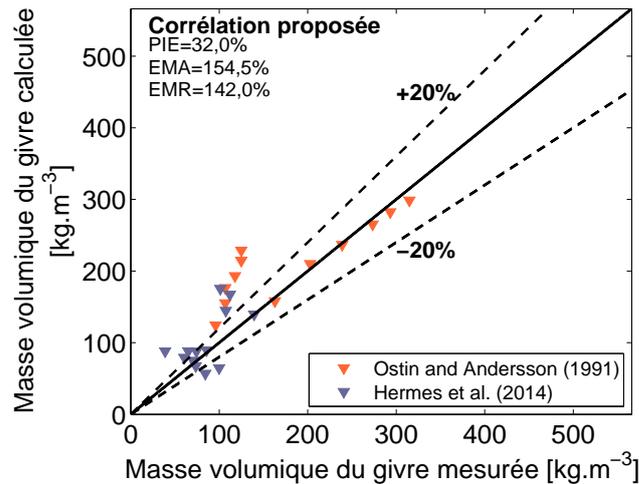
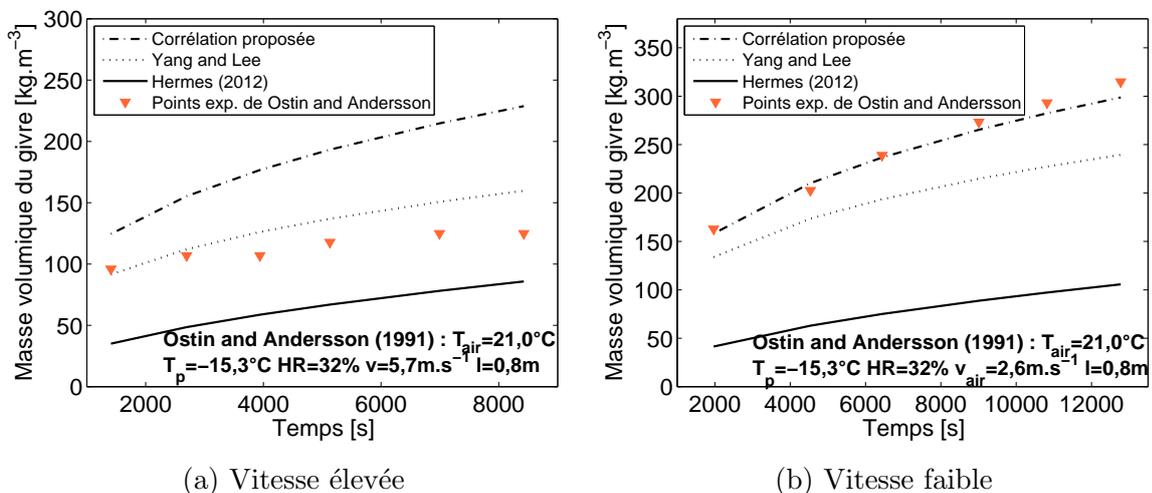


FIGURE 3.23 – Corrélation développée dans cette étude appliquée à la base de données de la masse volumique du givre formé sur deux plaques parallèles (désignation des points dans le tableau 2.10)

des auteurs qui présentent les meilleures performances. Les pourcentages de prédiction des corrélations de Yang and Lee [92] et de Hermes et al. [25] sont respectivement de 28,0 % et 12,0 %. La corrélation développée dans ce travail de thèse (cf. Équation (3.10)) donne des résultats peu satisfaisants : le pourcentage de points inclus dans l'intervalle de  $\pm 20$  % est de 32 % (cf. figure 3.23). En effet, seulement un tiers des points de données peut être prédit. De plus, les EMA et EMR sont très élevées. La corrélation nécessite d'être améliorée pour mieux prédire la formation du givre sur ce type de géométrie.

Les résultats de la comparaison qualitative sont fournis pour le cas de la vitesse (cf. figure 3.24). Les résultats sont plus dispersés pour la masse volumique que pour l'épaisseur du givre. La nouvelle corrélation présente de meilleurs résultats pour les vitesses d'air faibles. La figure montre aussi que la masse volumique du givre diminue avec l'augmentation de la vitesse. L'observation contraire avait été faite pour le cas de la



(a) Vitesse élevée

(b) Vitesse faible

FIGURE 3.24 – Comparaison qualitative pour la masse volumique du givre formé sur deux plaques parallèles : cas de la vitesse de l'air

plaque horizontale seule. La vitesse conduit à deux résultats opposés. En effet, le coefficient de transfert convectif est plus élevé quand la vitesse est importante, ce qui augmente la température de surface de la plaque. Quand la température de surface est plus élevée, la quantité de givre déposé est plus faible. Cependant, une vitesse élevée mène aussi à un coefficient de transfert de masse plus important ce qui stimule le dépôt de givre. Ainsi, la vitesse mène à deux phénomènes opposés : un premier qui inhibe la formation de givre et le second qui la stimule. Des conditions environnementales différentes s'ajoutent au fait que la géométrie diffère, c'est pourquoi les résultats obtenus sont différents.

## Synthèse

Le faible nombre d'études sur les plaques parallèles ne permet pas d'apporter de solides conclusions. Des comportements similaires à ceux détectés pour d'autres géométries ont été observés : l'épaisseur du givre augmente avec les faibles températures de surface froide. Le modèle de Hermes et al. [24] semble être la meilleure méthode prédictive. Les résultats ne sont pas aussi satisfaisants que pour les plaques planes horizontales seules parce que la seconde plaque influence la formation du givre et les couches limites. En effet, étant donné la proximité des deux plaques, les couches limites thermiques et dynamiques se trouvent impactées. Dans le cas d'une plaque seule, un écoulement libre sans aucune perturbation est considéré.

### 3.3 Revue bibliographique des méthodes de prédiction de la conductivité thermique du givre

La conductivité thermique du givre est une propriété thermophysique essentielle pour caractériser les échanges en présence de givre. Bien qu'ayant fait l'objet de moins d'études dans la littérature que l'épaisseur et la masse volumique, elle a suscité la curiosité de quelques scientifiques.

Une des premières études a été menée par Yonko and Sepsy [95] en 1967. Les auteurs proposent une corrélation empirique pour la conductivité du givre exprimée par un polynôme du second degré, fonction uniquement de la masse volumique. Cette corrélation a été utilisée dans les modèles de Sami and Duong [74] (pour les débuts de test : de 0 à 30 minutes) et Tao et al. [80]. Les travaux de Yonko and Sepsy [95] ont aussi permis à Ostin and Andersson [68] de développer leur propre corrélation basée sur un polynôme du second degré. L'écart observé entre les résultats expérimentaux et les données calculées a montré que la masse volumique seule ne suffisait pas à prédire avec précision la conductivité du givre.

La même année, Pitman and Zuckerman [70] ont proposé de faire le lien entre la morphologie du givre (qui dépend de la température de la surface froide) et sa conductivité. Ils supposent que les cristaux de givre se présentent sous forme de sphères connectées les unes aux autres par des cylindres de glace. La corrélation semi-empirique développée est à la fois fonction de la masse volumique et de la température de la surface froide. Les résultats fournis par la corrélation ont été comparés aux résultats expérimentaux relevés à des températures de parois de -88, -27 et -5 °C. La comparaison de la cartographie de Kobayashi [40] avec l'hypothèse du givre sous forme de sphères/cylindres de glace (cf. figure 2.4) a permis de montrer que la morphologie supposée par les auteurs

n'était pas la plus réaliste (pour les températures de  $-27$  et  $-5$  °C, les cristaux de givre étant plutôt sous forme de fourreaux et de plaques respectivement).

À cette même époque, un autre groupe de chercheurs a identifié que la température de la surface froide et la masse volumique du givre étaient des paramètres essentiels pour la prédiction de la conductivité du givre. Brian et al. [7] proposent une nouvelle corrélation empirique (basée sur leurs résultats expérimentaux). Cette corrélation sera utilisée par Cheng and Cheng [10] et Sami and Duong [74] (pour des temps supérieurs à 30 minutes) dans leurs modèles de formation du givre.

Quelques années après, Pitman and Zuckerman [70], Biguria and Wenzel [5] ont développé un modèle théorique de prédiction de la conductivité thermique basée sur la morphologie du givre, en prenant en compte les différents types de cristaux définis dans l'étude de Kobayashi [40] (cf. figure 2.4). Tout comme Pitman and Zuckerman [70] et Brian et al. [7], les auteurs ont identifié que la masse volumique à elle seule ne permettait pas de prédire de manière satisfaisante la conductivité du givre. Suite à ces conclusions, Pitman and Zuckerman [70] ont inclus la vitesse d'air et l'humidité dans les paramètres de leur corrélation. Les données expérimentales ont été prédites à  $\pm 25$  %.

Par la suite, Dietsch [14] a développé un modèle semi-empirique de prédiction de la conductivité en considérant deux structures de givre différentes :

- Un givre peu dense composé d'une série de cristaux cylindriques et sphériques qui implique des conductivités plus faibles (ce qui rappelle l'hypothèse de Pitman and Zuckerman [70]) ;
- Un givre poreux composé de plaques de glace denses provoquant des conductivités plus élevées.

Les auteurs proposent alors de lier la masse volumique et la conductivité à la porosité du givre. En découle une corrélation qui dépend de la porosité du givre, des conductivités de l'air et de la glace ainsi que de la température de la surface froide.

Auracher [1] propose de décomposer la conductivité du givre en deux phénomènes physiques : la diffusion thermique et la diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans la couche de givre. Il choisit donc de séparer les transferts de masse et de chaleur. En 1992, Mao et al. [54] ont proposé une corrélation adimensionnée dépendant de l'épaisseur du givre, de la vitesse, de l'humidité, de la température de l'air, de la température de la paroi froide et du nombre de Fourier. Cette corrélation a ensuite été modifiée par Mao et al. [55] et Yang and Lee [92] qui ont conservé les paramètres principaux.

Un modèle plus complexe est proposé par Sahin [73]. Les cristaux sont considérés sous forme de colonnes. La comparaison des résultats obtenus avec la corrélation et des données expérimentales a montré que la formulation de la conductivité proposée n'était pas adaptée pour des températures de surfaces froides allant de  $-19$  à  $-10$  °C. En effet, à cette température, les cristaux observés sont sous forme de dendrites et de plaques (cf. figure 2.4). Suite à ces résultats, Na and Webb [62] ont proposé une corrélation empirique variant selon trois types de cristaux (donc trois niveaux de température) :

- les cristaux en forme de colonnes : de  $-10$  à  $-4$  °C ;
- les cristaux en forme de plaques : de  $-21$  à  $-10$  °C ;
- les cristaux en forme de colonnes : en dessous de  $-21$  °C.

Les différentes corrélations obtenues sont fonction de la masse volumique, de la température de la surface froide et des conductivités thermiques obtenues à partir des associations thermiques parallèles et séries (déjà proposées par Auracher [1]).

Le détail des corrélations principales présentées ci-dessus est disponible dans le tableau 3.5.

TABLEAU 3.5 – Corrélations de la littérature pour la prédiction de la conductivité thermique du givre

Auteurs	Corrélations
Yonko and Sepsy [95]	$\lambda_{\text{givre}} = 0,0140 + 0,00668 \rho_{\text{givre}} + 0,000175 \rho_{\text{givre}}^2$
Pitman and Zuckerman [70]	$\frac{1}{\lambda_{\text{givre}}} = \frac{1-r}{(\lambda_g - \lambda_{\text{air}})S + \lambda_{\text{air}}} + \frac{4 \ln(A+1)/(A-1)}{2A\pi r(\lambda_g - \lambda_{\text{air}})}$ $A = \left(1 + \frac{4}{\pi[(\lambda_g/\lambda_{\text{air}}) - 1]r^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ avec $r$ le rayon des cristaux sphériques
Brian et al. [7]	$\lambda_{\text{givre}} = 2,401 \times 10^{-5} T_p^{1,272} + 3,921 \times 10^{-8} \rho_{\text{givre}} T_p^{1,74}$
Biguria and Wenzel [5]	$\lambda_{\text{givre}} = -0,23376438 + 1,0342876 \times 10^{-4} T_p^{1,3} + 18,007637 w_{\text{air}} + 3,5719847 \times 10^{-4} v_{\text{air}} + 6,2047771 \times 10^{-4} t - 8,9475394 \times 10^{-5} t^2 + 1,0182528 \times 10^{-7} t^3 + 2,6084586 \times 10^{-8} t^4 - 4,2023418 \times 10^{-2} w_{\text{air}} T_p + 0,11349924 t \cdot w_{\text{air}} + 1,0859212 \times 10^{-2} bi + 2,1232614 \times 10^{-5} v_{\text{air}} \cdot t - 2,6856724 \times 10^{-5} T_p \cdot bi$
Auracher [1]	$\lambda_{\text{givre}} = \lambda_t + \lambda_m$ $\frac{1}{\lambda_t} = \frac{0,42(0,1 + 0,995\rho_{\text{givre}})}{\lambda_{\text{série}}} + \frac{1 - 0,42(0,1 + 0,995\rho_{\text{givre}})}{\lambda_{\text{parallèle}}}$ $\lambda_m = 1,958 \times 10^{-9} h_{\text{sub}} \left(\frac{\rho_g - \rho_{\text{givre}}}{\rho_g - 0,58\rho_{\text{givre}}}\right) \exp\left(24,02 - \frac{6145}{T_p}\right) \times \frac{p_0}{p_{\text{atm}}} \left(\frac{T_p}{T_0}\right)^{-1,28}$
Mao et al. [54]	$\frac{\lambda_{\text{givre}}}{\lambda_g} = 6,534 \times 10^{-4} e_{\text{givre}}^{-0,048} w_{\text{air}}^{0,004} \left(\frac{T_{\text{pt}} - T_p}{T_{\text{air}} - T_{\text{givre}}}\right)^{0,737} \text{Re}^{0,375} \text{Fo}^{0,18}$
Na and Webb [62]	$\lambda_{\text{givre}} = \xi_{\text{givre}} \lambda_{\text{parallèle}} + (1 - \xi_{\text{givre}}) \lambda_{\text{série}}$ $\xi_{\text{givre}} = 0,283 + \exp(-0,020 \rho_{\text{givre}}) \quad -10 < T_p < -4^\circ\text{C}$ $\xi_{\text{givre}} = 0,140 + 0,919 \exp(-0,0142 \rho_{\text{givre}}) \quad -21 < T_p < -10^\circ\text{C}$ $\xi_{\text{givre}} = 0,0107 + 0,419 \exp(-0,00424 \rho_{\text{givre}}) \quad T_p = -21^\circ\text{C}$

Une étude très complète proposée par Irigorri et al. [29] regroupe la majorité des corrélations et modèles disponibles dans la littérature (jusqu'à 2004). Chaque corrélation est explicitée avec sa plage d'application. L'étude approfondie de nombreuses corrélations a permis de confirmer l'une des hypothèses émises par d'autres chercheurs : la masse volumique ne peut être utilisée comme seul paramètre pour prédire la conductivité thermique du givre. Le tableau récapitulatif proposé par Irigorri et al. [29] est disponible en annexe.

Une récente étude de Negrelli and Hermes [64] propose une nouvelle corrélation pour la conductivité du givre. Une analyse théorique est proposée afin de caractériser la couche de givre, considérée comme poreuse. Les auteurs réutilisent donc la notion de porosité

(Équation (3.11)), qui dépend de la masse volumique de l'air et de la glace.

$$\varepsilon_{\text{givre}} = \frac{\rho_g - \rho_{\text{givre}}}{\rho_g - \rho_{\text{air}}} \quad (3.11)$$

Suite aux études précédentes, les auteurs proposent de borner les résultats de la conductivité entre une valeur minimale et une valeur maximale. Les valeurs limites correspondent :

- au cas de cristaux de givre provoquant des résistances thermiques en série (plaques) ;
- au cas de cristaux de givre provoquant des résistances thermiques en parallèle (colonnes).

Ces notions de série-parallèle avaient été identifiées auparavant par Sanders [75] et reprises par Auracher [1]. La figure 3.25 explicite les deux géométries possibles.

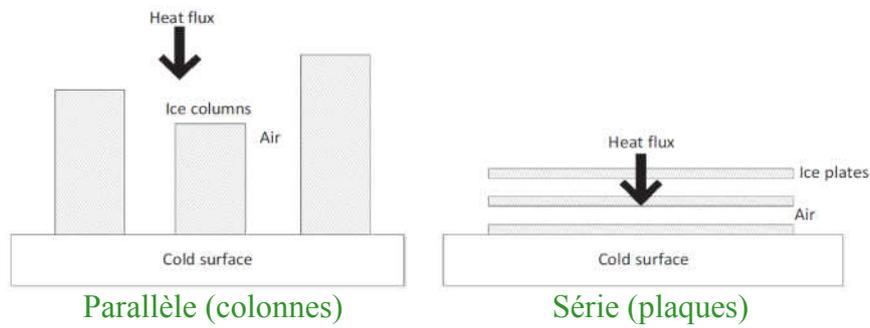


FIGURE 3.25 – Représentation schématique des résistances thermiques série et parallèle (Negrelli et al. [65])

De ces résistances thermiques découlent alors des conductivités série et parallèle (Équation (3.12) et Équation (3.13)).

$$\lambda_{\text{parallèle}} = \lambda_{\text{air}} \varepsilon_{\text{givre}} + \lambda_g (1 - \varepsilon_{\text{givre}}) \quad (3.12)$$

$$\frac{1}{\lambda_{\text{série}}} = \frac{\varepsilon_{\text{givre}}}{\lambda_{\text{air}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{givre}}}{\lambda_g} \quad (3.13)$$

Pour enrichir leur étude, Negrelli and Hermes [64] comparent les conductivités série et parallèle à une conductivité géométrique proposée par Nield and Bejan [66] (Équation (3.14)) dans leurs travaux sur la convection dans les milieux poreux.

$$\lambda_{\text{géométrique}} = \lambda_{\text{air}}^{\varepsilon_{\text{givre}}} \cdot \lambda_g^{(1-\varepsilon_{\text{givre}})} \quad (3.14)$$

Les données expérimentales collectées dans la littérature (188 points) sont effectivement bien toutes comprises entre les conductivités série et parallèle (cf. Negrelli and Hermes [64]). La conductivité géométrique, elle aussi comprise entre les deux montre que la majorité des points expérimentaux se situe entre celle-ci et la conductivité parallèle. L'arrangement série ou parallèle est une conséquence directe de la morphologie du givre donc du type de cristaux. À partir des points expérimentaux et des diverses conclusions citées ci-dessus, les auteurs proposent une corrélation valable pour trois types de cristaux et donc sur trois gammes de température :

- les aiguilles et fourreaux : de -4 à -10 °C ;
- les plaques et dendrites : de -10 à -19 °C ;

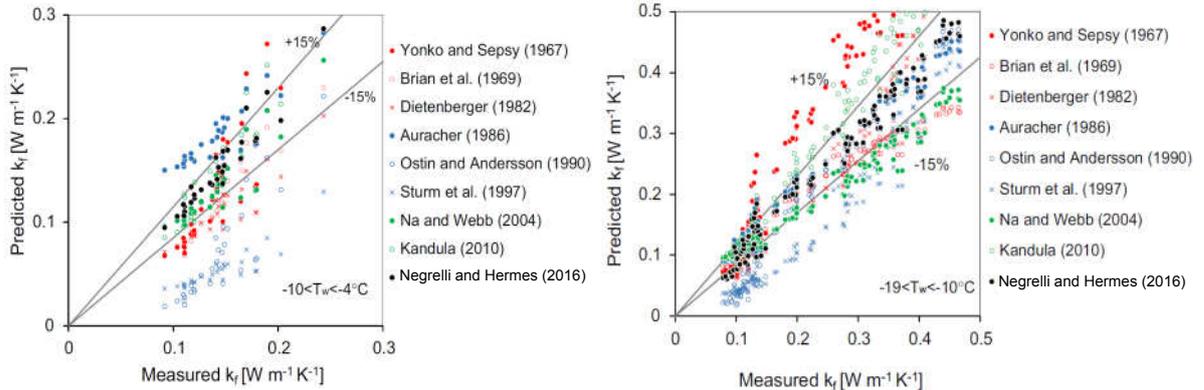
— les fourreaux : de -19 à -30 °C.

La corrélation (Équation (3.15)) utilise deux coefficients  $a$  et  $b$  qui sont modifiés en fonction des types de cristaux.

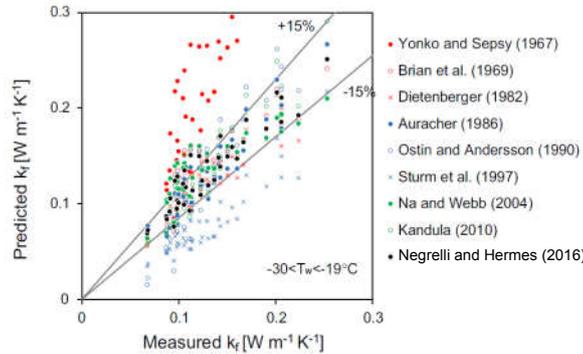
$$\frac{\lambda_{\text{givre}}}{\lambda_g} = a \left( \frac{\lambda_{\text{air}}}{\lambda_g} \right)^{b \varepsilon_{\text{givre}}} \quad (3.15)$$

Différentes corrélations disponibles dans la littérature ont été appliquées à la base de données afin d'évaluer la meilleure des corrélations. Sur les figures 3.26a, 3.26b et 3.26c sont présentés les résultats obtenus pour les trois gammes de températures retenues par Negrelli and Hermes [64]. La corrélation proposée par ces auteurs permet de mieux prédire les données expérimentales. La séparation en gammes de températures réduit considérablement les écarts. Ces figures montrent aussi qu'appliquée à toute la base de données, la corrélation de Yonko and Sepsy [95] uniquement basée sur la masse volumique du givre sous-estime les valeurs de conductivités pour des températures de plaque élevées et surestime la conductivité pour des températures plus faibles. Les autres corrélations ne sont pas beaucoup plus satisfaisantes.

Les résultats de cette étude bibliographique seront utilisés lors du traitement des données obtenus expérimentalement afin de mieux identifier les paramètres influents.



(a) Cristaux de types aiguilles et fourreaux      (b) Cristaux de types plaques et dendrites



(c) Cristaux de type fourreaux

FIGURE 3.26 – Comparaison entre les données expérimentales et les résultats fournis par les corrélations de calcul de la conductivité du givre pour les trois types de cristaux envisagés par Negrelli and Hermes [64]

## 3.4 Synthèse et conclusions

Ce chapitre, divisé en deux grandes parties propose :

- une étude comparative des méthodes prédictives de formation du givre et des points de données de la littérature pour trois géométries différentes : la plaque plane horizontale, la plaque plane verticale et deux plaques planes parallèles ;
- une revue bibliographique des méthodes de prédiction de la conductivité du givre.

Pour la première partie, 494 points ont été rassemblés pour l'épaisseur du givre et 296 pour la masse volumique (en considérant les trois géométries). Pour chaque géométrie, l'impact des paramètres environnementaux ainsi que des études quantitatives et qualitatives ont été présentés. L'impact des paramètres environnementaux sur l'épaisseur du givre est en accord pour les trois géométries : l'épaisseur du givre augmente avec les faibles températures de surface froide, les humidités relatives élevées et les vitesses élevées (ce dernier impact n'a pas été vérifié pour les plaques parallèles à cause d'un manque de données expérimentales, mais il peut être considéré que les résultats seraient identiques).

Pour la masse volumique du givre, comme le nombre de points de données est considérablement plus faible, les conclusions sont moins solides. La masse volumique du givre augmente avec les températures de surface froide élevées pour les plaques seules (horizontale et verticale), mais, concernant les plaques parallèles aucune tendance n'a pu être dégagée. L'impact de l'humidité relative est seulement établi pour la plaque verticale : une humidité relative élevée entraîne une couche de givre moins dense. L'impact de l'humidité relative sur la plaque plane horizontale doit être clarifié car les conclusions disponibles dans la littérature ne sont pas en accord. Concernant la vitesse de l'air, l'impact est identique pour toutes les géométries : la couche de givre est plus dense avec les vitesses élevées.

Pour la plaque plane horizontale, trois des cinq modèles présentés permettant de prédire l'épaisseur sont satisfaisants. (Hermes et al. [24] - Schneider [76] - Hermes [23]). Ils peuvent prédire au moins la moitié de la base de données. Cependant, les méthodes prédictives disponibles pour calculer la masse volumique du givre sur la plaque plane horizontale ne sont pas aussi performantes. Les résultats dispersés obtenus à la suite d'une étude quantitative ont conduit à proposer une nouvelle corrélation pouvant prédire plus de 50 % de la base de données. L'étude qualitative a montré que l'épaisseur du givre est mieux prédite pour les faibles températures de surface froide, les humidités relatives élevées et les grandes vitesses d'air. Des observations contraires ont été faites pour la masse volumique du givre : la dispersion est plus faible avec les faibles températures de surface froide et les vitesses d'air importantes.

Cette étude a été étendue à des géométries plus réalistes : une plaque plane verticale et deux plaques planes parallèles horizontales. Les meilleures méthodes prédictives trouvées dans la première partie ont été appliquées aux deux bases de données pour l'épaisseur et la masse volumique du givre.

Les modèles pour l'épaisseur appliqués à la plaque verticale ne sont pas adaptés probablement à cause des effets liés à la gravité. Les résultats pour la masse volumique sont plus satisfaisants mais nécessitent d'être approfondis. Les effets de gravité affectent probablement plus l'épaisseur du givre que sa masse volumique.

Pour les deux plaques parallèles, les modèles sont plus adaptés bien que moins efficaces que pour la plaque plane horizontale. Ceci peut être expliqué par l'influence de l'interaction des couches limites thermiques et dynamiques entre elles.

Pour conclure, des tests additionnels pour chaque géométrie sont nécessaires. Pour la plaque plane, il faudrait se concentrer sur l'impact de l'humidité relative. Pour les plaques verticales et parallèles horizontales, tous les points sont nécessaires.

Dans la deuxième partie, la revue bibliographique présente différentes corrélations utilisées pour prédire la conductivité thermique du givre. Parmi ces corrélations, celles prenant en compte la masse volumique du givre et la température de la plaque froide ont présenté de meilleurs résultats. Plus d'attention a été portée à une récente étude de Negrelli and Hermes [64] qui présente des résultats très satisfaisants. Les différents travaux ont permis de comprendre que la morphologie du givre joue un rôle non négligeable dans la conductivité du givre. Les différentes morphologies (plaques, colonnes, sphères, etc) que peuvent prendre les cristaux impactent directement le caractère isolant ou conducteur de la couche de givre.

De manière plus globale, les chapitres 2 et 3 ont permis d'identifier les différents mécanismes de formation du givre résumés sur la figure 3.27. Cette figure présente cinq cas qui regroupent les différents phénomènes physiques ayant lieu sur une paroi froide d'évaporateur.

Le cas A (cf. figure 3.27) présente un transfert par chaleur sensible uniquement. Pour que ce cas se produise il faut que la température de l'air soit supérieure à celle de la plaque refroidie, qui doit elle-même être supérieure à la température de rosée de l'air et que la température de rosée soit supérieure à 0°C. Ainsi, le seul moteur des transferts est la différence de températures entre l'air et la plaque refroidie. Aucune goutte ni aucun cristal ne se forme sur la plaque. Aucun transfert par chaleur latente ou transfert de masse n'a donc lieu.

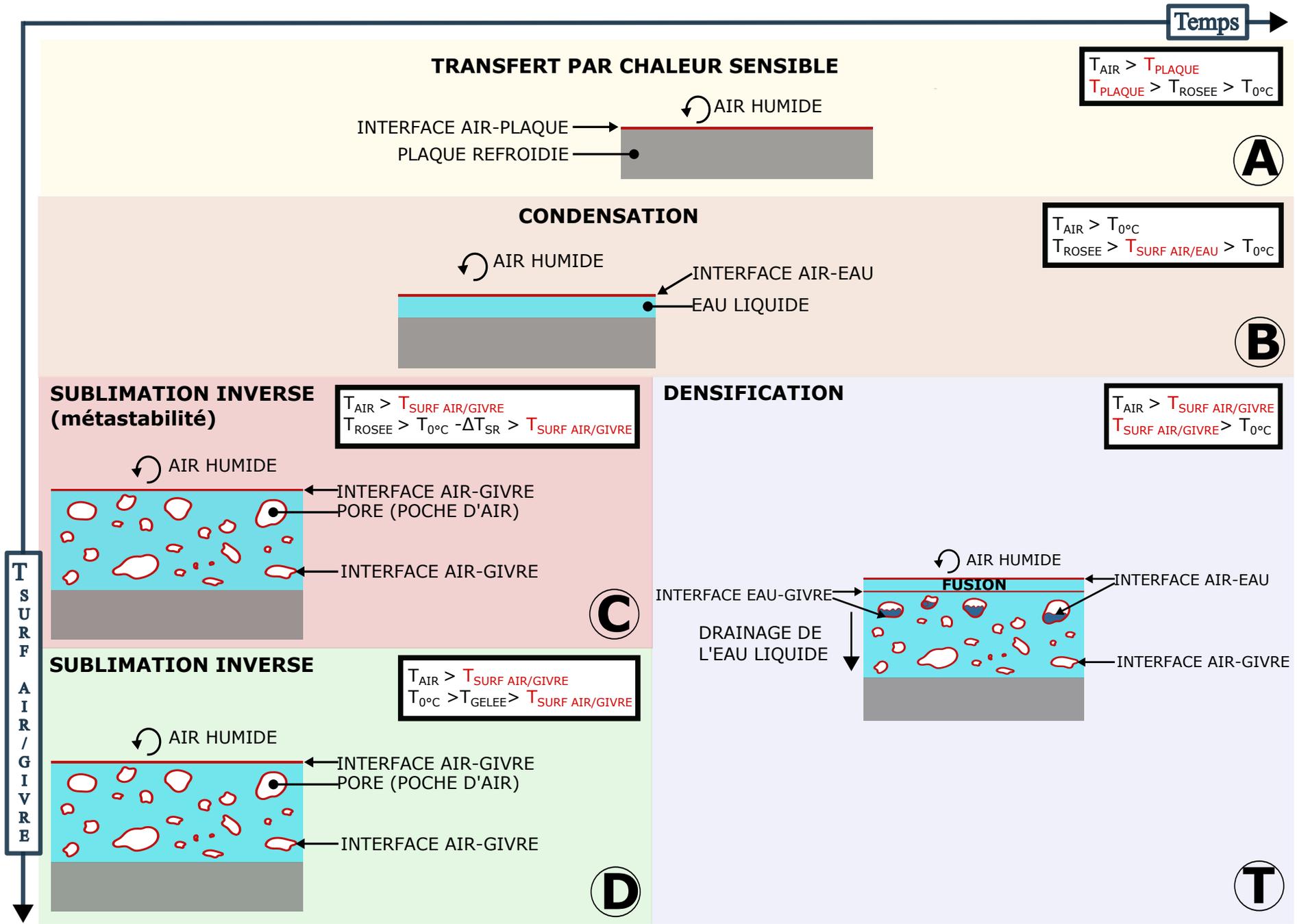
Lorsque la température de la plaque est en dessous du point de rosée mais au dessus de 0 °C (cas B - figure 3.27), la vapeur contenue dans l'air condense à la surface. Un film liquide se forme sur la plaque froide. Ce film continue à se développer tant que la température de l'air reste positive et que la température à l'interface air/eau reste comprise entre 0 °C et le point de rosée.

Si la température de la plaque est encore plus faible, un nouveau phénomène apparaît : la sublimation inverse (cas C - figure 3.27). Pour cela, il faut que la température de l'air soit maintenue positive et que la température à l'interface air/givre soit à la fois inférieure au point de rosée et à 0 °C diminué du gradient de sous refroidissement  $\Delta T_{SR}$ . Cet état est considéré comme métastable. En effet, dans la couche limite thermique, l'air humide sursaturé passe de la température de l'air à la température de la plaque. La température de la plaque étant négative, celle de l'air humide lors de son refroidissement devient inférieure au point de rosée puis à 0 °C. Alors que sa température devient négative, l'eau reste sous forme de vapeur car rien ne provoque sa condensation. Ce n'est qu'une fois le degré de sous-refroidissement dépassé, au contact de la plaque que la vapeur se transforme directement en givre faisant apparaître les premiers cristaux.

Il existe un deuxième cas pour lequel la sublimation inverse a lieu. Il faut que la température de la plaque froide soit négative et en dessous de la température de gelée. La température de gelée est l'équivalent de la température de rosée en dessous de 0 °C (cas D - figure 3.27). Dans ces conditions la vapeur contenue dans l'air vient désublimer à la surface de la plaque. Ce phénomène a lieu à l'interface tant que la surface du givre respecte les températures décrites ci-dessus.

Un phénomène supplémentaire peut être observé au cours du temps. En effet, au fur et à mesure, la couche de givre formée par les mécanismes C ou D épaisse. Suite à cette

augmentation d'épaisseur, la résistance thermique du givre augmente faisant augmenter sa température de surface. Un phénomène apparaît alors, il est décrit par le cas T (figure 3.27). Lorsque la température de la surface eau/givre devient positive, de l'eau liquide apparaît à la surface. Cette eau liquide s'infiltré dans le givre qui est un milieu poreux. L'eau infiltrée atteint une "strate" dont la température est inférieure à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  diminué du  $\Delta T_{\text{SR}}$  (conditions du cas C). Cette eau regivre provoquant la densification de la couche de givre (cas T).



T SURF AIR / GIVRE



# Chapitre 4

## Description et qualification du banc d'essais

Ce chapitre décrit le banc d'essais qui a été conçu pendant ce travail de thèse. Il a été construit de manière à visualiser la formation et le développement de la couche de givre sur une surface plane. Un système d'acquisition via Labview permet d'acquérir simultanément la valeur de tous les paramètres mesurés, y compris les prises de vues. La description de la méthodologie à respecter pour effectuer les essais est fournie en annexe.

## 4.1 Présentation du banc

Cette partie présente tous les éléments annexes nécessaires à la réalisation des expériences (cf. figure 4.1) mais situés hors de la section d'essais. Une chambre froide (a) permet d'obtenir de l'air à la température désirée. Cet air est transporté jusqu'à la section de test via un ventilateur (b). L'air, qui circule dans un conduit, est chargé en humidité (c) à l'entrée du ventilateur puis poursuit sa route pour entrer dans la section d'essais (d). Une partie de l'eau contenue dans l'air givre sur une plaque froide placée à fleur de la veine d'air. Cette plaque est refroidie par de l'eau glycolée maintenue en température par un bain thermostaté. À la sortie de la section de tests, l'air est redirigé vers la chambre froide pour être reconditionné. Le circuit fonctionne en boucle fermée.

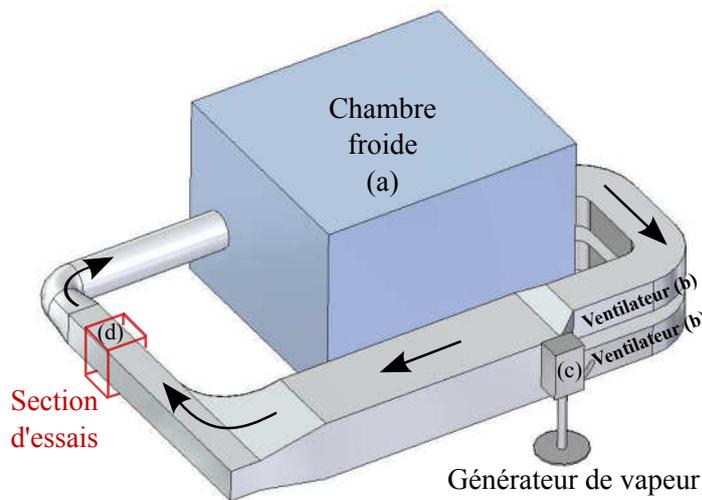


FIGURE 4.1 – Description du dispositif expérimental. (a) : chambre froide, (b) : ventilateurs, (c) : générateur de vapeur, (d) : section d'essais

Les parties suivantes décrivent en détail chaque élément du banc d'essais.

### 4.1.1 Chambre froide

La chambre froide, d'un volume de  $20 \text{ m}^3$  permet de refroidir l'air jusqu'à  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Compte tenu des différentes pertes thermiques (isolation, ventilateur), la chambre froide ne peut atteindre qu'une température minimale de  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ . De plus, le générateur de vapeur contribue lui aussi à la dégradation des performances. En effet, plus l'air est humide plus la température minimale qu'il est possible d'atteindre est élevée et moins le test sera long (l'eau contenue dans l'air givre aussi sur l'évaporateur de la chambre froide, ce qui provoque une dégradation brutale des performances au cours du temps). La température de l'air est régulée à l'aide de résistances chauffantes placées dans la veine. Ces résistances chauffantes sont gérées par un régulateur PID West 8200 fourni par *Serv'Instrumentation*. La chambre froide fonctionne en marche forcée pour produire en permanence du froid. C'est donc la température imposée aux résistances chauffantes qui fait office de température de consigne pour la température de l'air. La chambre froide est paramétrée de manière à ce que le dégivrage automatique n'ait pas lieu (ce qui aurait pour conséquence un arrêt de la production de froid et une remontée brutale en température de l'air).

## 4.1.2 Générateur de vapeur

Le générateur de vapeur *Rexair Novap 3000* dispose d'une puissance de 15 kW. Il peut fournir jusqu'à de  $6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  de vapeur. Il est régulé avec un PID West 6100 fourni par *Serv'Instrumentation*. Les paramètres du PID sont déterminés afin de faire fonctionner l'appareil de manière optimale. Les valeurs fournies par la sonde hygrométrique du générateur sont collectées afin d'être comparées aux valeurs fournies par un hygromètre placé en amont de la section de test.

## 4.1.3 Veine d'air et ventilateur

La veine d'air initiale ne correspondait pas aux besoins de la thèse pour deux raisons :

- Sa forme ne permettait pas d'avoir une bonne homogénéité des vitesses d'air dans le circuit, notamment dans la section de tests ;
- La partie consacrée au montage de la section d'essais était circulaire. Une section carrée est plus adaptée aux tests souhaités.

Une portion de la veine d'air a donc été modifiée. Une pièce sur-mesure a été réalisée afin de répartir de façon plus homogène les vitesses d'air dans le conduit. Une grille R5T8 (taux d'ouverture de 35 %) d'épaisseur 2 mm a été ajoutée dans la veine pour améliorer l'homogénéisation. Afin de s'assurer de la bonne homogénéité des vitesses d'air, des calculs CFD ont été réalisés sur la nouvelle géométrie. La figure 4.2 montre la répartition de l'air dans la nouvelle portion de veine. La figure 4.3 montre la répartition de l'air dans la demi-section supérieure (problème symétrique) située juste en amont et en aval de la plaque refroidie. L'air est bien réparti. L'association de ces deux figures permet d'être certain que la géométrie de la veine qui a été mise en place correspond aux conditions souhaitées. À ces études théoriques viendront s'ajouter des tests pratiques réalisés sur la veine en fonctionnement.

En sortie de section d'essais et avant le coude déjà existant, un adaptateur carré-rond a été mis en place, pour deux raisons :

- Une portion supplémentaire était nécessaire pour que le coude à  $90^\circ$  ne perturbe pas l'écoulement dans la section d'essais ;
- Pour modifier le moins possible la veine d'air, il a été nécessaire de greffer la partie modifiée sur la section circulaire déjà existante. Ce qui a donc nécessité l'ajout du carré-rond.

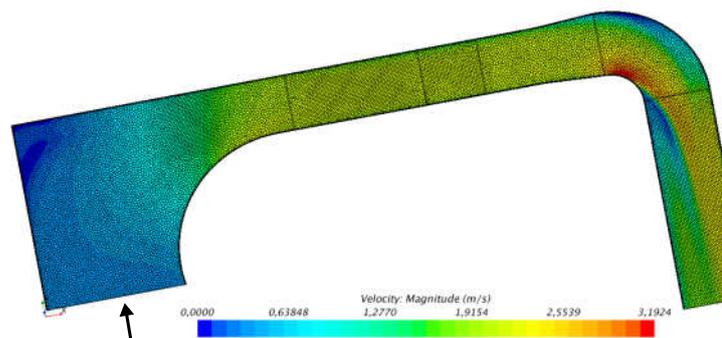


FIGURE 4.2 – Simulation de l'écoulement d'air au sein de la veine

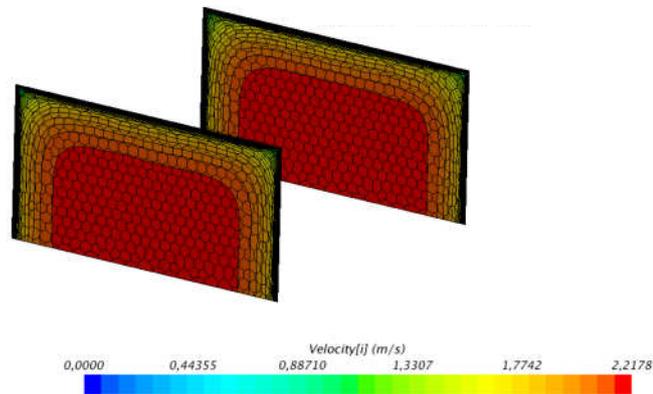


FIGURE 4.3 – Simulation de la répartition de l'air dans deux demi-sections de la veine

#### 4.1.4 Bain thermostaté

Le bain thermostaté utilisé est un *Lauda WKL 2200*, auquel a été rajouté un module permettant la descente en température jusqu'à  $-25\text{ °C}$ . La figure 4.4 présente la puissance de refroidissement fournie par le bain en fonction de la température souhaitée. Le débit maximal de la pompe est de  $40\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  avec une pression de refoulement maximale de 3,2 bar. Le fluide frigoporteur utilisé est le Kryo 30, mélange d'eau et de monoéthylène glycol, pouvant être utilisé entre  $-30$  et  $90\text{ °C}$ .

Le bain est équipé d'un port RS 232 qui permet son pilotage par Labview. La température de consigne est ainsi imposée par l'ordinateur qui pilote les essais. Ce bain présente un inconvénient majeur : il ne possède pas de système de régulation PID. Ce défaut implique des oscillations assez importantes (d'environ  $1,5\text{ °C}$ ) autour de la valeur de consigne. Afin de réduire ces oscillations et d'obtenir une température d'eau glycolée la plus constante possible, un volume tampon de 25 litres a été ajouté dans le circuit en amont de la section d'essais.

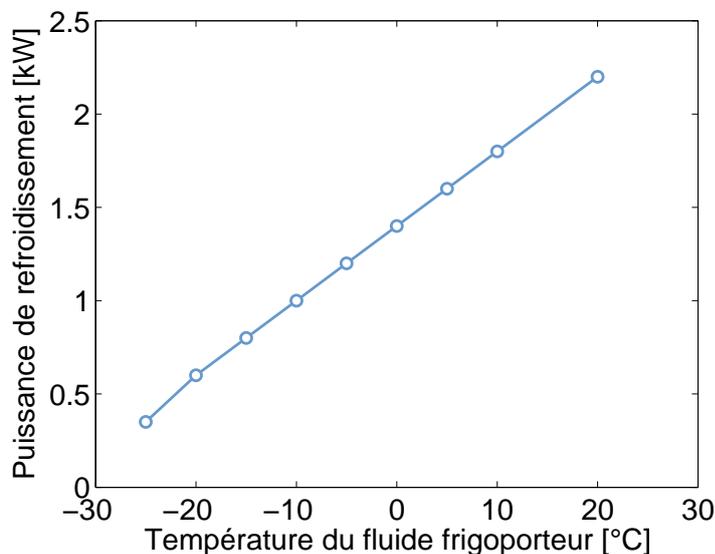


FIGURE 4.4 – Puissance de refroidissement du *Lauda WKL 2200*

## 4.2 Section de test

Cette partie décrit avec précisions les différents composants de la section de tests. Cette section est constituée d'une portion de veine carrée réalisée en PMMA (polyméthacrylate de méthyle). Cette boîte, dont le principal avantage est d'être transparente permet la visualisation du phénomène de givrage. Pour que la plaque givrante puisse être placée à fleur de la veine, la partie basse de la boîte a été percée. Jusqu'à maintenant, la surface sur laquelle le givre va se former a été désignée par le terme "plaque". En réalité, cette surface est composée d'un dispositif plus complexe basé sur un empilement d'éléments dont la description est donnée par la suite (cf. section 4.2.2).

### 4.2.1 Veine en PMMA

Une veine en PMMA sur-mesure a été réalisée pour la section d'essais afin de pouvoir visualiser la formation et le développement du givre. La veine a une section de passage de  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  et mesure  $400\text{ mm}$  de longueur. La figure 4.5 présente la boîte qui a été construite. L'objectif est de pouvoir prendre des photos de la couche de givre à intervalles réguliers sans que l'appareil photo ne soit situé dans le flux d'air (l'humidité importante peut détériorer l'appareil). C'est la raison principale pour laquelle le PMMA a été choisi.

Une mesure de la température de surface du givre est effectuée par une caméra infrarouge. Pour les mêmes raisons que l'appareil photo, la caméra doit être située en dehors de la boîte. Le PMMA n'étant pas transparent aux infrarouges, un orifice a été réalisé sur la partie supérieure. Ainsi, un hublot en germanium transparent aux infrarouges dans la gamme de  $3\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$  d'un diamètre de  $75\text{ mm}$  y a été installé. La figure 4.6 présente le diagramme de transmission de la fenêtre en germanium choisie.

Entre  $8\text{ et }12\text{ }\mu\text{m}$ , qui correspond à l'intervalle d'émission du givre, la transmission est supérieure à  $90\%$ .

Des balais ont été fixés sur le périmètre du trou au niveau de la partie inférieure de la boîte, à l'endroit prévu pour accueillir la plaque givrante. L'un des objectifs est d'effectuer une mesure de la masse du givre formé en fin de test. Les balais permettent d'améliorer l'étanchéité entre la plaque froide et le bord de la boîte en PMMA, qui

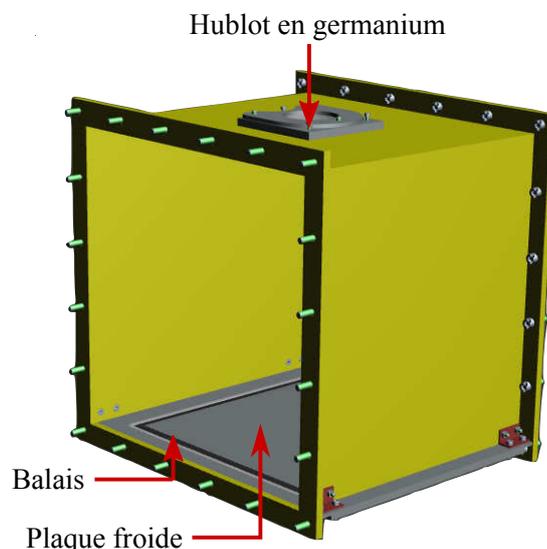


FIGURE 4.5 – Portion de la veine en PMMA

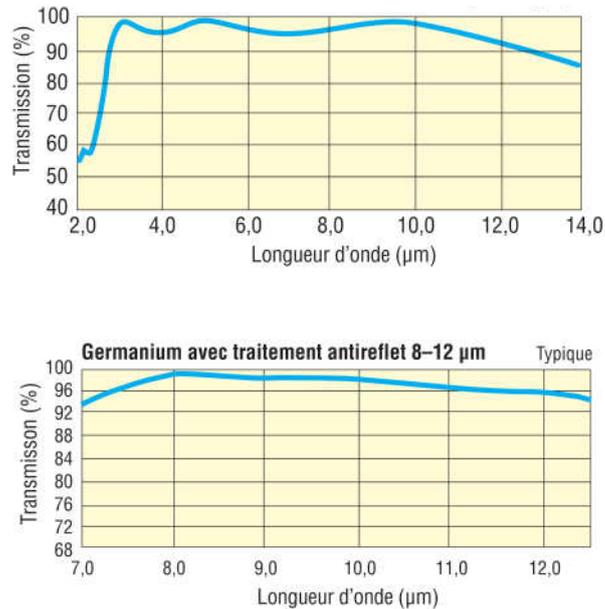


FIGURE 4.6 – Diagramme de transmission de l'optique en germanium

ne sont pas fixés ensemble. Cette technique permet ainsi à la plaque d'être déplacée librement.

#### 4.2.2 Dispositif de givrage

Le dispositif de givrage est composé :

- d'un assemblage de deux plaques en aluminium parcouru de canaux dans lesquels circule l'eau glycolée ;
- d'une plaque en carbone ;
- d'un feuilard.

Ces trois éléments sont superposés, comme le montre la figure 4.7. Le contact entre chaque élément est amélioré par l'ajout de graisse thermique. Le détail de chaque composant est présenté par la suite.

##### Assemblage en aluminium

Cet assemblage est composé de deux plaques vissées, dont l'une a été usinée pour former des canaux (cf. figure 4.8). Sur cette figure, la plaque supérieure a été rendue transparente afin que les canaux puissent être visualisés. Les canaux ont été conçus de

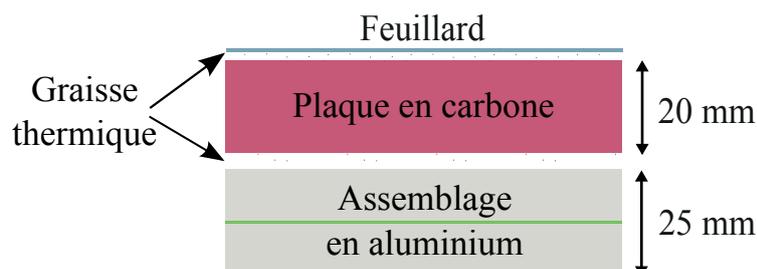


FIGURE 4.7 – Schéma du dispositif de givrage utilisé dans la section de test

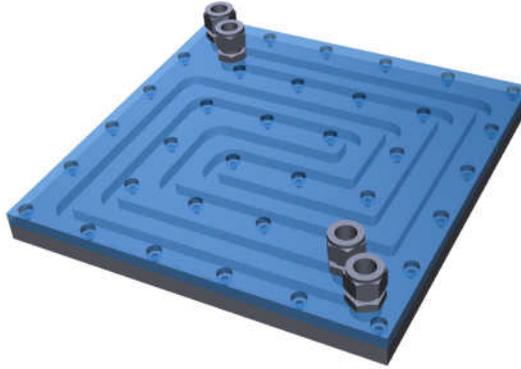


FIGURE 4.8 – Représentation 3D de l'assemblage en aluminium dans lequel circule l'eau glycolée

manière à ce que la température de la pièce soit la plus uniforme possible. Le matériau utilisé pour réaliser cet assemblage est un alliage d'aluminium AU 4G. Ce matériau a été préféré à l'acier inoxydable pour sa conductivité thermique plus élevée qui favorise l'homogénéisation de la température et sa masse volumique plus faible, qui permet de réduire sa masse. L'assemblage est carré, ses côtés mesurent 300 mm et il a une épaisseur de 25 mm, ce qui lui confère une masse d'environ 7 kg. Il possède deux entrées et deux sorties placées en opposition afin d'assurer une meilleure répartition des charges.

### Plaque en carbone

Au dessus de l'assemblage en aluminium est placée une plaque en carbone KC57. Comme la pièce précédente, elle est carrée avec des côtés mesurant 300 mm et possède une épaisseur de 20 mm.

Cette plaque, qui est refroidie par l'assemblage en aluminium, a été ajoutée afin de mesurer le flux de chaleur échangé entre l'air humide et l'eau glycolée. Pour cela, une valeur précise de sa conductivité thermique est nécessaire. Cette conductivité a été calculée par la société *Influtherm* qui l'a déterminée à partir de mesures de la chaleur massique, de la diffusivité thermique et de la masse volumique. Ces tests ont été effectués sur des échantillons issus du même lot que celui qui a permis de confectionner la plaque.

Les mesures de la chaleur massique ont été effectuées par méthode calorimétrique et par DSC. La confrontation des deux techniques a permis de valider les résultats obtenus (identiques pour les deux méthodes). De plus, les tests ont été répétés sur des échantillons différents qui ont présenté des résultats similaires. La reproductibilité des mesures a donc été vérifiée. La diffusivité thermique a été mesurée à l'aide d'un diffusivimètre flash. Enfin, la masse volumique a été mesurée à l'aide d'une balance de précision et d'un pied à coulisse.

Des sillons de  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  de section, sur 150 mm de longueur ont été usinés sur les surfaces supérieure et inférieure de la plaque en carbone. Chaque surface présente cinq sillons dans lesquels sont disposés des thermocouples. Le placement des thermocouples peut être identifié sur la figure 4.9. Les thermocouples numéro 7, 8, 9, 10 et 11 sont placés sur la face inférieure de la plaque en carbone, c'est-à-dire, celle en contact avec l'assemblage en aluminium. Les autres numéros correspondent aux thermocouples placés sur la partie supérieure de la plaque en carbone, c'est à dire, celle en contact avec le feuillard.

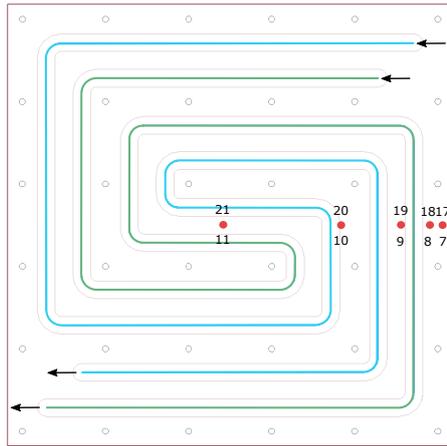


FIGURE 4.9 – Disposition des thermocouples sur la plaque en carbone

La connaissance de la différence de températures entre les deux faces, de la conductivité thermique et de l'épaisseur de la plaque permet de connaître le flux de chaleur échangé entre la source chaude et la source froide. Cette plaque en carbone est posée sur l'assemblage en aluminium. Pour améliorer les échanges entre les deux éléments, de la pâte thermique est placée sur les deux faces en contact. La pâte thermique est de la *Kerafol Keratherm KOP 98*. Elle a une conductivité de  $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

## Feuillards

Un dernier élément vient s'ajouter à ce dispositif de givrage : un feuillard. Ce feuillard est le matériau généralement utilisé dans l'industrie pour réaliser les ailettes des évaporateurs des pompes à chaleur. Il est placé sur la plaque en carbone. Il tient en place grâce à la pâte thermique qui permet aussi de corriger les défauts de planéité. Le feuillard est découpé en un carré de 300 mm de côté (comme les deux précédents composants). Son épaisseur est de quelques centaines de microns. Deux feuillards sont disponibles. Un premier, en aluminium, qui est le matériau le plus utilisé dans la conception des ailettes. Le second est revêtu d'un coating permettant d'améliorer les performances en cas de givrage. Des mesures de la rugosité des surfaces et des angles de contact ont été réalisées afin de caractériser les surfaces. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.1. La rugosité a été déterminée à l'aide d'un microscope confocal. L'angle de contact a été mesuré à l'aide d'une goutte déposée sur la surface à caractériser. La goutte est photographiée et l'angle que fait la goutte avec la surface plane déduit.

Le feuillard revêtu est la surface la plus hydrophobe, c'est à dire que la goutte a tendance à garder son allure sphérique sur le matériau alors que le feuillard nu favorise l'étalement de la goutte sur la surface. La figure 4.10 illustre la notion des surfaces hydrophile et hydrophobe. Le feuillard revêtu présente une rugosité de surface plus faible que celle du feuillard nu. Une surface plus rugueuse aura tendance à favoriser la nucléation des cristaux de givre.

Il était envisagé au début de ce travail de thèse de réaliser des essais sur les deux feuillards. Pour pouvoir ultérieurement compléter les essais sur le feuillard nu, celui-ci a été laissé en place. Le feuillard revêtu n'a de ce fait pas été testé.

Le dispositif de givrage est composé de ces trois éléments, avec en partie supérieure le feuillard, qui est placé à fleur de la veine d'air. Par soucis de simplification et pour

TABLEAU 4.1 – Caractéristiques des feuilards

Type de feillard	Rugosité [µm]	Angle de contact (°) - Mouillage statique
Feillard en aluminium "classique"	5	70,1
Feillard revêtu	2	86,5

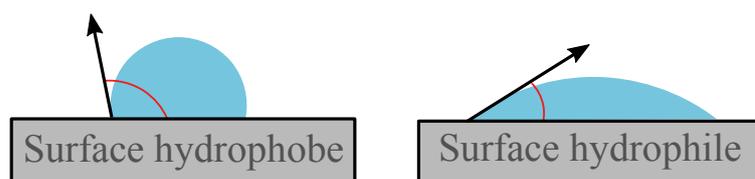


FIGURE 4.10 – Comportement d’une goutte d’eau sur deux surfaces : hydrophobe et hydrophile

rester cohérents avec les travaux de la littérature, la surface givrante, c’est-à-dire le feillard, sera désigné par le terme "plaque froide" dans la suite de ce travail. Le givre se forme uniquement sur le feillard. Les côtés des trois composants du dispositif de givrage sont isolés par de la mousse afin de ne pas givrer.

Lorsque le second feillard pourra être testé, la comparaison des résultats obtenus à partir des deux revêtements permettra d’évaluer l’impact de l’état et des propriétés de la surface sur la formation du givre.

### 4.2.3 Balance

Une balance est utilisée afin de peser le givre déposé sur le feillard. La balance utilisée est un produit *KERN FKB 16K0.1*. Sa portée maximale est de 16 kg et elle a une définition de 0,1 g. Elle est équipée d’un port RS232 qui permet de collecter les résultats via Labview. L’un des objectifs initial de cette thèse était d’effectuer une mesure régulière de la masse, de manière automatisée au cours du test. C’est en partie pour cette raison qu’une balance avec un port RS232 a été choisie. Malheureusement le système pensé initialement n’a pas permis de collecter les mesures de masse. En effet, le premier dispositif de givrage raccordé au bain thermostaté par des tuyaux en PVC présentait plusieurs inconvénients majeurs qui rendaient impossible l’acquisition de mesures de masse correctes. Les mesures effectuées par la balance étaient perturbées par :

- une mauvaise répartition de la masse du dispositif, due à la position des orifices d’entrée et de sortie du fluide de l’assemblage en aluminium ;
- les vibrations engendrées par le bain thermostaté surtout lors des mises en marche/arrêts successifs du compresseur ;
- l’alimentation de l’assemblage en aluminium, dans lequel circulait l’eau glycolée,

par des tubes PVC qui induisaient une force non constante et non reproductible. Des tests menés avec des tubes en silicone n'ont pas permis de résoudre ce problème.

Pour limiter ces problèmes, plusieurs solutions ont été mises en place :

- un nouvel assemblage en aluminium a été réalisé. Il s'agit de celui présenté dans la section ci-dessus. Ce nouveau système, dont les entrées et sorties sont situées en opposition permet de mieux répartir les charges ;
- un volume tampon de 25 litres a été ajouté au circuit d'eau glycolée afin d'atténuer les vibrations engendrées par le bain. Après tests, ce volume permet de ne plus sentir les vibrations provoquées en fonctionnement normal. Seules les perturbations induites par le redémarrage du compresseur du bain thermostaté n'ont pas pu être éliminées ;
- un nouveau circuit d'eau glycolée a été mis en place afin de résoudre le problème lié aux tuyaux en entrée et sortie de l'assemblage en aluminium. Pour cela un circuit par écoulement gravitaire a été dimensionné et réalisé.

La section suivante fournit des informations plus détaillées sur le circuit mis en place.

### **Circuit d'eau glycolée : écoulement par gravité**

Le montage développé permet l'écoulement de l'eau glycolée de deux manières différentes :

- un écoulement gravitaire (ou sans contact) rendu possible grâce aux choix techniques effectués ;
- un écoulement entraîné par la pompe du bain thermostaté qui permet de bipasser le circuit précédent lors de la mise en régime de l'installation.

L'écoulement en circuit fermé entraîné par la pompe du bain (non gravitaire) a été conservé afin de pouvoir refroidir rapidement le dispositif de givrage. En phase préparatoire de tests, une puissance importante (donc un débit d'eau glycolée élevé) devait être fournie par le bain thermostaté afin de refroidir le système de la température ambiante à une température avoisinant les  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lors de cette étape, aucun relevé de mesure n'était effectué, l'influence des tuyaux sur la mesure de masse n'était donc pas importante. Lorsque la température souhaitée était atteinte, le circuit était modifié pour passer en écoulement gravitaire. Le changement de circuit a été facilité grâce à l'ajout de raccords rapides. Les deux circuits sont présentés sur la figure 4.11

Le dispositif d'écoulement par gravité se compose de deux circuits en parallèle. En entrée, deux tubes rigides en cuivre de 1 m de hauteur alimentent la plaque. La hauteur de 1 m permet de vaincre les pertes de charge (induites par les tuyaux et les canaux) par gravité à un débit de  $5\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  maximum. En amont de ces deux tubes, sont placés deux entonnoirs afin de favoriser l'entrée du fluide. Le fluide sort de l'assemblage en aluminium par deux tuyaux de cuivre, cette fois plus courts, et se déverse dans un réservoir muni d'une pompe, commandée par un flotteur. Le fluide est ainsi renvoyé vers le bain thermostaté. Des cols de cygne ont été mis en place en entrée et en sortie afin que le système ne se vide pas de tout son fluide à chaque arrêt du circuit. Une photo de l'assemblage en aluminium utilisé pour le circuit gravitaire et ses tuyaux d'alimentation est proposée sur la figure 4.12.

Après tests, cette nouvelle installation n'a pas permis d'éliminer toutes les perturbations induites par le système. Les résultats obtenus pour la mesure de masse n'étaient pas

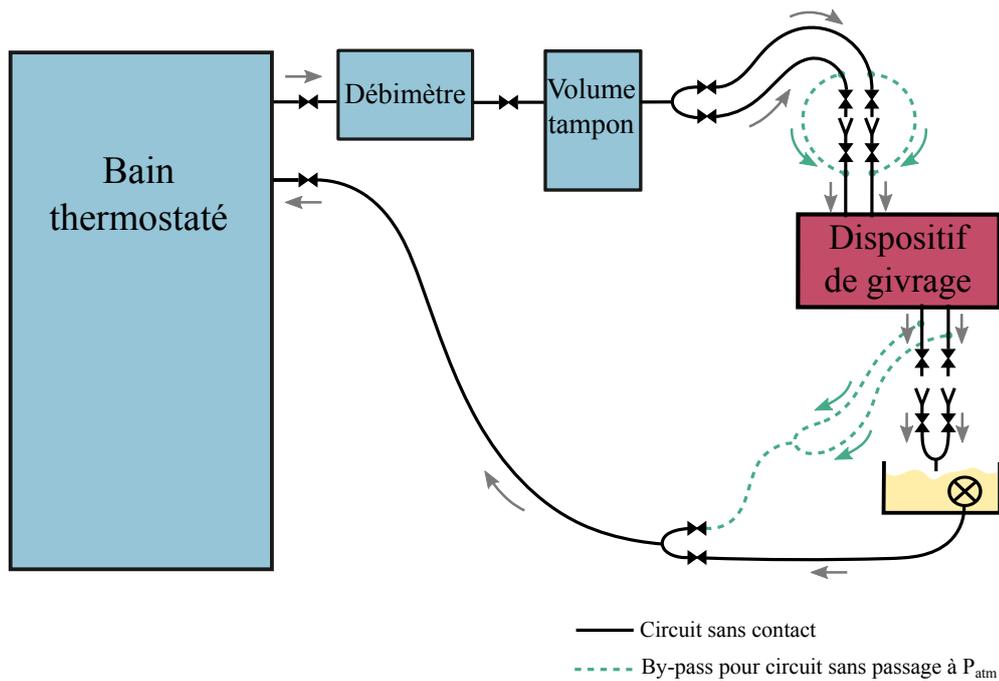


FIGURE 4.11 – Schéma du circuit d'eau glycolée imaginé pour la mesure automatique de la masse volumique du givre



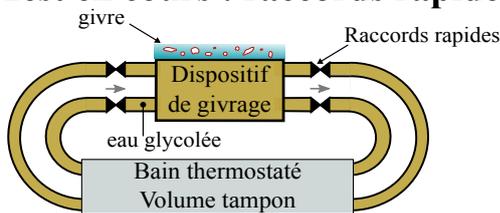
FIGURE 4.12 – Dispositif réalisé pour le circuit d'eau glycolée gravitaire

satisfaisants. Il a donc été choisi de démonter le circuit gravitaire. Les tubes en cuivre en entrée et sortie ont été retirés. Les raccords rapides ont été placés en entrée et sortie de l'assemblage en aluminium afin qu'il puisse être connecté/déconnecté rapidement, ce qui permet sa pesée en fin de test. La mesure de masse peut ainsi être obtenue, mais pas de manière automatique comme envisagé initialement.

Ainsi, l'assemblage en aluminium reste connecté au circuit d'eau glycolée pendant toute la durée du test. Cette connexion permet de faire circuler l'eau glycolée à débit élevé et donc de maintenir une température la plus constante possible. Une fois le test terminé, les différents appareils sont arrêtés rapidement. Le circuit d'eau glycolée étant à l'arrêt, le dispositif de givrage sur lequel repose le givre peut être déconnecté et pesé. Une première mesure de masse est obtenue. Cette première donnée est la somme de la masse du givre, du dispositif complet (assemblage en aluminium + plaque en carbone +

feuillard) et de l'eau glycolée. Le feuillard est ensuite séché à l'aide d'un décapeur thermique, et le dispositif est pesé de nouveau. Cette deuxième mesure est indispensable. En effet, même si d'un test à l'autre, la masse du dispositif ne varie pas, la quantité d'eau glycolée peut elle être différente. C'est pourquoi il est nécessaire d'effectuer deux relevés de masse à la fin de chaque test. De plus, il est essentiel de réaliser cette étape à la fin du test (de ne pas laisser la surface dégivrer de manière naturelle) afin d'obtenir une mesure de masse la plus précise possible. En effet, au cours du temps, les raccords rapides peuvent laisser s'échapper quelques gouttes d'eau glycolée qui peuvent fausser la mesure de masse. La différence de masse correspond à la masse de givre formée au cours du test. La figure 4.13 présente les différentes étapes du processus de mesure de masse du givre.

### Test en cours : raccords rapides connectés



### Fin de test

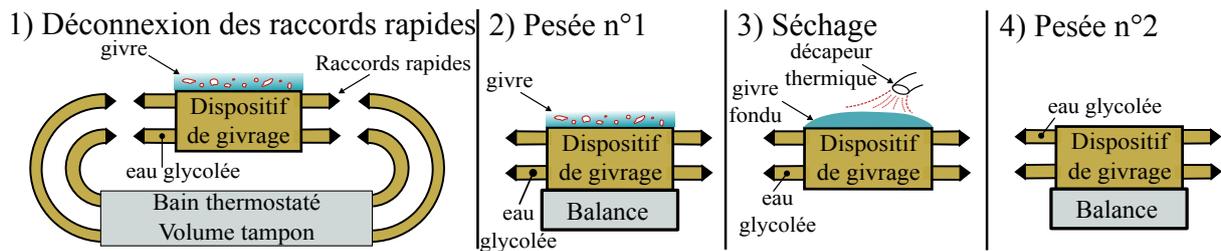


FIGURE 4.13 – Processus de mesure de masse de givre déposé sur la plaque refroidie

La mesure de masse automatisée, en continu durant le givrage, constituera un des principaux objectifs des études qui viendront s'ajouter à ce travail de thèse.

#### 4.2.4 Caméra infrarouge

Une caméra infrarouge est utilisée pour mesurer la température de surface du givre. La caméra utilisée est une *FLIR T420 bx*. Le tableau 4.2 regroupe ses principales caractéristiques.

Les longueurs d'onde de fonctionnement sont compatibles avec celles dans lesquelles le givre émet. La caméra infrarouge est placée à 42 cm au dessus de la boîte en PMMA. Cette distance a été calculée à partir de l'optique de la caméra et du diamètre du hublot en germanium. Au delà de 42 cm le champ de mesure de la caméra sort de la fenêtre en germanium. La caméra peut ainsi mesurer la température de surface du givre sur une surface de 196 mm × 148 mm. Pour rappel, la surface de la plaque est de 300 mm × 300 mm. La caméra ne couvre pas la totalité de la plaque mais apporte néanmoins plus de précisions qu'un pyromètre (qui mesure uniquement la température en un point).

TABLEAU 4.2 – Caractéristiques de la caméra infrarouge FLIR T420bx

Caméra Infrarouge	FLIR T420bx
Intervalle de température	de -20 °C à +350 °C
Optique	25 °×19 °
Type de détecteur	320 × 240 pixels
Intervalle de longueur d'onde	de 7,5 à 13,0 μm
Lentille	25 °

### 4.2.5 Appareil photo

L'appareil photo utilisé est un Canon EOS 700D auquel a été ajouté un objectif *Sigma 105mm f/2.8 DG macro*. Cet appareil photo est utilisé pour mesurer l'épaisseur du givre. Le capteur a une résolution de 18 mégapixels, information utile pour le traitement des images qui sera réalisé par la suite.

L'appareil photo est placé à 400 mm de distance du bord de la plaque givrante et à 550 mm du plan focal. Il a été choisi de mesurer l'épaisseur du givre dans le plan qui se situe au centre de la plaque refroidie car la majorité des mesures (température du givre, variation de température au sein de la plaque en carbone...) sont effectuées à cet endroit. Comme la variation d'épaisseur du givre est infime et ne représente que quelques millimètres sur des tests d'une durée d'environ deux heures, la technique utilisée est la macrophotographie. Cette technique permet de mesurer les petites variations de l'épaisseur de la couche givre sur une dizaine de centimètres dans le plan de la focale, centré sur la plaque. Pour faciliter la prise de vues, une mire en forme de "L" est placée sur la plaque (collée avec de la pâte thermique) dans le plan de la focale (cf. figure 4.14). L'ajout de cette mire permet faire la mise au point sur sa surface visible et de faciliter les réglages pour chaque test. De plus, cette mire, dont les dimensions sont connues avec précisions, sert de référence pour chaque test. En effet, pour calculer la variation d'épaisseur, il est nécessaire d'avoir un repère qui permette de lier le nombre de pixels à une dimension. Or, comme la plaque est amenée à être déplacée d'un test à l'autre (pour être pesée et nettoyée) et que le système mis en place ne permet pas de la replacer avec précision après chaque déplacement, il a été choisi d'avoir en permanence

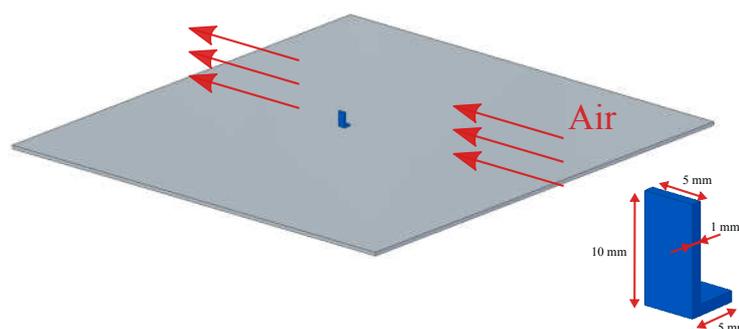


FIGURE 4.14 – Description de la mire utilisée pour la prise de photo

une mire. Ainsi, la mire apparaît sur chaque photo prise pendant les tests. Elle a été pensée afin de ne pas perturber l'écoulement, d'où sa forme en "L". Bien que la mire ait été réalisée en plastique et qu'elle soit de forme assez fine (donc peu intrusive), les premiers tests ont néanmoins montré que le givre ne se forme pas exactement à la même vitesse au niveau de celle-ci que sur le reste de la plaque. La mire est ainsi uniquement utilisée comme repère de mesure. Elle a donc été placée sur le côté de la photo. La première photo du test permet de connaître la corrélation entre le nombre de pixels et l'épaisseur. Par la suite, les photos sont découpées afin de faire disparaître la mire et la non homogénéité de couche de givre liée à sa présence. L'épaisseur de givre est calculée et moyennée sur le reste de la photo. Le détail des différentes étapes est présenté dans la section 4.4.6.

La connexion USB de l'appareil photo avec l'ordinateur permet de régler les paramètres à distance et de le déclencher via Labview de manière simultanée avec les autres dispositifs de mesure.

### 4.3 Description du protocole expérimental

Un protocole expérimental a été mis en place afin d'optimiser le temps de travail et d'effectuer des tests rigoureux.

Avant de lancer l'acquisition des points de données, il est nécessaire que le système monte en régime, ce qui nécessite de suivre une procédure précise. En premier, la surface givrante est abaissée afin d'y accéder facilement. Il faut alors s'assurer qu'elle est propre et que la mire est bien en place. Après ces vérifications, deux couches de film plastique (type film alimentaire) sont disposées sur la plaque afin de la protéger du givrage pendant le refroidissement. Le bain thermostaté est alors réglé à la température de consigne et déclenché. L'appareil met environ 2h30 pour atteindre la température de consigne (le temps de descente en température est impacté par la température de la pièce dans laquelle est situé le bain).

Une fois que le bain thermostaté a quasiment atteint sa température de consigne (à 0,5 °C), la chambre froide est démarrée. Elle est réglée en marche forcée. Dans le même temps, les ventilateurs sont actionnés afin que l'air circule dans la veine. La vitesse de l'air est ajustée à l'aide des registres placés dans la veine. Les résistances, qui sont chargées de la régulation de la température sont alors mises en marche, suivies du générateur de vapeur.

Au niveau de la section d'essais, il faut allumer la caméra infrarouge, l'appareil photo, les lampes LED, le Keithley et le PC. Une première acquisition est ensuite lancée pour visualiser la mise en régime des différents paramètres et vérifier leur stabilisation.

Une fois le régime permanent atteint côté eau glycolée et côté air, il est nécessaire de stopper le programme en cours et préparer l'acquisition du test.

L'étape qui suit consiste à mettre la surface givrante en place. Pour cela, les films plastiques qui avaient été ajoutés afin de protéger la surface de tout dépôt de givre non souhaité, doivent être retirés. Une fois les films enlevés, la plaque doit être remontée pour être placée à fleur de la veine. Il faut ensuite rapidement brancher les 10 thermocouples de la plaque en carbone afin de lancer l'acquisition au plus vite. Il est ensuite nécessaire d'ajuster les réglages de la caméra infrarouge et de vérifier ceux de l'appareil photo. Pour obtenir des photos de qualité, il est préférable de protéger l'appareil des perturbations extérieures à l'aide d'un drap noir opaque.

Une fois toutes ces étapes réalisées, l'acquisition du test peut être démarrée à l'aide du programme Labview.

Une fois le test terminé, il faut stopper l'acquisition, éteindre les différents appareils et s'occuper de la mesure de masse. Les 10 thermocouples de la plaque en carbone doivent être déconnectés et la plaque abaissée, pour des raisons pratiques. Les quatre raccords rapides qui permettent l'alimentation en eau glycolée doivent être déconnectés. La première pesée de la plaque peut ainsi être effectuée. La plaque doit ensuite être séchée, nettoyée et pesée de nouveau.

Pour finir, il faut reconnecter les raccords rapides pour préparer le test suivant.

Une description plus détaillée du protocole expérimental, adressée aux personnes souhaitant utiliser le banc d'essais, est proposée en annexe.

## 4.4 Grandeurs mesurées et incertitudes associées

Cette section décrit les grandeurs qui ont été mesurées ainsi que les incertitudes associées. Deux méthodes de calcul des incertitudes sont utilisées dans toute cette étude : la méthode de type A et celle de type B.

La méthode de type A consiste en l'évaluation de l'erreur aléatoire d'une mesure. Elle nécessite de réaliser un nombre important de mesures successives de la même grandeur  $Y$  afin d'en calculer la moyenne  $\bar{y}$  et l'écart type  $\sigma(Y)$ . Un facteur d'élargissement  $k_e$  est choisi égal à 2 afin d'obtenir un intervalle de confiance de 95,4 %. Ainsi, le résultat final prend la forme de :

$$Y = \bar{y} \pm k_e \cdot \sigma(Y) = \bar{y} \pm 2 \cdot \sigma(Y) = \bar{y} \pm \Delta_A(Y) \quad (4.1)$$

Dans cette équation,  $\Delta_A(Y) = k_e \cdot \sigma(Y)$  représente l'incertitude de type A de la grandeur  $y$ .

La méthode de type B (loi de propagation des incertitudes) permet d'évaluer l'erreur systématique d'une mesure. Elle est basée sur l'analyse de la technique de mesure de la grandeur  $Y$ ; de son modèle mathématique; des grandeurs d'influence et des informations disponibles concernant la variabilité possible due aux sources d'incertitude et à leur influence sur le mesurage. Cette méthode nécessite des essais et étalonnages antérieurs.

Dans le cas général où la valeur  $y$  d'une grandeur  $Y$  est déterminée à partir des  $n$  valeurs  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  d'autres grandeurs  $X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_n$  par une relation du type :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (4.2)$$

avec  $y$  la valeur brute du mesurande,  $f$  la relation fonctionnelle qui contient chaque grandeur et les  $x_i$  valeurs de  $n$  grandeurs mesurées  $X_i$ .

Il est nécessaire d'estimer chaque écart-type  $\sigma(X_i)$ . Après avoir vérifié l'indépendance des variables  $X_i$ , l'écart-type de la grandeur  $Y$  peut être exprimé comme :

$$\sigma(Y) = \left[ \sum_{i=1}^n \sigma(X_i)^2 \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.3)$$

Comme pour la méthode de type A, le facteur d'élargissement  $k_e$  est choisi égal à 2 afin d'obtenir le même intervalle de confiance de 95,4 %. Ainsi, le résultat final d'un calcul d'incertitude par la méthode de type B prend la forme de :

$$Y = y \pm k_e \cdot \sigma(Y) = y \pm 2 \cdot \sigma(Y) = y \pm \Delta(Y) \quad (4.4)$$

#### 4.4.1 Température

Les mesures de température se font à l'aide de trois types de capteurs :

- des thermocouples de type K simples réalisés au laboratoire à partir d'une bobine de paire torsadée fournie par *TC SA*.
- des thermocouples chemisés de type K, gaine inconel, achetés sur le site de *TC SA*. Ils ont un diamètre de 1 mm et une longueur de 300 mm. Ils sont principalement destinés à être disposés dans les sillons de la plaque en carbone, leur dimension est de ce fait adaptée à cette fonction. Deux autres sont utilisés pour mesurer la température de l'eau glycolée en entrée et sortie de plaque.
- un thermomètre proposé avec le capteur d'humidité Vaisala *HMT 337*.

Les six thermocouples réalisés au laboratoire sont utilisés pour mesurer la température de l'air circulant dans la veine. La température est mesurée en amont de la section d'essais. Les thermocouples ont été accrochés à la grille percée, en différentes positions, qui permettent de vérifier l'uniformité de la température dans la veine (cf. figure 4.15).

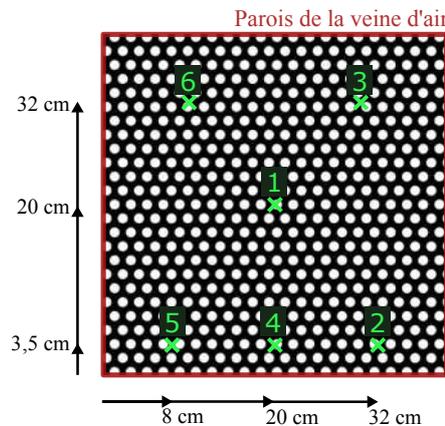


FIGURE 4.15 – Disposition des thermocouples sur la grille perforée

Dix des thermocouples chemisés sont placés sur la plaque en carbone (5 par face). Le thermomètre du Vaisala est placé en amont de la section d'essais. Les incertitudes de chaque thermocouple données par les constructeurs sont présentées ci-après :

$$\Delta T_{\text{laboratoire}} = \pm 0,25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.5)$$

$$\Delta T_{\text{TC}} = \pm 1,45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.6)$$

$$\Delta T_{\text{Vaisala}} = \pm 0,10 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.7)$$

Un étalonnage groupé de tous les thermocouples (à l'exception du Vaisala, étalonné par le constructeur avec un niveau de confiance de 95 %) respectant le protocole mis en place au sein du laboratoire a permis de corriger les mesures et d'obtenir une incertitude

réduite pour tous les thermocouples et la chaîne d'acquisition (Keithley + boîtier de soudure froide).

$$\Delta T_{\text{thermocouple}} = \pm 0,20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.8)$$

#### 4.4.2 Humidité relative

L'humidité relative est mesurée à l'aide d'un appareil Vaisala *HUMICAP HMT 330 (337)*. Le capteur est disposé en amont de la section d'essai, ce qui permet de connaître le taux d'humidité de l'air avant givrage. L'incertitude absolue de cette mesure est fournie par le fabricant de l'appareil :

$$\begin{cases} \text{de } 0 \text{ à } 40 \% : \Delta \text{HR}_{\text{Vaisala}} = \pm 0,6 \% \\ \text{de } 40 \text{ à } 97 \% : \Delta \text{HR}_{\text{Vaisala}} = \pm 1,0 \% \end{cases} \quad (4.9)$$

Cette valeur d'hygrométrie est comparée à celle obtenue avec le générateur de vapeur. La détermination de la valeur de l'incertitude effectuée par la sonde du générateur de vapeur est plus complexe à obtenir du fait de l'ancienneté de l'appareil. De plus, il existe un écart entre les deux valeurs d'humidité. Le capteur du Vaisala étant plus récent et de meilleure qualité, plus de crédit est apporté à ses mesures. La sonde du générateur de vapeur est alors recalée sur celle du Vaisala. Un coefficient de proportionnalité est déterminé à partir des mesures effectuées sur les deux appareils à différentes humidités relatives. Ce recalage permet de régler le générateur de vapeur en fonction des résultats fournis par la sonde Vaisala.

#### 4.4.3 Débit volumique de l'air

Le débit volumique de l'air est mesuré à l'aide de deux anémomètres à fil chaud EE75 de la marque *Electronik* placé en amont et en aval de la section d'essais. Ils mesurent des vitesses comprises entre 0 et  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . La mesure de vitesse du fluide permet de déduire le débit volumique, grâce à la connaissance des dimensions de la section dans laquelle il est situé. L'erreur sur la mesure de vitesse fournie par l'anémomètre est de  $0,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

$$\Delta v_{\text{air}} = \pm 0,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.10)$$

L'incertitude sur le débit volumique associée dépend de l'incertitude sur les mesures de la section  $S$  de la veine d'air dans laquelle est situé l'appareil.

$$\Delta L_{\text{gaine}} = \Delta l_{\text{gaine}} = \pm 0,01 \text{ m} \quad (4.11)$$

Le débit volumique est calculé par :

$$\dot{V} = S \cdot v_{\text{air}} \quad (4.12)$$

L'incertitude sur la section est :

$$\frac{\Delta S}{S} = \pm 4 \cdot \frac{\sigma(L_{\text{gaine}})}{L_{\text{gaine}}} \quad (4.13)$$

Les incertitudes annexes permettent de déterminer l'erreur commise sur la mesure du débit volumique de l'air s'écoulant sur la plaque mesuré avec l'anémomètre à fil chaud :

$$\frac{\Delta \dot{V}_{\text{anémomètre}}}{\dot{V}_{\text{anémomètre}}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(S)}{S} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(v_{\text{air}})}{v_{\text{air}}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.14)$$

#### 4.4.4 Débit volumique de l'eau glycolée

Le débitmètre utilisé pour mesurer le débit d'eau glycolée qui circule dans la plaque en aluminium est un *Kobold M1500*. Il peut mesurer des débits allant jusqu'à  $100 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . L'incertitude sur le débit n'est pas directement fournie par le constructeur, seule celle sur la vitesse du fluide est renseignée. L'incertitude sur la mesure de la vitesse de l'eau glycolée est de :

$$\sigma(v_{\text{EG}}) = \pm 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.15)$$

Il est nécessaire de calculer l'incertitude sur le débit volumique de l'eau glycolée qui est exprimé par :

$$\dot{V}_{\text{EG}} = v_{\text{EG}} \cdot S_{\text{tuyau}} \quad (4.16)$$

L'incertitude sur la section du tuyau s'exprime par :

$$\frac{\Delta S_{\text{tuyau}}}{S_{\text{tuyau}}} = \pm 2 \cdot \frac{\sigma(D_{\text{tuyau}})}{D_{\text{tuyau}}} \quad (4.17)$$

L'incertitude sur le débit volumique d'eau glycolée est ainsi exprimée par :

$$\frac{\Delta \dot{V}_{\text{EG}}}{\dot{V}_{\text{EG}}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(v_{\text{EG}})}{v_{\text{EG}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(S_{\text{tuyau}})}{S_{\text{tuyau}}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.18)$$

#### 4.4.5 Masse du givre

La masse du givre est mesurée à l'aide d'une balance *Kern FKB 16K0.1*. L'incertitude de la balance est :

$$\Delta m_{\text{givre}} = \pm 0,1 \text{ g} \quad (4.19)$$

#### 4.4.6 Épaisseur du givre

L'épaisseur du givre est calculée à partir des photos prises lors des tests. L'épaisseur est déterminée à l'aide d'un programme de traitement d'images réalisé sur Labview. Dans un premier temps les photos prises pendant les tests sont égalisées à l'aide d'une fonction qui permet de redistribuer la valeur des pixels. Elles sont ensuite découpées pour éliminer la mire au niveau de laquelle une excroissance du givre est nettement identifiable. En effet, la mire crée localement des perturbations notamment au niveau de l'écoulement, ce qui favorise les transferts thermiques. La sur-épaisseur de givre à cet endroit ne correspond pas au phénomène réel de givrage qui doit être observé. C'est pourquoi la zone de la mire n'intervient pas dans le programme de traitement d'images. Une fois découpées, les photos sont seuillées et un filtre de Sobel leur est appliqué afin de rendre plus identifiable le lieu de croissance du givre. La figure 4.16 présente le processus de traitement des images qui est appliqué à chaque photo. Une fois filtrées, les photos sont comparées deux à deux à l'aide d'une fonction d'auto-corrélation qui permet d'estimer les variations d'une photo par rapport à la précédente. Les indices de lignes des pixels auxquels la variation a été observée (qui correspond à l'interface entre l'air et le givre) sont alors calculés et moyennés afin d'obtenir un indice moyen sur la couche de givre considérée. La mire sert elle à déterminer l'échelle, c'est à dire la relation entre le nombre de pixels et l'épaisseur réelle du givre. La largeur de la mire a été mesurée avec précision (à  $\pm 0,01 \text{ mm}$ ) à l'aide d'un pied à coulisse. Le nombre de pixels correspondant à cette largeur est définie pour chaque jeu de photos à l'aide d'un tracé (cf. figure 4.16). L'épaisseur peut ainsi être déduite.

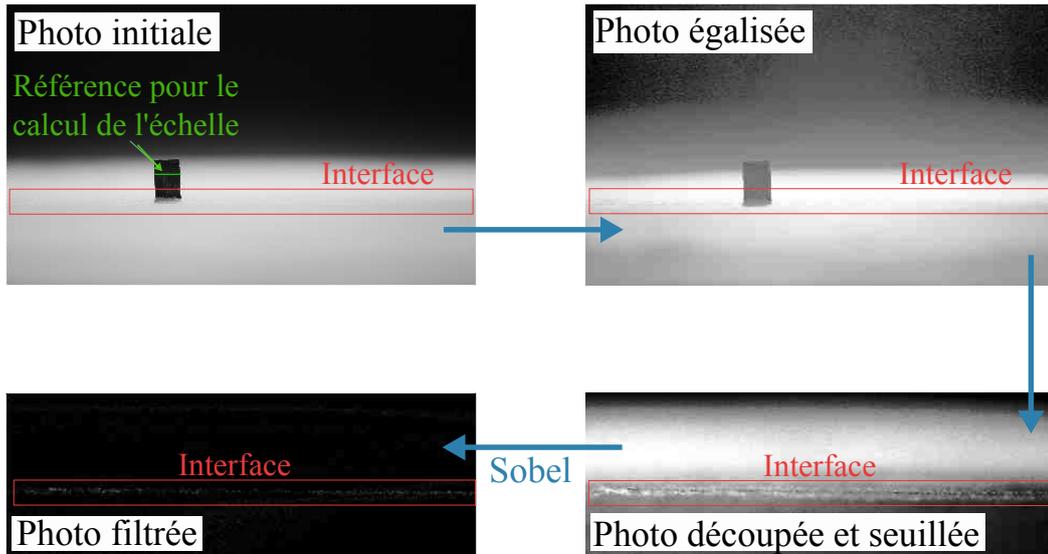


FIGURE 4.16 – Procédure de traitement des photos pour le calcul de l'épaisseur du givre

L'incertitude sur l'épaisseur dépend de l'incertitude sur l'échelle. Elle est exprimée par :

$$\frac{\Delta e_{\text{givre}}}{e_{\text{givre}}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(L_{\text{mire}})}{L_{\text{mire}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(nb_{\text{pix},\text{échelle}})}{nb_{\text{pix},\text{échelle}}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.20)$$

Une copie du diagramme du programme Labview utilisé pour faire les calculs est disponible en annexe.

## 4.5 Grandeurs calculées et incertitudes associées

Ce chapitre présente les différentes grandeurs calculées à partir des résultats expérimentaux. La figure 4.17 présente un schéma des grandeurs mis en jeu dans le cas du dispositif expérimental.

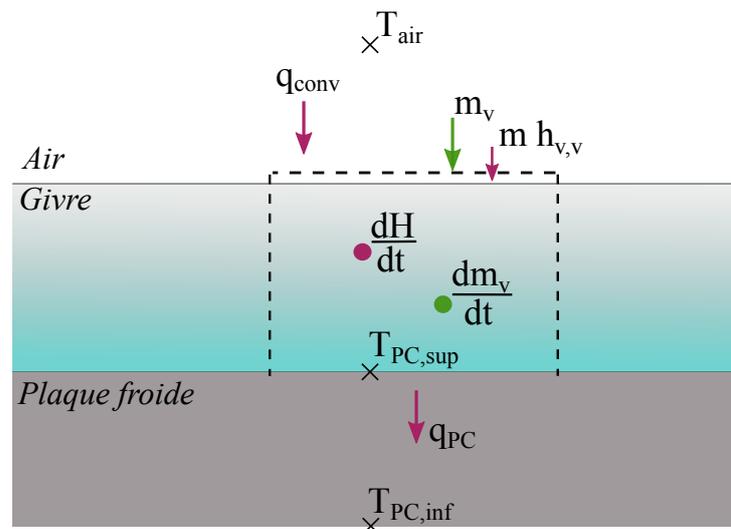


FIGURE 4.17 – Illustration du phénomène de givrage sur le montage expérimental

### 4.5.1 Flux de chaleur par conduction transféré dans la plaque en carbone

Le flux de chaleur conductif dans la plaque en carbone transféré de l'air à la plaque refroidie via la couche de givre est exprimé par :

$$Q_{PC} = \frac{\lambda_{PC}}{e_{PC}} \cdot S_{PC} \cdot (T_{PC,sup} - T_{PC,inf}) \quad (4.21)$$

avec l'acronyme PC correspondant à Plaque Carbone.

Pour déterminer ce flux de chaleur, il est nécessaire de connaître la valeur de la conductivité thermique de la plaque en carbone. La conductivité thermique s'exprime par :

$$\lambda_{PC} = \alpha_{PC} \cdot \rho_{PC} \cdot c_{p,PC} \quad (4.22)$$

Son incertitude se calcule avec l'équation :

$$\frac{\Delta\lambda_{PC}}{\lambda_{PC}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(\alpha_{PC})}{\alpha_{PC}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(\rho_{PC})}{\rho_{PC}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(c_{p,PC})}{c_{p,PC}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.23)$$

Le tableau 4.3 présente les grandeurs et les incertitudes associées qui ont permis de déterminer la valeur de la conductivité thermique de la plaque.

TABLEAU 4.3 – Valeurs des grandeurs nécessaires au calcul de la conductivité thermique de la plaque en carbone

Nom de la grandeur	Valeur de la grandeur	Incertitude associée
Chaleur massique [J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	$c_{p,PC} = 2,85 \cdot T + 644,22$	43,1
Diffusivité thermique apparente [10 <sup>-6</sup> · m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]	$\alpha_{PC} = -0,009 \cdot T + 5,837$	0,3
Masse [kg]	échantillon	1 × 10 <sup>-5</sup>
Longueur [m]	échantillon	1 × 10 <sup>-5</sup>
Volume [m <sup>3</sup> ]	échantillon	3,7 × 10 <sup>-9</sup>
Masse volumique [kg · m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{PC} = 1809$	2,7

Ainsi, les mesures donnent :

$$\lambda_{PC} = 0,02 \cdot T + 6,77 \pm 0,00015 \cdot T + 0,57 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.24)$$

À partir des incertitudes des différents paramètres, il est possible de calculer l'incertitude sur le flux échangé :

$$\frac{\Delta Q_{PC}}{Q_{PC}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(\lambda_{PC})}{\lambda_{PC}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(e_{PC})}{e_{PC}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(S_{PC})}{S_{PC}} \right)^2 + 4 \cdot \left( \frac{\sigma(T_{\text{thermocouple}})}{T_{PC,sup} - T_{PC,inf}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.25)$$

## 4.5.2 Flux de chaleur sur l'eau glycolée

Le bilan sur l'eau glycolée est exprimée par :

$$Q_{EG} = \dot{V}_{EG} \cdot \rho_{EG} \cdot c_{p,EG} \cdot (T_{EG,s} - T_{EG,e}) \quad (4.26)$$

L'incertitude sur le flux d'eau glycolée est donnée par :

$$\frac{\Delta Q_{EG}}{Q_{EG}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(\dot{V}_{EG})}{\dot{V}_{EG}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(\rho_{EG})}{\rho_{EG}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(c_{p,EG})}{c_{p,EG}} \right)^2 + 4 \cdot \left( \frac{\sigma(T_{\text{thermocouple}})}{(T_{EG,s} - T_{EG,e})} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.27)$$

Les valeurs de la masse volumique et de la capacité thermique de l'eau glycolée ont été déterminées à partir des données de *Lauda*, le fournisseur du Kryo 30, disponible en annexe. Les incertitudes de chacun de ces paramètres ont été évaluées à :

$$\sigma(\rho_{EG}) = \pm 0,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.28)$$

$$\sigma(c_{p,EG}) = \pm 2,0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.29)$$

## 4.5.3 Flux et coefficients d'échange

Le givrage de l'eau contenue dans l'air conduit à des transferts de chaleur et de masse. Les coefficients de transferts sont déterminés à partir des mesures expérimentales. Le calcul de ces coefficients n'est pas trivial, il requiert l'écriture de deux bilans et de deux équations de transfert de masse et d'enthalpie. Pour identifier les différentes grandeurs et comprendre les phénomènes intervenant, il est nécessaire de se reporter à la figure 4.17. En effet, les puissances échangées contribuent à l'épaississement mais aussi à la densification du givre. Ainsi, une partie de la chaleur transmise est stockée dans la couche de givre.

Les différentes hypothèses formulées pour traduire les phénomènes physiques sont les suivantes :

- Les phénomènes de transferts de masse et de chaleur sont supposés quasi stationnaires et unidimensionnels dans la couche de givre ;
- La couche de givre est supposée uniforme le long de la plaque (croissance unidimensionnelle) ;
- L'air humide au niveau de l'interface air/givre est supposé à saturation ;
- Le givre se forme par sublimation inverse ;
- L'analogie de Lewis est applicable.

Le bilan de masse réalisé sur le volume de contrôle permet d'exprimer le débit d'eau venant givrer à la surface de la plaque :

$$\frac{dm_v}{dt} = \dot{m}_v \quad (4.30)$$

Avec  $m_v$  et  $\dot{m}_v$  respectivement la masse et le débit de vapeur d'eau qui entre au contact de la couche de givre. Le bilan enthalpique réalisé sur ce même volume de contrôle fourni :

$$\frac{dH}{dt} = \dot{Q}_{\text{air}} + \dot{m}_v \cdot h_{v,v} - \dot{Q}_{\text{PC}} \quad (4.31)$$

Avec  $H = m_v (h_s + c_{p,\text{givre}} \cdot T + h_0)$ .

Dans ces équations,  $H$  est l'enthalpie du système,  $h_{v,v}$ ,  $h_s$  et  $h_0$  correspondent respectivement à l'enthalpie massique de l'eau à saturation sous forme vapeur, sous forme solide et à l'enthalpie de référence et  $c_{p,\text{givre}}$  la capacité thermique massique du givre.

Après transformation, la combinaison des deux équations donne :

$$\dot{Q}_{PC} = \dot{Q}_{air} + \dot{m}_v \cdot \Delta h_{sub} - m_v \cdot c_{p,givre} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.32)$$

avec  $\Delta h_{sub} = h_{v,v} - h_s$  l'enthalpie de changement d'état par sublimation.

L'équation de transfert de masse fournit :

$$\dot{m}_v = h_m \cdot S_{plaque} (\omega_{air} - \omega_f) \quad (4.33)$$

avec  $h_m$  le coefficient de transfert de masse et  $\omega_{air}$  et  $\omega_f$  les humidités absolues évaluées respectivement à la température et humidité relative de l'air et à la température du givre à saturation (HR=100 %).

L'équation de transfert d'enthalpie s'exprime par :

$$\dot{Q}_{air} = h_{air} \cdot S_{plaque} (T_{air} - T_f) \quad (4.34)$$

avec  $h_{air}$  le coefficient d'échange convectif.

Au final, l'équation de bilan obtenue est :

$$\dot{Q}_{PC} = h_{air} S_{plaque} (T_{air} - T_f) + h_m \Delta h_{sub} S_{plaque} (\omega_{air} - \omega_f) - m_v c_{p,givre} \frac{dT}{dt} \quad (4.35)$$

Après vérification, le dernier terme a été identifié comme étant très faible. Il peut donc être largement négligé. La densité de flux échangée au sein du système est finalement exprimée par :

$$q_{PC} = h_{air} (T_{air} - T_f) + h_m \Delta h_{sub} (\omega_{air} - \omega_f) \quad (4.36)$$

Cette équation présente donc deux inconnues :  $h_{air}$  et  $h_m$ .

Pour palier cette difficulté, l'analogie de Lewis est souvent privilégiée dans la littérature. Le nombre de Lewis compare les contributions des diffusivités thermique et massique. Il s'exprime par :

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (4.37)$$

avec  $Sc = \frac{\nu}{D}$  le nombre de Schmidt, relatif aux transferts par diffusion massique et  $Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$  le nombre de Prandtl, relatif aux transferts par diffusivité thermique.

L'analogie de Lewis consiste à supposer que les nombres de Nusselt et de Sherwood, caractérisant les transferts thermique et massique, sont respectivement proportionnels aux nombres de Prandtl et Schmidt à la puissance  $n$ . Ce qui conduit à :

$$\frac{Nu}{Pr^n} = \frac{Sh}{Sc^n} \quad (4.38)$$

Après développement et simplification (la puissance  $n$  est souvent estimée à  $\frac{2}{3}$ ), l'équation (4.38) donne :

$$h_m = \frac{h_{air}}{c_{p,air} \cdot Le^{\frac{2}{3}}} \quad (4.39)$$

Dans la littérature qui traite des problématiques de givrage, les transferts par diffusion thermique et massique sont supposés équivalents ( $Le = 1$ ). Ainsi le coefficient de transfert de masse est exprimé en fonction du coefficient de transfert thermique (équation (4.40)). L'équation (4.36) ne possède plus qu'une inconnue, ce qui permet de calculer les deux coefficients de transfert.

$$h_m = \frac{h_{\text{air}}}{c_{p,\text{air}}} \quad (4.40)$$

### Coefficient de transfert de chaleur

L'analogie de Lewis permet de déduire le coefficient de transfert convectif :

$$h_{\text{air}} = \frac{q_{\text{PC}}}{(T_{\text{air}} - T_f) + \frac{\Delta h_{\text{sub}}}{c_{p,\text{air}}} (\omega_{\text{air}} - \omega_f)} \quad (4.41)$$

L'incertitude du coefficient convection est exprimée par :

$$\begin{aligned} \Delta h_{\text{air}} = \pm 2 \cdot & \left[ \left( \frac{\sigma(q_{\text{PC}})}{(T_{\text{air}} - T_f) + \Delta h_{\text{sub}}/c_{p,\text{air}} \cdot (\omega_{\text{air}} - \omega_f)} \right)^2 \right. \\ & + \left( \frac{\sigma(T_{\text{air}}) \cdot q_{\text{PC}}}{[(T_{\text{air}} - T_f) + \Delta h_{\text{sub}}/c_{p,\text{air}} \cdot (\omega_{\text{air}} - \omega_f)]^2} \right)^2 \\ & + \left( \frac{\sigma(T_f) \cdot q_{\text{PC}}}{[(T_{\text{air}} - T_f) + \Delta h_{\text{sub}}/c_{p,\text{air}} \cdot (\omega_{\text{air}} - \omega_f)]^2} \right)^2 \\ & + \left( \frac{\sigma(\Delta h_{\text{sub}}) \cdot q_{\text{PC}} \cdot \omega_{\text{air}}/c_{p,\text{air}}}{[(T_{\text{air}} - T_f) + \Delta h_{\text{sub}}/c_{p,\text{air}} \cdot (\omega_{\text{air}} - \omega_f)]^2} \right)^2 \\ & + \left( \frac{\sigma(\omega_{\text{air}}) \cdot q_{\text{PC}} \cdot \Delta h_{\text{sub}}/c_{p,\text{air}}}{[(T_{\text{air}} - T_f) + \Delta h_{\text{sub}}/c_{p,\text{air}} \cdot (\omega_{\text{air}} - \omega_f)]^2} \right)^2 \\ & + \left( \frac{\sigma(\omega_f) \cdot q_{\text{PC}} \cdot \Delta h_{\text{sub}}/c_{p,\text{air}}}{[(T_{\text{air}} - T_f) + \Delta h_{\text{sub}}/c_{p,\text{air}} \cdot (\omega_{\text{air}} - \omega_f)]^2} \right)^2 \\ & \left. + \left( \frac{\sigma(c_{p,\text{air}}) \cdot q_{\text{PC}}/c_{p,\text{air}}^2}{[(T_{\text{air}} - T_f) + \Delta h_{\text{sub}}/c_{p,\text{air}} \cdot (\omega_{\text{air}} - \omega_f)]^2} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.42) \end{aligned}$$

### Coefficient de transfert de masse

Une fois le coefficient de transfert de chaleur déterminé, le coefficient de transfert de masse est calculé à partir du coefficient de transfert de chaleur  $h_{\text{air}}$ , et de l'hypothèse de Lewis. Le coefficient de transfert de masse est déduit de l'équation (4.36) :

$$h_m = \frac{q_{\text{PC}} - h_{\text{air}} \cdot (T_{\text{air}} - T_f)}{\Delta h_{\text{sub}} \cdot (\omega_{\text{air}} - \omega_f)} \quad (4.43)$$

L'incertitude du coefficient de transfert de masse est donnée par :

$$\begin{aligned} \Delta h_m = \pm 2 \cdot & \left[ \left( \frac{\sigma(q_{PC})}{\Delta h_{sub} \cdot (\omega_{air} - \omega_f)} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(h_{air}) \cdot (T_{air} - T_f)}{\Delta h_{sub} \cdot (\omega_{air} - \omega_f)} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(T_{air}) \cdot h_{air}}{\Delta h_{sub} \cdot (\omega_{air} - \omega_f)} \right)^2 \right. \\ & + \left( \frac{\sigma(T_f) \cdot h_{air}}{\Delta h_{sub} \cdot (\omega_{air} - \omega_f)} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(\Delta h_{sub}) \cdot (q_{PC} - h_{air}) \cdot (\omega_{air} - \omega_f)}{(\Delta h_{sub} \cdot (\omega_{air} - \omega_f))^2} \right)^2 \\ & + \left( \frac{\sigma(\omega_{air}) \cdot (q_{PC} - h_{air}) \cdot (T_{air} - T_f) \cdot \Delta h_{sub}}{(\Delta h_{sub} \cdot (\omega_{air} - \omega_f))^2} \right)^2 \\ & \left. + \left( \frac{\sigma(\omega_w) \cdot (q_{PC} - h_{air}) \cdot (T_{air} - T_f) \cdot \Delta h_{sub}}{(\Delta h_{sub} \cdot (\omega_{air} - \omega_f))^2} \right)^2 \right]^{0,5} \end{aligned} \quad (4.44)$$

#### 4.5.4 Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds de l'écoulement dans la veine d'air est calculé. Il représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses et s'exprime par :

$$Re_{air} = \frac{\rho_{air} \cdot v_{air} \cdot D_h}{\mu_{air}} \quad (4.45)$$

L'erreur commise sur le diamètre hydraulique est nécessaire au préalable :

$$\frac{\Delta D_h}{D_h} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(S)}{S} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(P)}{P} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.46)$$

avec  $P = 4 \cdot L_{gain}$  et donc  $\frac{\Delta P}{P} = \pm 2 \cdot \frac{\sigma(L_{gain})}{L_{gain}}$

L'incertitude sur le nombre de Reynolds est :

$$\frac{\Delta Re_{air}}{Re_{air}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(\rho_{air})}{\rho_{air}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(v_{air})}{v_{air}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(D_h)}{D_h} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(\mu_{air})}{\mu_{air}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.47)$$

#### 4.5.5 Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt est utilisé pour caractériser les transferts à l'interface entre l'air et le givre. Il représente le rapport entre les transferts par convection et par conduction. Il dépend fortement du coefficient d'échange  $h_{air}$  :

$$Nu = \frac{h_{air} \cdot L_{plaque}}{\lambda_{air}} \quad (4.48)$$

L'incertitude sur le nombre de Nusselt est exprimée par :

$$\frac{\Delta Nu}{Nu} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(h_{air})}{h_{air}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(L_{plaque})}{L_{plaque}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(\lambda_{air})}{\lambda_{air}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.49)$$

## 4.5.6 Masse volumique du givre

La masse volumique du givre est calculée à partir des mesures de masse et d'épaisseur du givre (Equation 4.50).

$$\rho_{\text{givre}} = \frac{m_{\text{givre}}}{V_{\text{givre}}} \quad (4.50)$$

Il est supposé que le givre se forme de manière unidimensionnelle sur le feuillard. Cette hypothèse est à la fois basée sur des résultats de la littérature dont les montages expérimentaux sont proches de celui réalisé dans le cadre de ce projet (Hermes et al. [24], Lee et al. [44]) mais aussi sur des observations faites pendant les tests. Ainsi, le volume du givre s'exprime par :

$$V_{\text{givre}} = e_{\text{givre}} \cdot l_{\text{plaque}} \cdot L_{\text{plaque}} = e_{\text{givre}} \cdot L_{\text{plaque}}^2 \quad (4.51)$$

L'incertitude sur le volume donne :

$$\frac{\Delta V_{\text{givre}}}{V_{\text{givre}}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(e_{\text{givre}})}{e_{\text{givre}}} \right)^2 + \left( 2 \cdot \frac{\sigma(L_{\text{plaque}})}{L_{\text{plaque}}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.52)$$

L'incertitude sur la masse volumique s'exprime par :

$$\frac{\Delta \rho_{\text{givre}}}{\rho_{\text{givre}}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(m_{\text{givre}})}{m_{\text{givre}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(V_{\text{givre}})}{V_{\text{givre}}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.53)$$

## 4.5.7 Conductivité thermique effective du givre

La conductivité thermique du givre est calculée à partir de la mesure du flux de chaleur, de l'épaisseur du givre, de la température de surface du givre et de la température de la face supérieure de la plaque carbone (4.54).

$$\lambda_{\text{givre}} = \frac{q_{\text{PC}} \cdot e_{\text{givre}}}{T_{\text{givre}} - T_{\text{PC, sup}}} \quad (4.54)$$

L'incertitude sur la conductivité thermique s'exprime par :

$$\frac{\Delta \lambda_{\text{givre}}}{\lambda_{\text{givre}}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(q_{\text{PC}})}{q_{\text{PC}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(e_{\text{givre}})}{e_{\text{givre}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(T_{\text{givre}})}{T_{\text{givre}} - T_{\text{PC, sup}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(T_{\text{PC, sup}})}{T_{\text{givre}} - T_{\text{PC, sup}}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.55)$$

## 4.5.8 Vitesse de givrage

La vitesse de givrage est déterminée à partir de l'épaisseur du givre :

$$v_{\text{givrage}} = \frac{\Delta e_{\text{givre}}}{\Delta t} \quad (4.56)$$

L'incertitude de la vitesse de givrage est donnée par :

$$\frac{\Delta v_{\text{givrage}}}{v_{\text{givrage}}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(\Delta e_{\text{givre}})}{\Delta e_{\text{givre}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(\Delta t)}{\Delta t} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.57)$$

### 4.5.9 Vitesse massique de givrage

Le débit masse de givre est calculé à partir de la masse de givre déposé sur le feillard et de l'intervalle de temps entre les mesures.

$$\dot{m}_{\text{givrage}} = \frac{\Delta m_{\text{givre}}}{\Delta t} \quad (4.58)$$

La vitesse massique de givrage est ainsi déduite à partir du débit masse de givre :

$$v_{\text{m,givrage}} = \frac{\dot{m}_{\text{givrage}}}{S_{\text{givre}}} = \frac{\Delta m_{\text{givre}}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{L_{\text{plaque}}^2} \quad (4.59)$$

L'incertitude de la vitesse massique de givrage est ainsi calculée :

$$\frac{\Delta v_{\text{m,givrage}}}{v_{\text{m,givrage}}} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{\sigma(\Delta m_{\text{givre}})}{\Delta m_{\text{givre}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(\Delta t)}{\Delta t} \right)^2 + \left( 4 \cdot \frac{\sigma(L_{\text{plaque}})}{L_{\text{plaque}}} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.60)$$

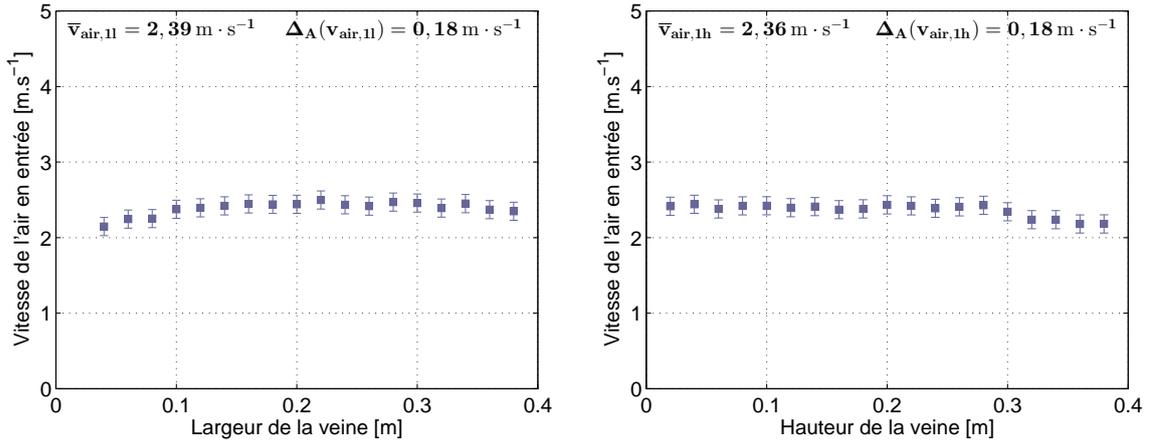
Les principales équations qui seront utilisées lors de l'exploitation des résultats ont été présentées. La suite de ce chapitre met en avant les tests préliminaires qui ont été réalisés.

## 4.6 Qualification du banc d'essais

Cette partie a pour but de qualifier le banc d'essais. L'objectif est de vérifier que chaque élément isolé fourni des résultats cohérents. Sont ainsi vérifiés, l'homogénéité de la vitesse, de la température et de l'humidité de l'air ; la conservation de l'énergie à l'aide de deux bilans effectués sur la plaque en carbone et l'eau glycolée ; la température de surface du givre et la mesure de l'épaisseur du givre. Cette section permet donc d'avoir une meilleure connaissance du banc d'essais.

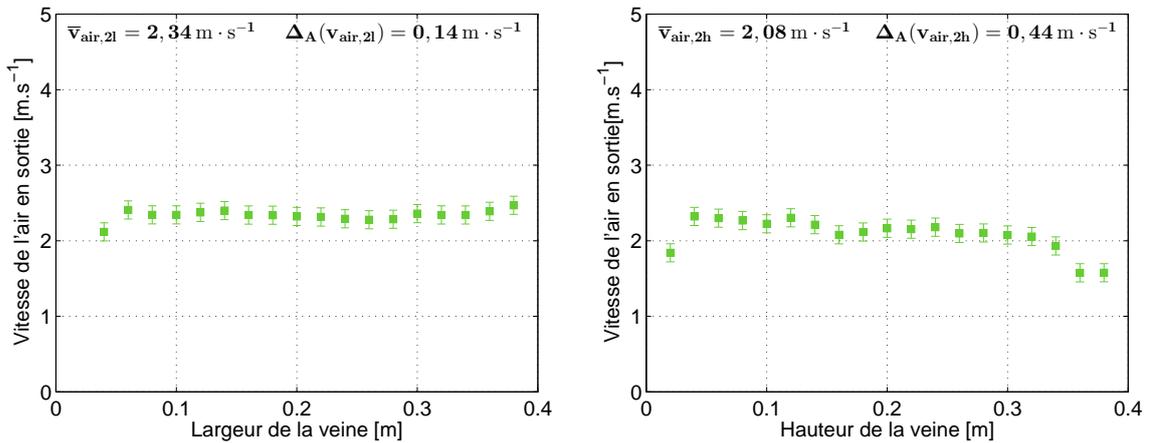
### 4.6.1 Vitesse de l'air

Dans cette section, l'homogénéité de la vitesse d'air est vérifiée. Pour cela, les anémomètres placés en amont et en aval de la section d'essais sont déplacés horizontalement et verticalement dans le plan dans lequel ils sont situés. Chaque sonde mesure la vitesse de l'air tous les deux centimètres sur l'horizontale située à 10 cm du bas de la veine et sur la verticale située au centre de la veine, soit à 20 cm des parois. La figure 4.18 présente l'évolution de la vitesse en fonction de la largeur et de la hauteur de la veine en amont de la section de tests. La figure 4.19 montre les résultats équivalents obtenus en aval de la section de tests. Les figures obtenues mettent en avant un profil de vitesses d'écoulement turbulent. Des effets de bords sont identifiés proche des parois. En dehors de la couche limite dynamique, la vitesse varie peu. Pour plus de précisions, les incertitudes de type A obtenues pour chaque jeu de données sont présentées sur les figures. L'incertitude la plus importante (avec un intervalle de précision de 95,4 % pour rappel) a une valeur de 0,44. Au vu des études menées dans la littérature quant à l'impact de la vitesse sur la formation du givre, ces résultats sont tout à fait acceptables. Hermes et al. [24] montrent en effet qu'une variation de  $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  n'a pas d'influence sur la formation du givre. La géométrie de la veine est adaptée aux tests qui vont y être réalisés.



(a) Évolution de la vitesse d'air dans la largeur de la veine (b) Évolution de la vitesse d'air dans la hauteur de la veine

FIGURE 4.18 – Répartition de la vitesse d'air en amont de la section de tests



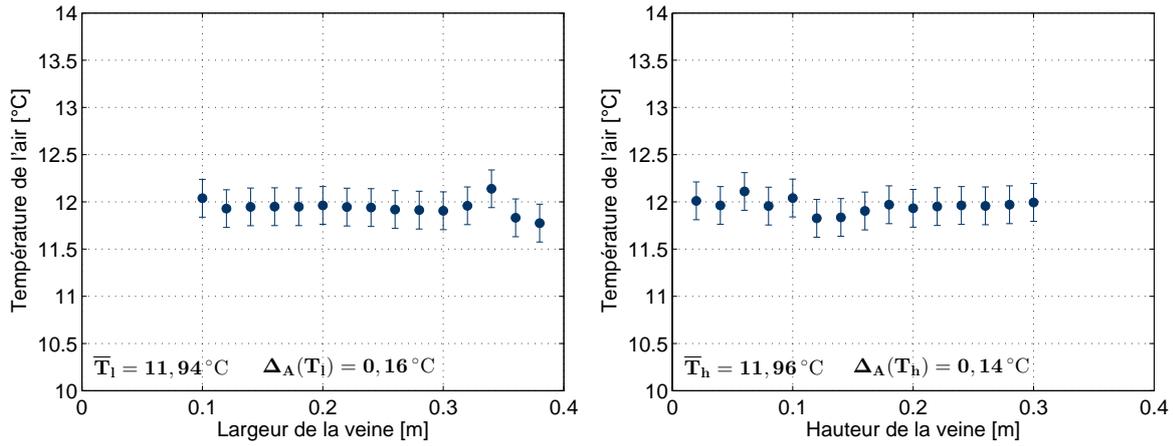
(a) Évolution de la vitesse d'air dans la largeur de la veine (b) Évolution de la vitesse d'air dans la hauteur de la veine

FIGURE 4.19 – Répartition de la vitesse d'air en aval de la section de tests

## 4.6.2 Température de l'air

Cette partie a pour but d'évaluer la répartition de la température de l'air dans la veine. Pour cela, la même méthode que celle utilisée lors de la qualification de la vitesse de l'air est mise en place. Le capteur de température est déplacé en amont de la section de tests sur les axes centraux horizontal et vertical de la veine (soit à 20 cm des parois). Le capteur est déplacé tous les 2 cm. Cette étude est complétée par une acquisition de données de 6 thermocouples au cours du temps placés sur la grille d'homogénéisation de l'air.

La figure 4.20 présente les résultats obtenus. Les températures mesurées dans la largeur et la hauteur de la veine varient très peu en fonction de la position. Ces deux graphiques présentent moins de points que ceux présentés pour la répartition vitesse, notamment à proximité des parois. Cette différence s'explique par la géométrie du capteur de température qui n'a pas permis de le déplacer jusqu'au bord des parois. Étant donné la



(a) Évolution de la température de l'air dans la largeur de la veine (b) Évolution de la température de l'air dans la hauteur de la veine

FIGURE 4.20 – Répartition de la température de l'air dans la veine

fiabilité des résultats obtenus, ce problème ne semble pas être contraignant. D'autant plus que les mesures effectuées par les thermocouples situés sur la grille viennent compléter ces premiers résultats. La figure 4.21 présente les résultats mesurés au niveau des thermocouples. Les températures moyennes de chaque thermocouple ainsi que les incertitudes de type A viennent apporter des informations supplémentaires. Les thermocouples numéro 2, 3, 4, 5, 6 fournissent des valeurs de températures très proches. Seul le thermocouple numéro 1 fournit des résultats un peu plus éloignés, ce qui est probablement dû à sa position. Il est en effet situé au centre de la veine tout comme la sonde de température de l'hygromètre qui présente une géométrie plus imposante. Sa taille peut éventuellement perturber l'écoulement d'air que voit le thermocouple, situé dans son sillage. Néanmoins, ces tests restent cohérents avec ceux effectués lors du déplacement de la sonde de l'hygromètre. L'incertitude de type A obtenue sur la

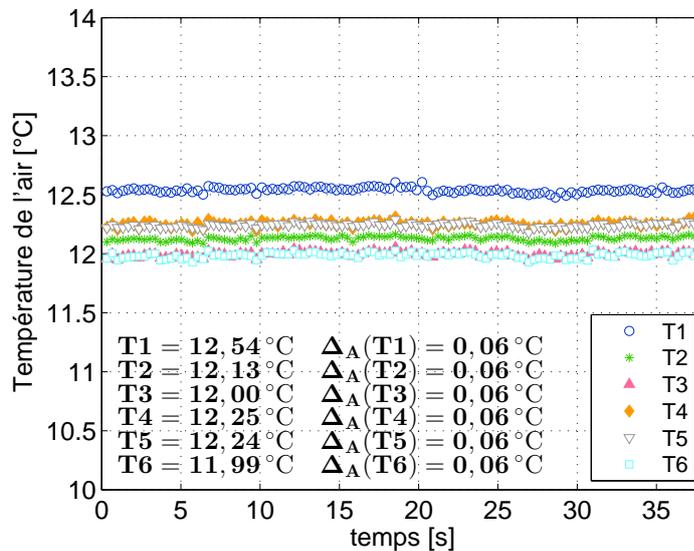


FIGURE 4.21 – Variations des températures fournies par les thermocouples placés sur la grille d'homogénéisation

totalité des mesures effectuées sur les thermocouples de la grille est de 0,4 °C. Ce type d'incertitude (dont le thermocouple numéro 1 est fortement responsable) est tout à fait acceptable pour les tests qui vont être réalisés par la suite.

Les deux études couplées permettent de valider la répartition de la température de l'air dans la veine, résultat qui est en accord avec la répartition des vitesses d'air.

### 4.6.3 Humidité de l'air

Cette section vise à qualifier la répartition de la vapeur d'eau dans la veine d'air. La technique est la même que précédemment. La sonde hygrométrique est déplacée en amont de la section d'essais sur l'axe horizontal à 10 cm du bas de la veine et sur l'axe central vertical de la veine (soit à 20 cm des parois). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.22. Comme pour les résultats précédents, les incertitudes de type A viennent compléter les graphes obtenus. La vapeur d'eau se répartie de manière homogène dans la veine puisque l'incertitude maximale n'est que de 0,66 %.

### 4.6.4 Bilans thermiques et thermodynamiques

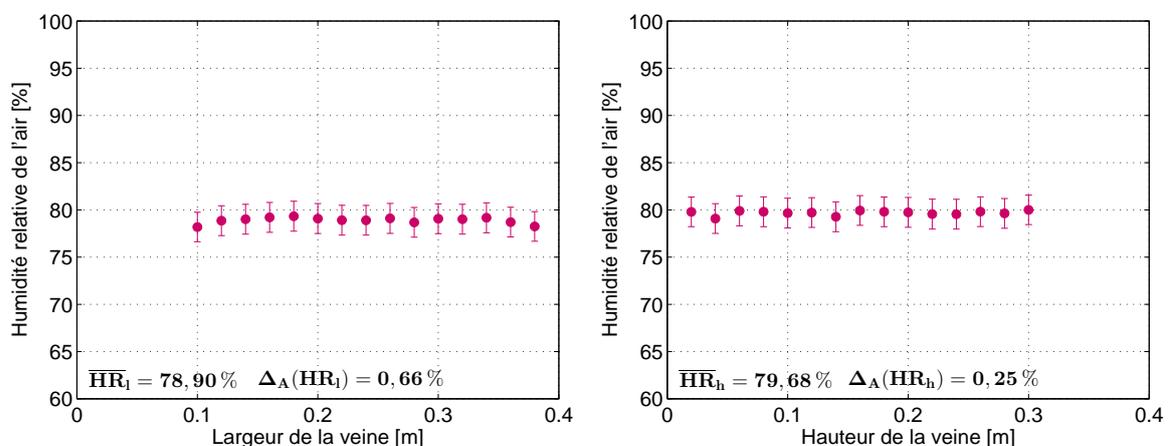
Cette partie a pour objectif principal de vérifier que la quantité de chaleur transmise par la plaque en carbone correspond bien à celle reçue du bain thermostaté. Pour cela, deux bilans sur les flux sont effectués, l'un sur l'eau glycolée, l'autre sur la plaque en carbone. Les deux calculs effectués sont les suivants :

$$\dot{Q}_{PC} = \frac{\lambda_{PC}}{e_{PC}} \cdot S_{PC} \cdot (T_{PC,sup} - T_{PC,inf}) \quad (4.61)$$

$$\dot{Q}_{EG} = \dot{V}_{EG} \cdot \rho_{EG} \cdot c_{p,EG} \cdot (T_{EG,s} - T_{EG,e}) \quad (4.62)$$

Deux tests à des conditions différentes ont été réalisés afin d'observer les résultats obtenus pour deux flux différents.

Les figures 4.23a et 4.23b montrent que le flux conductif dans la plaque en carbone est beaucoup plus stable et précis que celui calculé à partir du bilan thermodynamique



(a) Évolution de l'humidité relative de l'air dans la largeur de la veine (b) Évolution de l'humidité relative de l'air dans la hauteur de la veine

FIGURE 4.22 – Répartition de l'humidité relative de l'air dans la veine

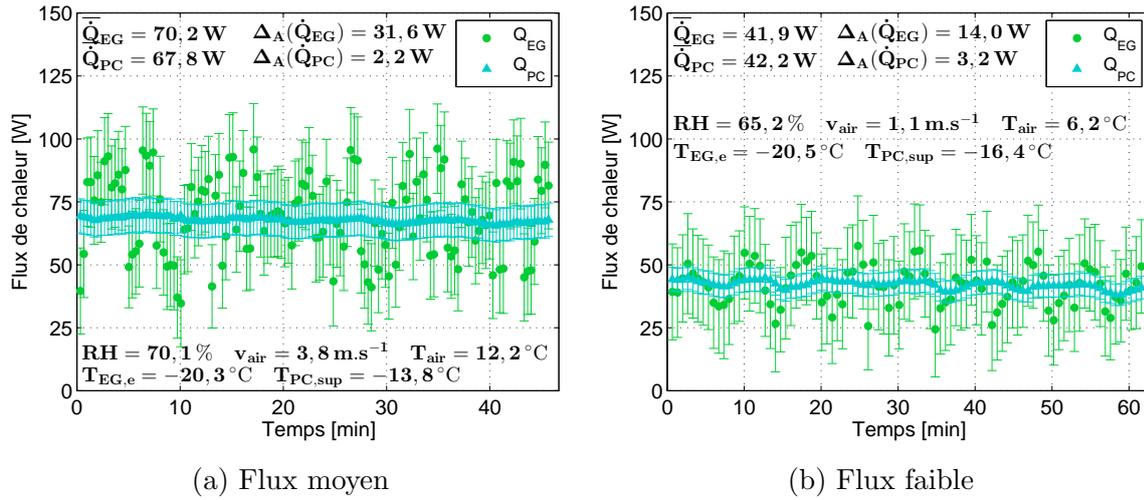


FIGURE 4.23 – Vérification de l'égalité des bilans thermiques et thermodynamiques

effectué sur l'eau glycolée. Celui-ci est en effet plus instable à cause du débit d'eau glycolée qui ne reste pas constant au cours du test (phénomène dû au bain thermostaté) et de la faible différence de températures entre l'entrée et la sortie de la plaque en aluminium. Ces deux paramètres (le débit et la différence de températures) sont multipliés par deux paramètres de valeurs élevées : la masse volumique et la capacité thermique. Ainsi, une petite variation du débit ou de la différence de températures peut avoir de fortes conséquences sur la valeur du flux. C'est pour cela que les valeurs des incertitudes de type A (écrites sur les figures) et de type B (représentée par les barres d'erreur sur les figures) sont nettement plus importantes pour le flux sur l'eau glycolée que pour celui dans la plaque en carbone. Néanmoins, pour chacun des graphiques, les deux flux calculés sont cohérents.

Pour compléter, deux autres tests ont été effectués à des conditions différentes afin de vérifier les bilans à différents flux. Les conditions de tests sont répertoriées dans le tableau 4.4.

La figure 4.24 illustre la conservation de l'énergie pour les différents flux. Que le flux soit faible ou plus élevé, l'énergie reste conservée. Ce graphe montre aussi les incertitudes de type B relatives à chacun des flux calculés. Comme pour les précédentes figures, l'incertitude sur le bilan effectué sur l'eau glycolée est nettement plus importante que

TABLEAU 4.4 – Conditions des tests de conservation de l'énergie

HR [%]	$V_{\text{air}}$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	$T_{\text{air}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\text{EG,e}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\text{PC,sup}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\overline{Q_{\text{EG}}}$ [W]	$\overline{Q_{\text{PC}}}$ [W]
65,2	1,1	6,2	-20,5	-16,4	$41,9 \pm 14,0$	$42,2 \pm 3,2$
81,5	0,9	15,1	-20,3	-15,0	$52,5 \pm 21,2$	$57,7 \pm 3,6$
70,1	3,8	12,2	-20,3	-13,8	$70,2 \pm 31,6$	$67,8 \pm 2,2$
59,3	5,1	15,1	-20,2	-10,1	$96,5 \pm 41,6$	$89,5 \pm 2,4$

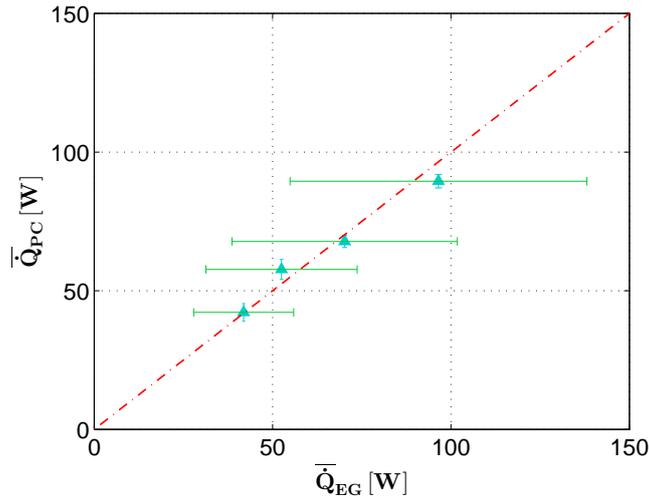


FIGURE 4.24 – Conservation de l'énergie pour différentes conditions de test

celle du calcul de flux conductif dans la plaque en carbone.

Ces observations permettent de valider le montage expérimental puisque la conservation de l'énergie est assurée. Ces tests permettent aussi de choisir le flux conductif dans la plaque en carbone comme flux de référence. Il sera utilisé par la suite pour calculer les diverses grandeurs thermiques tels que les coefficients d'échange ou encore les propriétés du givre.

#### 4.6.5 Température de surface du givre

Cette partie présente la méthode de validation de la température de surface du givre fournie par la caméra infrarouge. Afin de valider cette mesure, un thermocouple a été placé pour différents tests à plusieurs endroits sur la couche de givre. Ce test a nécessité beaucoup d'adresse et de précision afin de bien mesurer la température de surface sans endommager le givre, et de ce fait, mesurer la température d'une couche inférieure. Les deux températures relevées (celles du thermocouple et de la caméra infrarouge) sont alors comparées afin de vérifier la mesure donnée par la caméra infrarouge. La figure 4.25 présente la comparaison des deux températures obtenues pour différentes conditions. Les températures mesurées sont très proches ce qui permet de valider les résultats fournis par la caméra infrarouge. Pour information, certains de ces tests ont été réalisés à haute humidité relative (supérieure à 80 %) pour vérifier que la vapeur d'eau ne biaisait pas la mesure de température.

#### 4.6.6 Épaisseur du givre

Cette section a pour but de valider le calcul de l'épaisseur du givre effectué à l'aide de photos prises à intervalles réguliers. Deux méthodes ont été mises en place pour la validation. La première méthode, consiste simplement à mesurer à l'aide d'un réglet l'épaisseur de la couche de givre en fin de test. La seconde méthode, plus compliquée, utilise quelques photos acquises pendant le test. Contrairement à la méthode qui est utilisée pour faire les tests, celle-ci fait intervenir la mire. L'objectif, est d'évaluer à l'aide d'un programme réalisé sur Labview le nombre de pixels auquel correspond la mire. Il s'agit donc de la partie non recouverte par le givre. Comme localement,

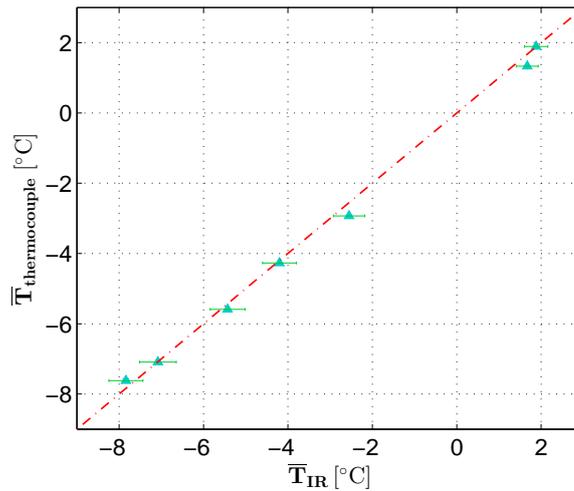


FIGURE 4.25 – Validation de la température de surface du givre

une excroissance de givre se forme, sa taille est aussi évaluée par la même méthode. Connaissant la taille initiale, ainsi que l'échelle (déterminée à l'aide de la largeur de la mire) permettant de convertir la quantité de pixels en une longueur, il est possible de déterminer l'épaisseur de la couche de givre. Bien entendu, la hauteur de la mire est connue initialement. Il faut donc lui retrancher la valeur de la partie de la mire encore visible et la taille de l'excroissance. La photo 4.26 illustre la technique et les divers paramètres géométriques présentés ci-dessus. L'épaisseur de givre s'exprime alors par :

$$e_{\text{givre}} = L_{\text{mire}} - L_{\text{nue}} - L_{\text{excroissance}} \quad (4.63)$$

La figure 4.27 présente une courbe d'épaisseur obtenue au cours des tests ainsi que les points de validation. Pour chacune des valeurs l'incertitude est fournie. Cette figure montre que les types de valeurs obtenus sont cohérents. Sans surprise, l'incertitude la plus importante est celle issue du relevé manuel. Les deux méthodes permettent de valider la mesure d'épaisseur par traitement d'images.

Cette section a permis de qualifier les différentes mesures effectuées sur le banc de test. La dernière étape consiste à vérifier que les tests réalisés sont reproductibles.

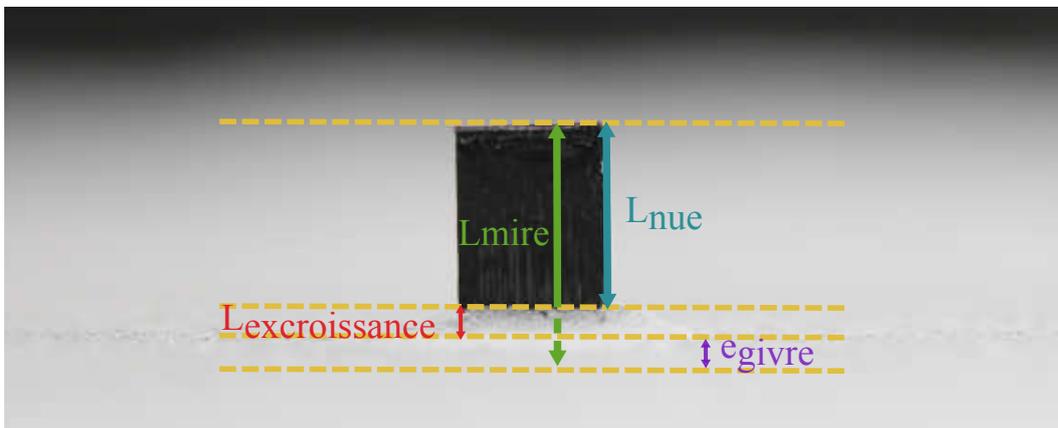


FIGURE 4.26 – Illustration de la méthode d'évaluation de l'épaisseur à l'aide de la mire

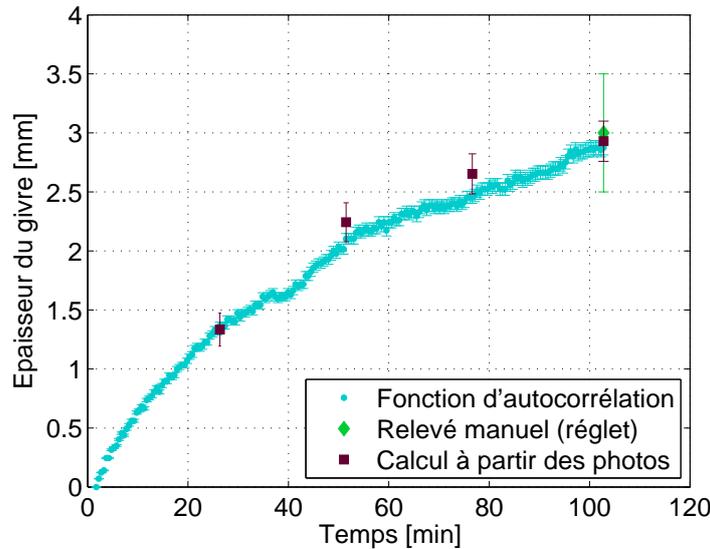


FIGURE 4.27 – Validation de la mesure d'épaisseur

## 4.7 Vérification de la reproductibilité des mesures

Cette partie a pour but d'évaluer la reproductibilité des résultats obtenus. Pour cela, des tests dont les conditions sont identiques sont réalisés deux fois. Les résultats obtenus pour chacun des tests répétés sont comparés. La reproductibilité est vérifiée sur les trois paramètres principaux qui ont été étudiés en début de ce document :

- l'épaisseur du givre ;
- la conductivité thermique du givre ;
- la masse volumique du givre.

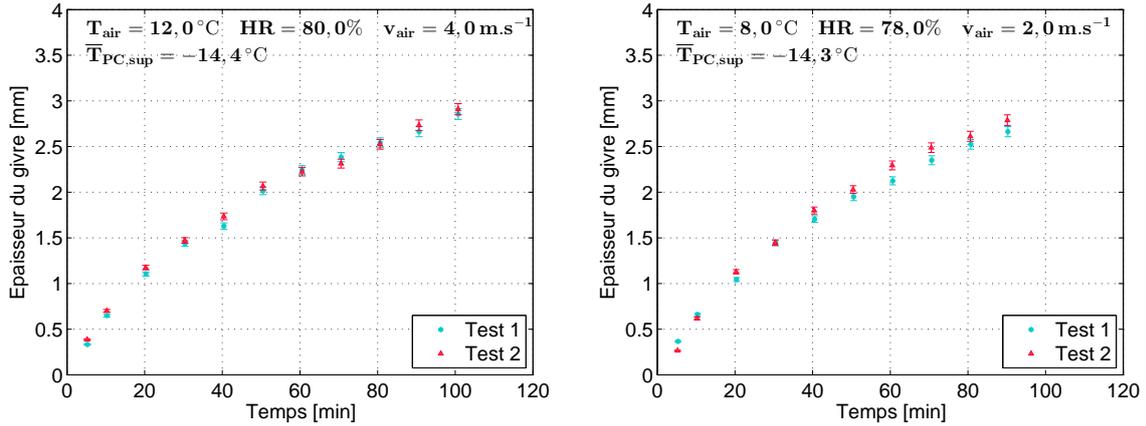
### 4.7.1 Reproductibilité de la mesure d'épaisseur du givre

La méthode de mesure de l'épaisseur a été présentée dans le chapitre précédent. Dans cette partie l'objectif est de vérifier que lorsque le même test est effectué à deux instants différents (à un mois d'intervalle), les résultats obtenus sont similaires. La reproductibilité de l'épaisseur du givre a été testée pour deux jeux de conditions différents. Les résultats sont présentés avec leurs incertitudes sur la figure 4.28.

Les deux figures obtenues montrent que les tests présentent des résultats proches, et ce, pour les deux jeux de tests (les vitesses et les températures d'air sont différentes entre les deux tests). Les tests, du point de vue de l'épaisseur, peuvent donc être considérés comme reproductibles.

### 4.7.2 Reproductibilité de la mesure de conductivité thermique effective du givre

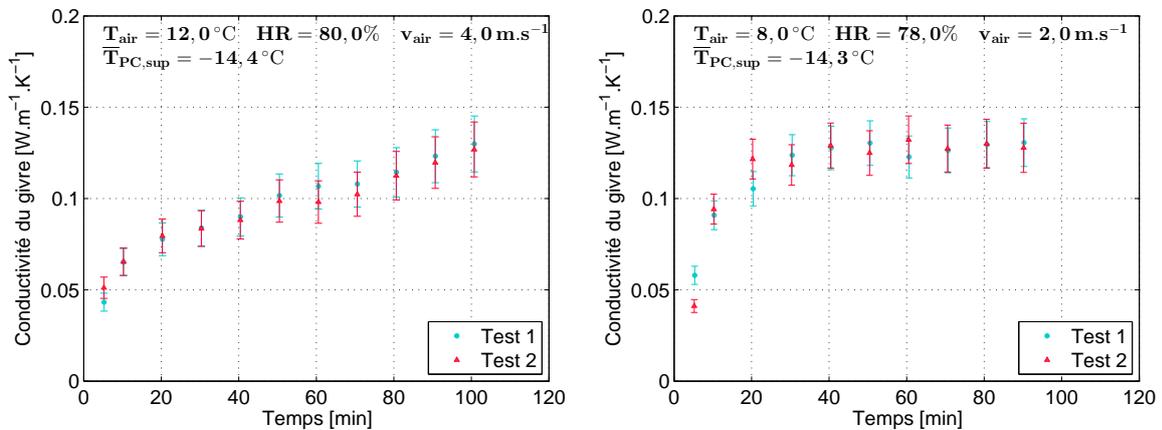
La conductivité thermique du givre n'est pas obtenue aussi directement. Elle nécessite la mesure de plusieurs grandeurs (voir chapitre précédent). Les tests de reproductibilité sont effectués sur les mêmes jeux de conditions que pour l'épaisseur.



(a) Épaisseur du givre : jeu de conditions n°1 (b) Épaisseur du givre : jeu de conditions n°2

FIGURE 4.28 – Tests de reproductibilité de l'épaisseur du givre

Les résultats obtenus sur la figure 4.29 montrent des valeurs proches. La mesure de conductivité peut elle aussi être considérée comme reproductible. Ces conclusions permettent de valider la reproductibilité d'autres paramètres (densité de flux de chaleur, températures mesurées par les thermocouples et la caméra infrarouge) nécessaires à la détermination de la conductivité.



(a) Conductivité thermique : jeu de conditions n°1 (b) Conductivité thermique : jeu de conditions n°2

FIGURE 4.29 – Tests de reproductibilité de la conductivité thermique du givre

### 4.7.3 Reproductibilité de la mesure de masse volumique du givre

Étant donné les difficultés rencontrées au cours de cette étude pour mesurer la masse volumique du givre, des graphes similaires à ceux présentés pour l'épaisseur et la conductivité ne sont pas présentés. La technique de mesure de la masse volumique aurait nécessité un nombre de tests beaucoup trop important. La reproductibilité a donc été testée sur un jeu de conditions pour un point à un instant donné.

Le tableau 4.5 présente les conditions du test de reproductibilité. Le tableau 4.6 présente les deux relevés effectués. Les deux mesures diffèrent de 0,2 g. Ce qui représente une différence d'environ 1 % sur la masse. Étant donnée la complexité induite par la mesure de masse, ce résultat est tout à fait acceptable. Pour rappel, la balance a une précision de 0,1 g.

TABLEAU 4.5 – Conditions des tests de reproductibilité de la mesure de masse volumique du givre

$T_{\text{air}} [^{\circ}\text{C}]$	HR [%]	$v_{\text{air}} [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	$\bar{T}_{\text{PC,sup}} [^{\circ}\text{C}]$	Durée du test [min]
12,0	80,0	2,0	-12,0	60

TABLEAU 4.6 – Tests de reproductibilité de la masse de givre

	Masse de givre déposée [g]	Masse volumique du givre [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
Test 1	18,9	155
Test 2	19,1	163

La mesure de masse couplée à celle de l'épaisseur permet de calculer la masse volumique du givre. L'écart entre les deux masses volumiques est de  $8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ce qui représente un écart d'environ 7 %. C'est l'épaisseur qui induit la plus grosse erreur. Ces résultats restent néanmoins tout à fait acceptables et permettent d'effectuer au minimum une étude qualitative de la masse volumique du givre.

Compte tenu du dispositif expérimental et des difficultés rencontrées, les tests de reproductibilité sont tout à fait satisfaisants. Ils présentent des erreurs acceptables, contenues dans les intervalles d'incertitude. Cette dernière vérification assure la qualité des points expérimentaux présentés par la suite. Les observations mèneront ainsi à des conclusions fiables.

## 4.8 Synthèse

Ce chapitre a décrit les différents éléments du banc d'essais mis en œuvre pour la phase expérimentale, dont les résultats sont présentés au chapitre 5. Une première partie a présenté le banc d'essais dans son environnement avec tous les organes qui s'articulent autour. Un focus a ensuite été fait sur la section d'essais afin de présenter les dispositifs de mesure choisis. Les grandeurs et leurs incertitudes ont été introduites par la suite afin que le lecteur comprenne l'origine de tous les résultats présentés dans le chapitre suivant. Un autre volet de cette partie a consisté en la qualification du banc d'essais, indispensable avant toute interprétation. Chaque mesure a été isolée afin de vérifier sa bonne représentativité dans l'espace et le temps. Enfin, une dernière section a été proposée afin de vérifier la reproductibilité des trois mesures principales : l'épaisseur, la conductivité et la masse volumique du givre. Les différents tests ont mis en avant la fiabilité du banc d'essais réalisé.



# Chapitre 5

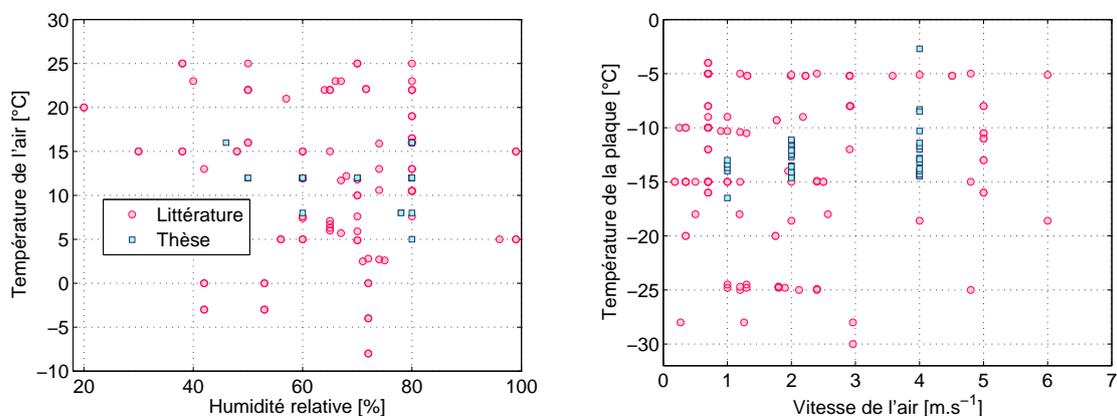
## Présentation et analyse des résultats expérimentaux

Ce chapitre a pour objectif de présenter les résultats expérimentaux et d'en proposer une analyse critique afin d'améliorer la compréhension des phénomènes liés au givrage. La formation du givre est étudiée à travers une approche bidimensionnelle puis simplifiée avec une approche mono dimensionnelle d'un jeu de conditions. Un exemple d'étude qui peut être étendue à tous les jeux de conditions est mis en avant. Cette première étude est complétée par la vérification de l'hypothèse de Lewis, énoncée dans le chapitre précédent.

Une analyse de sensibilité est ensuite proposée afin d'étudier l'impact des différents paramètres environnementaux sur la formation du givre. Les conditions de test ont été déterminées à partir de celles qui ont déjà été réalisées dans la littérature et de ce qu'il était possible d'atteindre avec le banc d'essais. La figure 5.1 présente la répartition des conditions expérimentales de la littérature ainsi que celles qui ont été effectuées au cours de ce travail de thèse.

Les points expérimentaux viennent compléter les points déjà disponibles dans la littérature, qui pour certains n'ont jamais été réalisés.

L'étude de sensibilité est enfin complétée par une partie qui se focalise sur les propriétés



(a) Paramètres : température de l'air et humidité relative (b) Paramètres : vitesse de l'air et température de plaque

FIGURE 5.1 – Répartition des conditions de test de la littérature et du travail de thèse

du givre et plus particulièrement sur la masse volumique, paramètre plus difficile à mesurer expérimentalement.

## 5.1 Résultats obtenus sur un jeu de conditions

Cette section propose d'étudier la formation du givre à travers deux approches (bidimensionnelle et mono dimensionnelle) sur un jeu de conditions en particulier. Une première étude globale, qui considère la plaque dans son ensemble a pour but de montrer que les mesures au centre peuvent être considérées comme représentatives de toute la plaque. Dans un second temps, une étude locale vient présenter les résultats qui peuvent être obtenus pour chacun des tests.

### 5.1.1 Étude globale : représentativité des mesures au centre

Comme expliqué précédemment, le but de cette partie est de présenter une étude bidimensionnelle des phénomènes de givrage sur la plaque et d'étudier si les résultats globaux peuvent être représentés par ceux obtenus au centre de la plaque. Cependant, certaines mesures qui ne peuvent être réalisées de manière bidimensionnelle vont donner lieu aux hypothèses suivantes : l'épaisseur et la température de surface du givre sont considérées uniformes sur toute la surface de la plaque. Grâce à la disposition de plusieurs thermocouples sur les faces supérieures et inférieures de la plaque en carbone, la densité de flux de chaleur peut être évaluée en différents points. Les conditions dans lesquelles le test a été effectué sont précisées dans le tableau 5.1.

TABLEAU 5.1 – Conditions du test bidimensionnel

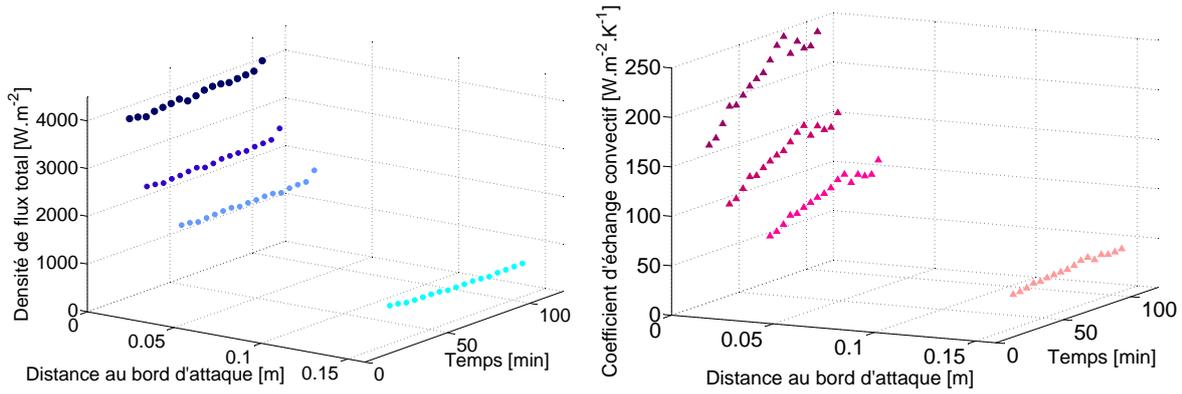
$T_{\text{air}} [^{\circ}\text{C}]$	HR [%]	$v_{\text{air}} [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	$\bar{T}_{\text{PC,sup}} [^{\circ}\text{C}]$
12,0	80,0	4,0	-14,4

La figure 5.2a montre l'évolution de la densité de flux total du bord d'attaque jusqu'au centre de la plaque au cours du temps. La densité de flux n'est pas constante le long de la plaque. Les échanges, qui sont très importants au niveau du bord d'attaque, se réduisent considérablement jusqu'au centre et restent quasi constants au cours du temps. Ce phénomène est dû à un coefficient d'échange convectif très important en entrée de plaque qui lui aussi diminue progressivement en fonction de l'abscisse (cf. figure 5.2b). Les phénomènes classiques de convection forcée externe sur une plaque plane maintenue à température constante sont identifiés. Dans la veine d'air le nombre de Reynolds est de l'ordre de 120 000. L'écoulement est donc pleinement turbulent avec une longueur d'établissement faible. De plus, le coefficient d'échange augmente au cours du temps. Cette augmentation est due au réchauffement de la surface du givre, qui entraîne une diminution des écarts de températures et d'humidités absolues entre l'air et la surface du givre. Pour rappel, le coefficient d'échange convectif est défini par l'équation (5.1) :

$$h_{\text{air}} = \frac{q_{\text{PC}}}{(T_{\text{air}} - T_{\text{f}}) + \frac{\Delta h_{\text{sub}}}{c_{\text{p,air}}} (\omega_{\text{air}} - \omega_{\text{f}})} \quad (5.1)$$

Un flux quasi constant couplé à une diminution des écarts de températures et d'humidités absolues provoque l'augmentation du coefficient d'échange convectif.

L'impact de ces effets convectifs ne peut pas être étudié sur l'épaisseur (paramètre mono dimensionnel) ni sur la masse volumique (relevé global) mais peut être analysé sur la conductivité thermique effective du givre. Ils ne sont en effet pas sans conséquences sur cette dernière. La figure 5.3 montre que la conductivité thermique suit une évolution



(a) Évolution temporelle de la densité du flux total le long de la plaque froide (b) Évolution temporelle du coefficient d'échange convectif le long de la plaque froide

FIGURE 5.2 – Échanges thermiques le long de la plaque froide

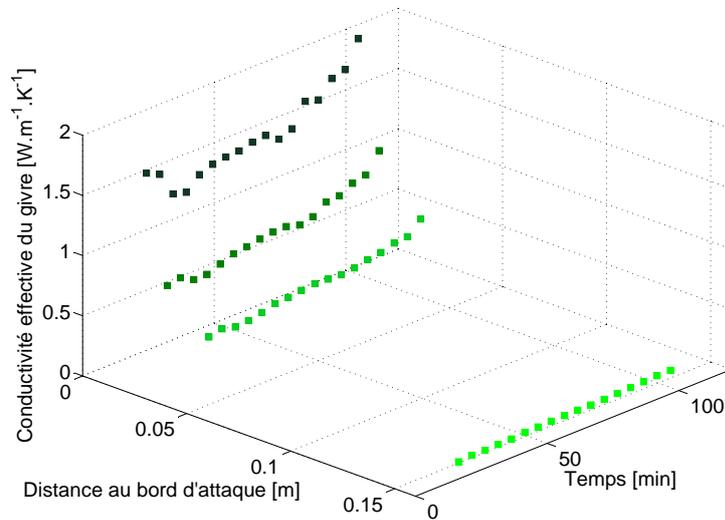


FIGURE 5.3 – Évolution temporelle de la conductivité thermique le long de la plaque froide

similaire à celle du coefficient d'échange convectif. En entrée de plaque, la conductivité thermique a une valeur d'environ  $1,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , relativement proche de celle de la glace alors qu'en milieu de plaque les valeurs obtenues sont de l'ordre de  $0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , résultats concordants avec les valeurs de la littérature.

Pour évaluer la représentativité des mesures au centre, il est nécessaire de déterminer une valeur moyennée sur la longueur de la plaque de la conductivité thermique du givre. Les thermocouples permettant de mesurer le flux ne sont placés que sur la première moitié de la plaque. Or, il est plus intéressant d'obtenir une valeur moyenne sur l'ensemble de la plaque. Pour cela la valeur de la conductivité thermique au centre est considérée uniforme le long de la deuxième moitié de la plaque. Cette supposition permet de réaliser une interpolation polynomiale de degré 2 sur la valeur de l'inverse de la conductivité (travailler sur l'inverse de la conductivité facilite les calculs) qui est représentée sur la figure 5.4 et lissée par la formule suivante (5.2) :

$$\frac{1}{\lambda_f} = p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot t + p_{20} \cdot x^2 + p_{11} \cdot x \cdot t + p_{02} \cdot t^2 \quad (5.2)$$

Les valeurs de coefficient  $p_{ij}$  avec leurs intervalles de confiance (95 %) ainsi que la valeur du  $R^2$  (coefficient de régression) sont regroupés dans le tableau 5.2.

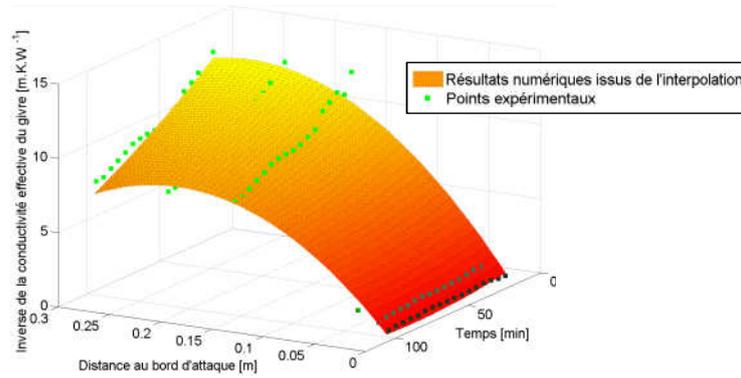


FIGURE 5.4 – Interpolation polynomiale de l'inverse de la conductivité thermique du givre

TABLEAU 5.2 – Coefficients du polynôme de l'inverse de la conductivité

$R^2$	0,9860	
Coefficients $p_{ij}$	Valeurs	Intervalle de confiance
$p_{00}$	0,8047	0,5656 ; 1,044
$p_{10}$	101,6	100,2 ; 103
$p_{01}$	-0,02503	-0,03292 ; -0,01715
$p_{20}$	-191,4	-195,7 ; -187,2
$p_{11}$	-0,2142	-0,2263 ; -0,202
$p_{02}$	0,0001584	0,00009614 ; 0,0002207

L'expression ci-dessus permet de calculer la valeur moyenne intégrale de l'inverse de la conductivité  $(\frac{1}{L_{\text{plaque}}} \int_0^{L_{\text{plaque}}} \frac{1}{\lambda(x,t)} dx)$  puis d'en déduire la valeur moyenne intégrale de la conductivité thermique.

La figure 5.5 présente la valeur moyenne intégrale obtenue pour la conductivité du givre ainsi que la valeur au centre. La valeur intégrale est supérieure à la valeur au centre car cette dernière représente la valeur observée la plus faible, les valeurs mesurées plus élevées à proximité du bord d'attaque ne peuvent qu'augmenter la moyenne. La valeur moyenne intégrale est de ce fait plus élevée d'environ 30 %. L'hypothèse de la température de surface de givre uniforme peut aussi être responsable de cette valeur élevée. En effet, en entrée de plaque, la température de surface du givre est probablement plus élevée que celle supposée, mesurée au centre. Une température de surface du givre plus élevée provoquerait une diminution de la conductivité thermique effective du givre, ce qui aurait pour conséquence un rapprochement des valeurs globales et locales. Néanmoins, les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur, ce qui laisse penser que les valeurs mesurées au centre de la plaque représentent assez bien l'ensemble de la plaque.

Afin de consolider ces premières conclusions, le tableau 5.3 présente les résultats obtenus pour deux autres tests aux conditions différentes. Les deux tests proposés ont été réalisés à des températures d'air et de plaque, des humidités et des vitesses différentes. Les coefficients  $R^2$  trouvés pour l'approximation de l'inverse de la conductivité

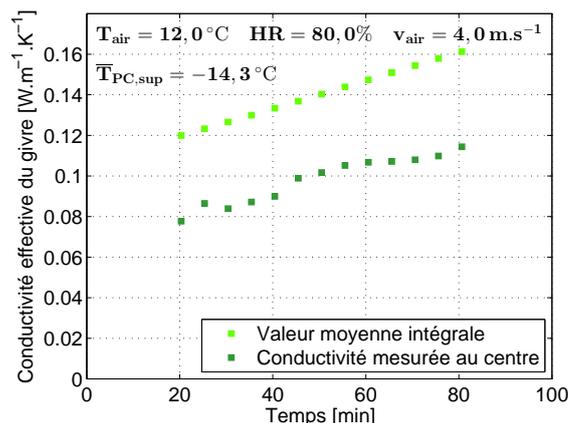


FIGURE 5.5 – Valeur moyenne intégrale de la conductivité effective du givre

TABLEAU 5.3 – Représentativité des résultats au centre de la plaque pour les deux tests supplémentaires

Conditions				
Test	$T_{\text{air}} [^{\circ}\text{C}]$	HR [%]	$T_{\text{PC,sup}} [^{\circ}\text{C}]$	$v_{\text{air}} [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
n°1	12,0	50,0	-12,1	2,0
n°2	8,0	70,0	-14,1	2,0
Résultats				
Test	$R^2$	$\bar{\lambda}_{\text{givre,centre}} [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	$\bar{\lambda}_{\text{givre,plaque}} [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Écart [%]
n°1	0,9815	0,158	0,209	25
n°2	0,9880	0,126	0,156	20

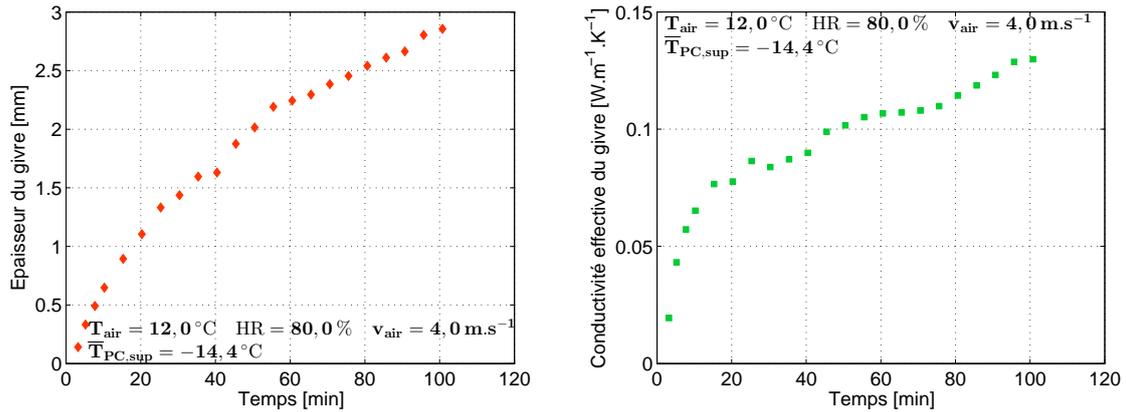
thermique sont renseignés. Les écarts observés sont similaires à ceux du premier test. La représentativité des résultats au centre semble être assurée pour les différents tests effectués.

Cette première étude permet d’observer que les valeurs au centre ne représentent pas complètement celles mesurées le long de la plaque. Un écart de 30 % a en effet été calculé. Même si les valeurs obtenues ne sont pas identiques, les tendances sont conservées. Les travaux seront poursuivis en se concentrant sur les mesures au centre de la plaque, tout en gardant à l’esprit les écarts constatés.

### 5.1.2 Étude locale

Cette étude locale met en avant les différentes grandeurs qui interviennent dans le phénomène de givrage. Ce type d’étude, réalisé sur tous les points de données qui sont utilisés dans l’étude de sensibilité, est proposé dans cette partie pour un jeu de données.

La figure 5.6a présente l’évolution de l’épaisseur en fonction du temps. L’épaisseur du givre augmente en fonction du temps. La durée du test ne permet pas d’atteindre une épaisseur constante. Au bout de 100 minutes de test, du givre continue à se former



(a) Évolution de l'épaisseur du givre en fonction du temps (b) Évolution de la conductivité thermique effective du givre en fonction du temps

FIGURE 5.6 – Évolution des propriétés du givre en fonction du temps

en surface. La figure 5.6b montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction du temps. La conductivité thermique croît de manière importante en début de test (20 premières minutes) puis voit sa progression ralentir. Tout comme l'épaisseur, 100 minutes n'ont pas été suffisantes pour atteindre une valeur constante de la conductivité thermique.

La figure 5.7 présente les densités de flux mises en jeu lors du givrage de la plaque froide. La densité de flux de chaleur est plus élevée que celle relative au transfert de masse. Leurs valeurs sont néanmoins assez proches ce qui signifie qu'elles ont chacune une contribution non négligeable sur l'épaississement et la densification de la couche de givre.

Suite à la sublimation inverse de la vapeur d'eau et à l'épaississement de la couche de givre, la température de surface du givre augmente (cf. figure 5.8a). La figure montre qu'à partir d'un certain temps, la température du givre devient positive et monte jusqu'à presque  $3 \text{ } ^\circ\text{C}$ . L'observation de ces températures positives peut être expliquée par la vitesse élevée du flux d'air. En effet, il peut être envisagé que la surface du dépôt

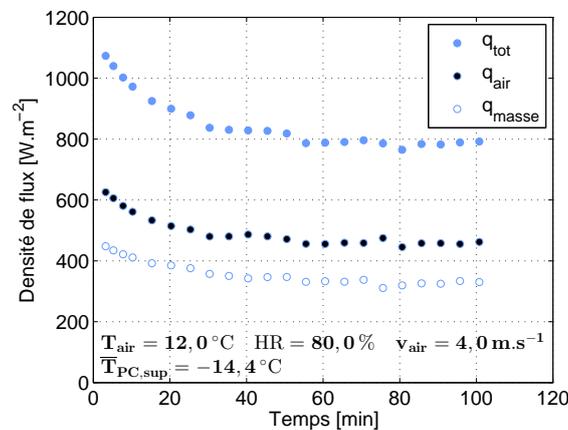
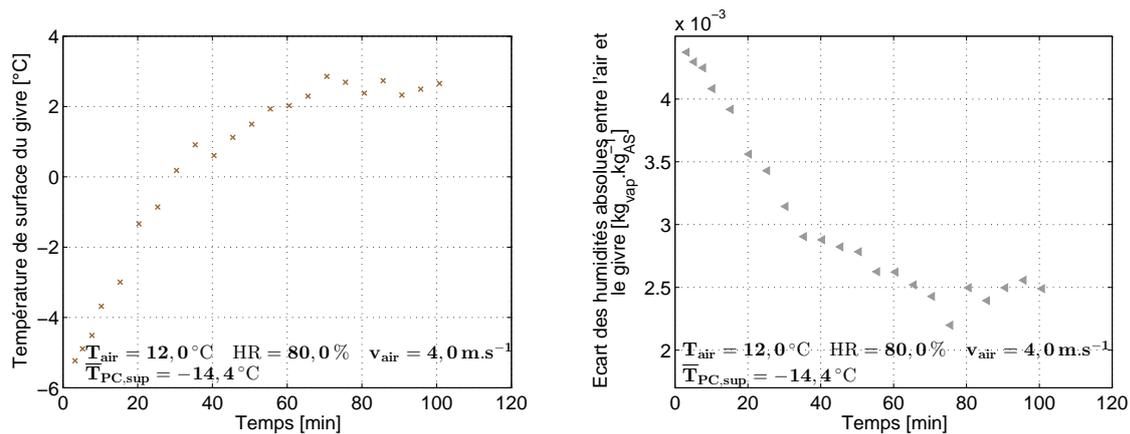


FIGURE 5.7 – Évolution des densités de flux total, de transfert de chaleur et de masse au cours du temps

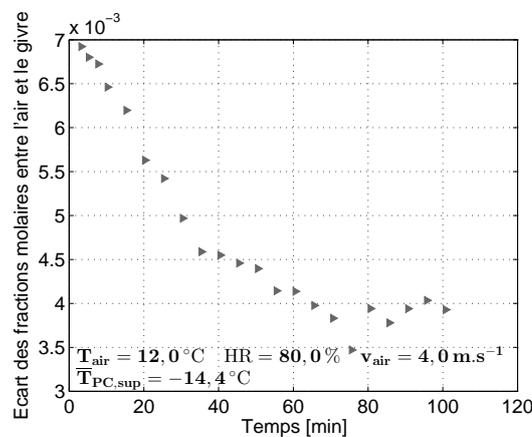
en contact avec l'air ne soit plus sous forme solide (givre) mais sous forme liquide. La vitesse d'air élevée ( $4 \text{ m.s}^{-1}$ ) peut provoquer la formation d'un film liquide de très faible épaisseur, qui lui, est à température positive. C'est cette température de surface qui est mesurée par la caméra infrarouge. Cependant, ce film liquide étant très fin, l'eau sous forme solide, c'est à dire le givre, est immédiatement situé en dessous de ce film liquide. C'est cette surface du givre, à température négative qui lui permet de continuer à se développer. Comme il a été vu dans le chapitre 3, il est indispensable que la température de surface soit négative pour que la vapeur d'eau contenue dans l'air vienne givrer. Le dépôt sur la plaque refroidie n'est alors plus formé d'une unique épaisseur, mais d'une couche de givre, milieu poreux dont l'épaisseur est importante, sur laquelle s'est formé un film liquide très fin (comparé à l'épaisseur de la première couche de givre).

L'échauffement de la surface provoque une variation de l'écart des humidités absolues entre l'air et la surface du givre. L'humidité absolue de l'air loin de la plaque reste constante car la température de l'air ne varie pas, elle n'est pas influencée par la plaque froide. En revanche, l'humidité absolue prise à saturation à la température de surface du givre varie, puisque la température évolue. La figure 5.8b montre que l'écart des humidités absolues diminue au cours du temps. La figure 5.8c présente l'évolution de



(a) Évolution de la température de surface du givre au cours du temps

(b) Évolution de l'écart d'humidité absolue au cours du temps



(c) Évolution de l'écart de fraction molaire au cours du temps

FIGURE 5.8 – Évolution temporelle des paramètres moteurs de la formation du givre

l'écart des fractions molaires entre l'air et le givre au cours du temps. La fraction molaire est définie par :

$$x_v = \frac{w}{w + M_{va}} \quad (5.3)$$

avec  $M_{va} = \frac{M_v}{M_{air}} = 0,62198$ .

La fraction molaire se comporte comme l'humidité absolue, puisqu'elle est définie à une constante près. Les écarts de fractions molaires et des humidités absolues présentent donc la même évolution. Dans la suite de ce document, les humidités absolues sont utilisées afin de communiquer plus facilement avec les autres études de la littérature, qui utilisent les humidités absolues. La baisse de l'écart des humidités absolues et de l'écart des fractions molaires implique une diminution des transferts de masses.

La figure 5.9 présente l'évolution de la vitesse de givrage en fonction du temps. La vitesse de givrage a été présentée dans la section 4.5.8. Elle correspond à la dérivée de l'épaisseur du givre par rapport au temps. Dans cette étude, les points d'épaisseur sont approximés par une courbe de tendance qui permet d'écrire  $e_{givre} = f(t)$ . Cette fonction est ensuite dérivée afin de déduire la vitesse de givrage. La figure 5.9 met en avant la forte vitesse de givrage en début de test qui tend vers une valeur constante beaucoup plus faible par la suite.

La baisse de la vitesse de givrage et de l'évolution de tous les paramètres présentés ci-dessus est due à l'augmentation de la résistance thermique de la couche de givre (cf. figure 5.10), qui représente environ 15 % de la résistance thermique côté air. Une résistance thermique plus importante implique une chute des échanges entre l'air et la surface de la plaque.

Cette première étude complète permet d'identifier les différentes grandeurs jouant un rôle important dans le phénomène de givrage. Bien que la plupart des tests soient étudiés au centre, il faut garder à l'esprit qu'étudier le givrage de manière bidimensionnelle est très intéressant et sera probablement nécessaire à l'avenir. Pour les premières études, il est cependant plus aisé de se focaliser au centre. La compréhension des causes et des conséquences du givrage identifiées dans l'étude locale est nécessaire pour exploiter les résultats proposés dans l'étude de sensibilité.

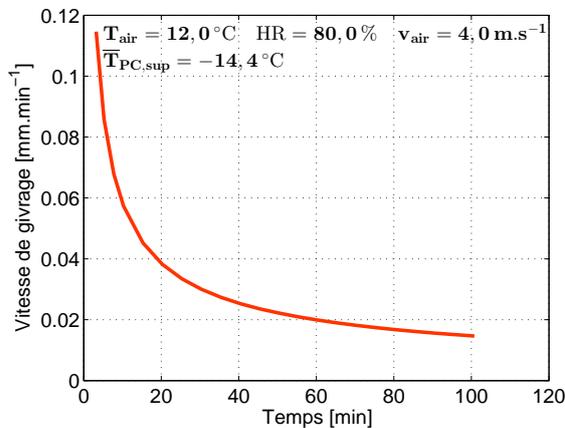


FIGURE 5.9 – Évolution temporelle de la vitesse de givrage

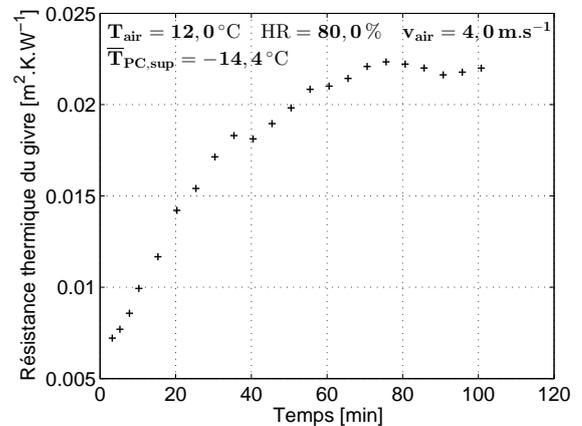


FIGURE 5.10 – Évolution temporelle de la résistance thermique surfacique de la couche de givre

## 5.2 Vérification de l'hypothèse de Lewis

Avant de s'intéresser à la comparaison des résultats expérimentaux, il convient de vérifier une hypothèse qui a été énoncée dans le chapitre précédent. Un nombre important de publications (Ismail and Salinas [30], Jones and Parker [33], Le Gall and Griot [43], Lee et al. [44], Sahin [73], Sami and Duong [74], Tao et al. [81]) fait l'hypothèse que le nombre de Lewis est égal à l'unité. Pour rappel, le nombre de Lewis est défini par :

$$\text{Le}^{\frac{2}{3}} = \frac{h_{\text{air}}}{h_m \cdot c_{p,\text{air}}} \quad (5.4)$$

L'hypothèse de  $\text{Le} = 1$  doit permettre par la suite de calculer le coefficient d'échange de chaleur convectif  $h_{\text{air}}$  et le coefficient convectif de transfert de masse  $h_m$ . Cette hypothèse, qui n'a que peu été étudiée (uniquement dans les travaux de Lee et al. [44]) nécessite d'être vérifiée pour être utilisée.

Pour cela, deux types de mesures sont comparés :

- une mesure de masse ;
- une mesure de densité de flux.

Tout d'abord, le coefficient de transfert de masse  $h_m$  est estimé à l'aide de la mesure de masse effectuée à différents instants du test. La figure 5.11 présente la mesure de masse qui a été choisie pour cet exemple.

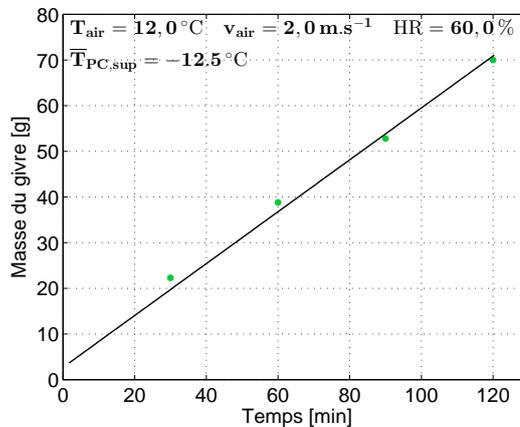


FIGURE 5.11 – Points de mesure de masse utilisés pour vérifier  $\text{Le} = 1$

L'objectif est de calculer à partir de ce relevé de masse, le débit d'eau qui se dépose sur la plaque froide, lié au coefficient  $h_m$  par l'équation (5.5).

$$\dot{m}_{\text{eau}} = h_m \cdot (w_{\text{air}} - w_f) = \frac{1}{S_{\text{plaque}}} \cdot \frac{dm_{\text{givre}}}{dt} \quad (5.5)$$

L'écart d'humidité absolue est calculé à partir des températures d'air et de surface du givre mesurées pendant les tests. Pour déterminer le débit d'eau, une approximation de la valeur de masse est donnée par la droite sur la figure 5.11. La masse approximée est ensuite divisée par la surface de la plaque puis dérivée pour obtenir le débit. La connaissance du débit d'eau permet ainsi de déduire la valeur de  $h_m$ .

En parallèle, l'équation (4.36) est retravaillée afin d'exprimer le coefficient  $h_m$  en fonction de la densité de flux mesurée, des températures, des humidités absolues et du nombre de Lewis :

$$h_m = \frac{q_{PC}}{Le^{\frac{2}{3}} \cdot c_{p,air} \cdot (T_{air} - T_f) + \Delta h_{sub} \cdot (w_{air} - w_f)} \quad (5.6)$$

La valeur que devrait prendre le nombre de Lewis est alors calculée à partir de la valeur du coefficient  $h_m$  déterminé à l'aide de la mesure de masse. Les résultats obtenus pour les trois jeux de données pour lesquels des mesures de masses ont été effectuées sont présentés dans le tableau 5.4. Les conditions de test sont identiques à celles précisées sur la figure 5.11, seule l'humidité varie de 80 à 50 %.

TABLEAU 5.4 – Tableau de résultats pour le calcul du nombre de Lewis

	$h_m$ [kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Le	$h_{air}$ [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
<b>Test 1 (HR=80,0%)</b>	0,050	0,89	46,4
<b>Test 2 (HR=60,0%)</b>	0,042	0,98	41,6
<b>Test 3 (HR=50,0%)</b>	0,045	0,96	44,0

Les résultats présentés dans le tableau montrent que les nombres de Lewis obtenus sont assez proches de l'unité. L'écart observé peut avoir plusieurs causes. D'une part, les incertitudes de mesures peuvent entraîner de petites différences. D'autre part, le fait que des valeurs locales et globales soient comparées peut induire ces écarts. En effet, la mesure de masse est une valeur globale car elle est mesurée sur l'ensemble de la plaque tandis que la mesure de densité de flux est locale, car elle est mesurée au centre de la plaque. Le paragraphe sur la représentativité des mesures au centre a montré qu'il existait un petit écart entre les valeurs, celles au centre ayant tendance à être minimisées. Cette tendance se retrouve dans les mesures du flux. En effet, les valeurs de densité de flux mènent à des valeurs du nombre de Lewis et donc du coefficient de chaleur  $h_{air}$  plus faibles. Les écart restent néanmoins acceptables et permettent de vérifier que l'hypothèse de  $Le = 1$  peut tout à fait être conservée.

## 5.3 Étude de sensibilité

Cette partie a pour but de compléter l'étude bibliographique présentée au début de ce manuscrit. L'impact des paramètres suivants sur la formation du givre est étudié :

- la température de l'air à humidité relative constante ;
- la température de l'air à humidité absolue constante ;
- la température de la plaque froide ;
- la vitesse de l'air ;
- l'humidité relative de l'air.

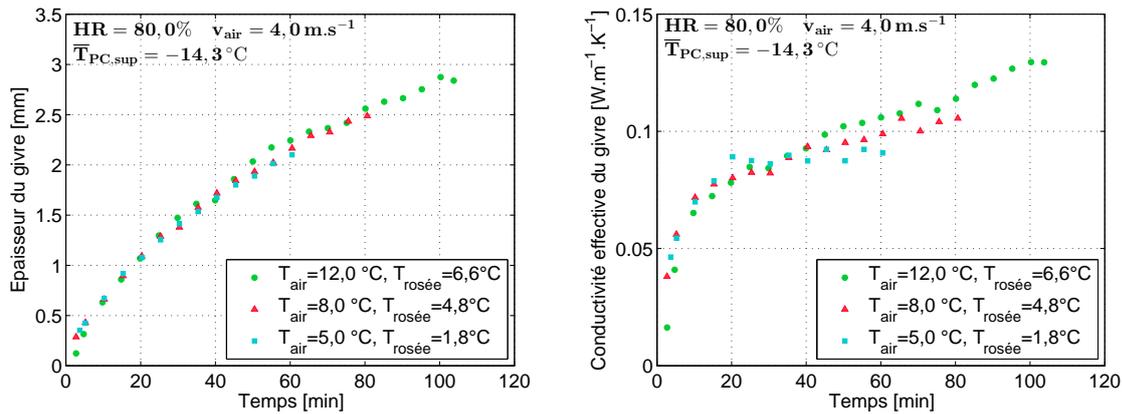
### 5.3.1 Impact de la température de l'air à humidité relative constante

Les tests ont été réalisés pour trois températures d'air différentes, en conservant l'humidité relative à 80 %. Les résultats obtenus pour l'épaisseur et la conductivité

thermique effective du givre sont présentés sur la figure 5.12.

La durée des tests diminue avec la température de l'air car la chambre froide voit ses performances chuter. Elle fonctionne de ce fait moins longtemps.

Les figures 5.12a et 5.12b montrent que la température d'air, à humidité relative constante a un faible impact sur les propriétés du givre. En effet, l'épaisseur et la conductivité thermique du givre augmentent faiblement lorsque la température de l'air est plus élevée.



(a) Variation de l'épaisseur du givre pour différentes températures d'air à humidité relative constante

(b) Variation de la conductivité thermique du givre pour différentes températures d'air à humidité relative constante

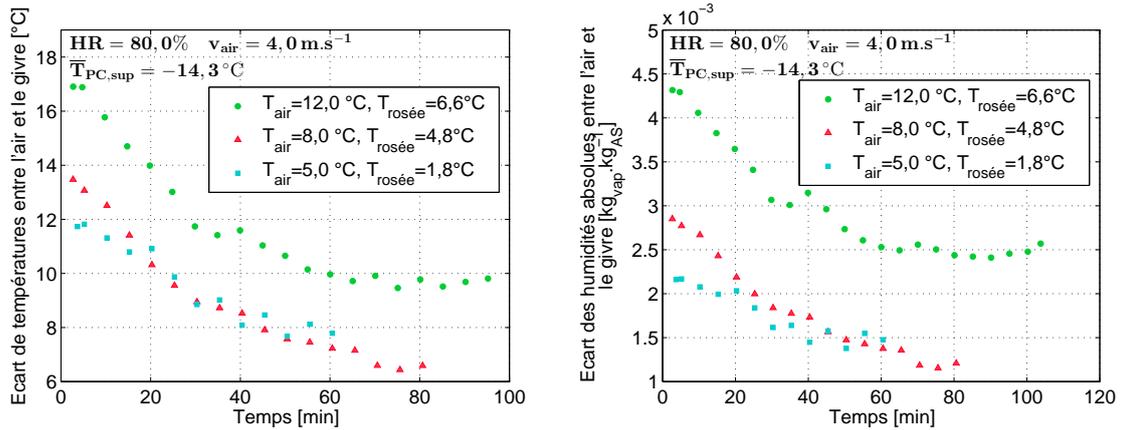
FIGURE 5.12 – Impact de la température d'air sur les propriétés du givre à humidité relative constante

Pour comprendre les phénomènes physiques mis en jeu, les figures 5.13a et 5.13b présentent l'évolution au cours du temps de l'écart des températures et des humidités absolues entre l'air et la surface du givre.

Les écarts sont plus importants pour une température de 12 °C (pour 8 °C et 5 °C, comme l'écart de températures est moins important, la visualisation n'est pas aussi nette). Ces écarts de températures et d'humidités sont moteurs de la formation du givre, notamment celui sur l'humidité absolue qui favorise le dépôt de givre, ce qui explique l'épaisseur légèrement plus importante pour la température la plus élevée. Cependant, l'épaississement couplé à une température d'air plus élevée implique une température de surface du givre plus élevée comme le montre la figure 5.13a.

D'après ces observations, une température de surface du givre plus élevée provoque la fonte mais aussi le dépôt par condensation et non par sublimation inverse. L'eau s'infiltré dans les pores du givre favorisant sa densification. La conductivité thermique du givre dépend fortement de la masse volumique du givre mais aussi du type de cristaux formés à la surface. La figure 5.14, issue des travaux de Wu et al. [88], montre le type de cristaux formés initialement. Les trois conditions de test donnent lieu à des cristaux identiques (aiguilles et bâtons). Au cours du temps, comme l'écart des humidités absolues diminue et la température de surface du givre augmente, le type de cristaux formés évolue, ce qui pourrait impliquer une modification de la masse volumique du givre et donc de la conductivité thermique effective.

Les remarques effectuées permettent d'émettre l'hypothèse qu'une température plus élevée favorise la densification de la couche de givre. Les écarts restant cependant assez



(a) Évolution de l'écart des températures (b) Évolution de l'écart des humidités absolues entre l'air et la surface du givre au cours du temps

FIGURE 5.13 – Écart des humidités absolues et des températures pour différentes températures d'air à humidité relative constante

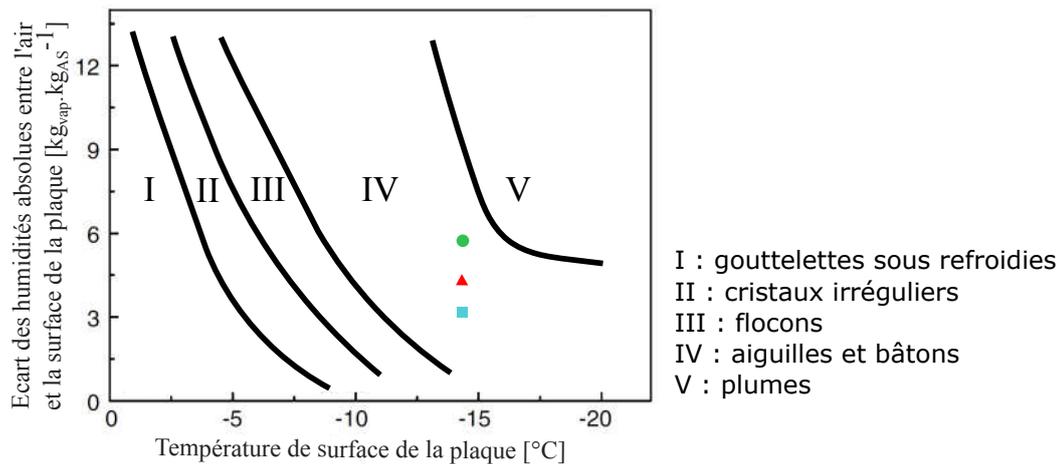


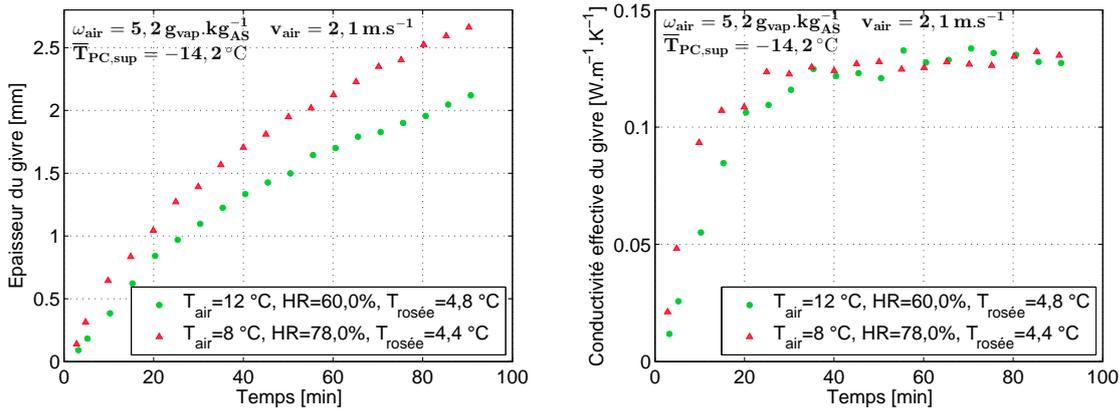
FIGURE 5.14 – Morphologie des cristaux de givre : impact de la température d'air à humidité relative constante (cartographie issue des travaux de Wu et al. [88])

faibles par rapport à d'autres conditions environnementales, l'impact global n'est pas très important.

### 5.3.2 Impact de la température de l'air à humidité absolue constante

Dans cette partie, c'est l'impact de la température de l'air, lorsque l'humidité absolue est gardée constante, qui est étudié. Pour cela, deux tests ont été effectués à 12 et 8 °C respectivement. L'humidité relative du premier test est maintenue à 60 % et celle du second à 78 % afin que l'humidité absolue avoisine  $5,2 \text{ g}_{vap} \cdot \text{kg}_{AS}^{-1}$ . Pour les deux tests, la même quantité de vapeur d'eau susceptible de givrer est donc fournie à chaque instant.

La figure 5.15a montre qu'une température d'air plus faible provoque l'apparition d'un givre plus épais. Cette observation est opposée à celle effectuée dans la partie précé-



(a) Variation de l'épaisseur du givre pour différentes températures d'air à humidité absolue constante (b) Variation de la conductivité thermique du givre pour différentes températures d'air à humidité absolue constante

FIGURE 5.15 – Impact de la température d'air sur les propriétés du givre à humidité absolue constante

dente. La même constatation est faite sur la conductivité thermique : elle est bien plus élevée en début de test pour la température de 8 °C et l'écart se réduit en fin de test. La figure 5.16 montre l'évolution des densités de flux au cours du temps pour les deux tests. Les densités de flux de transfert de masse sont très proches en raison du faible écart entre les humidités absolues comme le montre la figure 5.17a (la densité de flux de transfert de masse à 8 °C est légèrement plus élevée que celle à 12 °C, malgré des écarts d'humidités absolues inversés en raison d'un coefficient d'échange légèrement plus élevé à 8 °C, sans conséquence sur la formation du givre).

La densité de flux de chaleur du test à 12 °C est plus élevée que celle à 8 °C, en raison d'un écart de températures entre l'air et la surface du givre plus important. Néanmoins la figure 5.17b montre que la température de surface du givre est plus élevée lorsque la température de l'air est plus faible. Cette observation est cohérente avec le fait que l'épaisseur est plus élevée à 8 °C. En effet, la sublimation inverse de la vapeur favorise

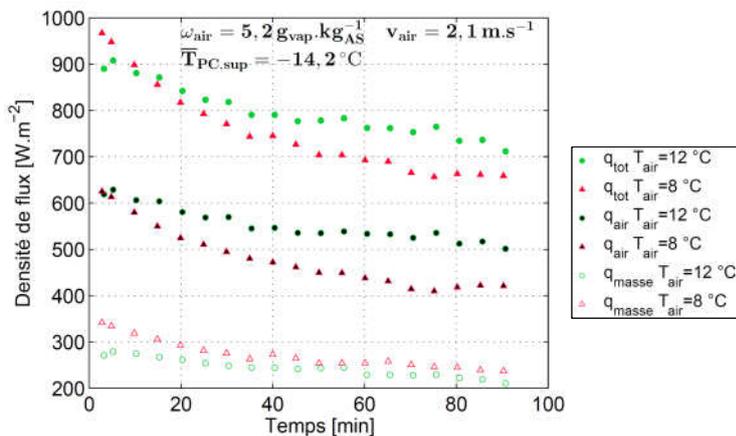
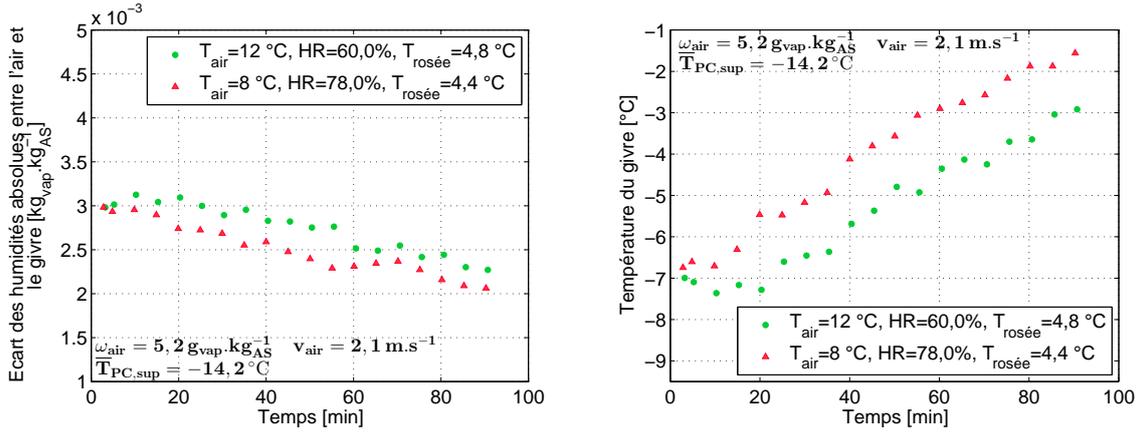


FIGURE 5.16 – Évolution de la densité de flux total, de chaleur et de masse pour différentes températures d'air à humidité absolue constante



(a) Variation de l'écart des humidités absolues entre l'air et la surface du givre (b) Évolution de la température de surface du givre

FIGURE 5.17 – Écarts des humidités absolues et températures du givre pour différentes températures d'air à humidité absolue constante

le réchauffement de la surface. Par contre ces diverses observations ne permettent pas de comprendre pourquoi l'épaisseur est plus élevée pour une température d'air plus faible.

La figure 5.18, qui montre l'évolution des résistances thermiques pour les tests, est cohérente avec les observations faites ci-dessus : la résistance thermique à 8 °C est plus élevée que celle à 12 °C, due à l'épaisseur plus importante.

Les différents tests laissent donc penser que lorsque l'humidité absolue est maintenue constante, un air plus froid favorise le givrage.

Pour approfondir la réflexion, la masse a été déterminée grâce à la vérification de l'analogie de Lewis. En effet, cette analogie permet de calculer le coefficient de transfert de masse  $h_m$ . Ce coefficient, associé à l'écart d'humidités absolues permet de calculer le débit massique de l'eau déposée sur la superficie de la plaque :

$$\dot{m}_{\text{eau}} = S_{\text{plaque}} \cdot h_m \cdot (w_{\text{air}} - w_f) \quad (5.7)$$

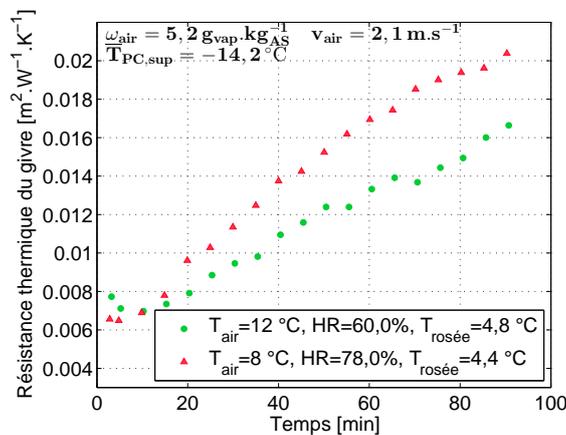


FIGURE 5.18 – Évolution de la résistance thermique de la couche de givre pour différentes températures d'air à humidité absolue constante

La connaissance de ce débit permet de déduire la masse de givre déposée sur la plaque :

$$m_{givre} = \int_0^{t_{fin}} \dot{m}_{eau}(t) dt \quad (5.8)$$

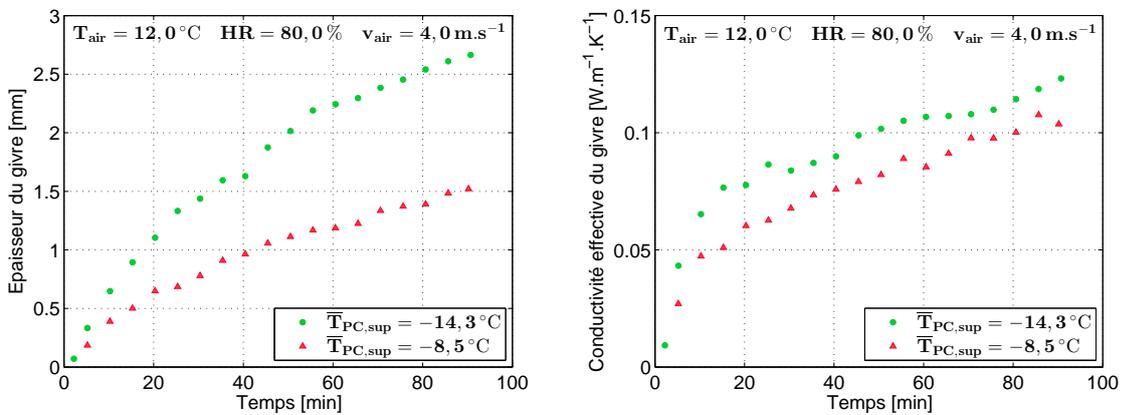
Les calculs, effectués sur les deux tests, montrent que la masse de givre finale déposée sur la plaque à 12 °C est plus élevée qu'à 8 °C. Ceci signifierait que la quantité d'eau déposée sur la plaque est bien plus importante lorsque la température de l'air est plus élevée mais que cette eau contribue plus à la densification qu'à l'épaississement du givre. Par ailleurs, à température d'air plus faible, la vapeur d'eau se désublime en surface et s'infiltré moins, formant un givre moins dense.

### 5.3.3 Impact de la température de la plaque froide

Cette partie a pour objectif de comprendre l'impact de la température de la plaque froide sur la formation de givre. Pour cela, deux tests ont été réalisés à deux températures de plaque différentes.

La figure 5.19a montre que la température de la plaque a une influence considérable sur l'épaisseur du givre. En effet, pour un écart de 6 K, le givre est deux fois plus épais. La vitesse de givrage est plus importante pour une faible température de plaque (cf. figure 5.20). Une température de plaque faible favorise la sublimation inverse de la vapeur à la surface du givre. L'impact de la température de plaque sur la conductivité thermique effective du givre n'est pas aussi important. En effet, l'écart entre les deux mesures reste assez faible (cf. figure 5.19b). La conductivité thermique effective est néanmoins plus élevée pour la faible température de plaque.

La figure 5.21a propose d'analyser l'évolution de l'écart entre l'humidité absolue de l'air et celle prise à la température du givre à saturation. En début de test, l'écart de concentration est important entre les deux tests. Il tend à se réduire au bout d'une quarantaine de minutes. C'est cet écart conséquent en début de test qui provoque la forte croissance de la couche de givre : une quantité plus importante de vapeur vient givrer à la surface favorisant l'épaississement.



(a) Variation de l'épaisseur du givre pour différentes températures de plaque froide (b) Variation de la conductivité thermique du givre pour différentes températures de plaque froide

FIGURE 5.19 – Impact de la température de la plaque froide sur les propriétés du givre

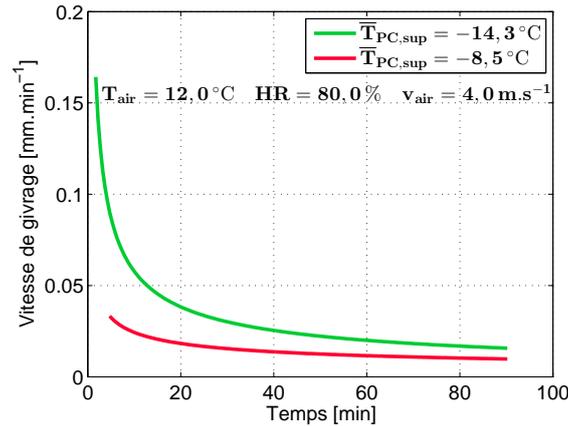
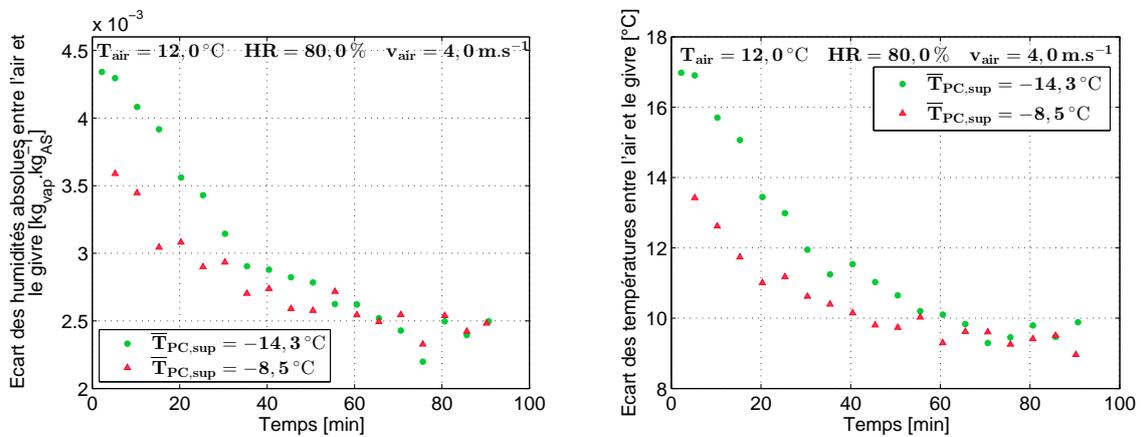


FIGURE 5.20 – Vitesses de givrage pour deux valeurs de températures de plaque froide



(a) Écart des humidités absolues entre l'air et la surface du givre (b) Écart de températures entre l'air et la surface du givre

FIGURE 5.21 – Écarts des humidités absolues et des températures pour des températures de plaque différentes

Après les premières 40 minutes, les écarts observés sont proches. Pour comprendre pourquoi les écarts tendent vers des valeurs similaires, il faut s'intéresser à l'évolution de la différence de température entre l'air et le givre. La figure 5.21b met en avant le même type de conclusion : l'écart observé pour les deux températures de plaque est important en début de test, dû à une différence de 6 K entre les deux cas. Mais, cet écart tend à se résorber au bout d'une quarantaine de minutes. Face aux échanges importants et à la sublimation inverse très active lorsque la température de la plaque est faible, la surface du givre se réchauffe plus rapidement.

La figure 5.22 présente le type de cristaux obtenus initialement pour chacun des cas et apporte des informations complémentaires. À faible température de surface, les cristaux formés se présentent sous forme de bâtons tandis qu'à une température plus élevée, ils sont sous forme de flocons. Il est aisé d'imaginer que des cristaux sous forme de bâtons provoquent une couche de givre plus dense que sous forme de flocons. Les bâtons, de part leur forme favorisent aussi probablement la conduction de la chaleur, impliquant une conductivité plus élevée.

Ces observations permettent de comprendre qu'une paroi plus froide favorise l'épaissis-

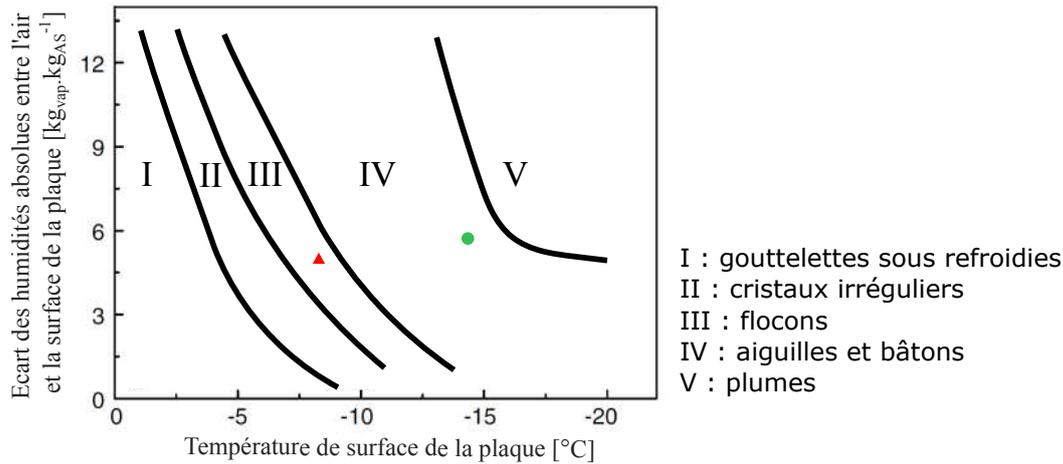


FIGURE 5.22 – Morphologie des cristaux de givre : impact de la température de la plaque froide (cartographie issue des travaux de Wu et al. [88])

sement de la couche de givre mais aussi probablement sa densification. Un givre formé à température plus froide conduit mieux la chaleur. La densification n'est probablement pas la seule responsable, la forme de cristaux joue aussi un rôle important.

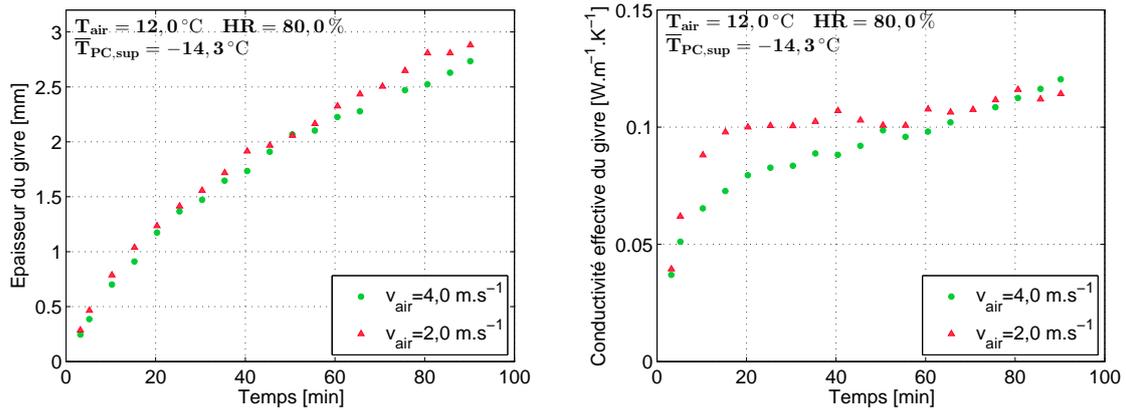
### 5.3.4 Impact de la vitesse de l'air

L'impact de la vitesse de l'air sur la formation du givre est abordé dans cette partie. Pour cela, deux tests à des vitesses différentes sont réalisés (2 et 4 m.s<sup>-1</sup>). Les nombres de Reynolds dans la veine d'air sont respectivement de 60 000 et 120 000. Le régime est donc fortement turbulent.

La figure 5.23a met en avant le faible impact de la vitesse de l'air sur l'épaisseur du givre. À faible vitesse, le givre semble un tout petit peu plus épais. Ce faible impact est aussi remarqué sur la conductivité thermique : les deux vitesses ne présentent pas la même évolution en début de test mais semblent tendre vers des valeurs similaires en fin de test. Le fait que le givre dépende peu de la vitesse d'air est peu intuitif. Il est en effet facile de penser, qu'une vitesse plus élevée localement favorise les échanges et donc entraîne des écarts plus importants.

La figure 5.24 montre l'évolution de la densité de flux total, de chaleur et issu du flux de matière au cours du temps. Le test avec la vitesse plus élevée présente des densités de flux de chaleur et issu du transfert de masse plus élevées. Ceci paraît logique puisque les coefficients de transfert convectif et de masse sont d'autant plus importants que la vitesse est élevée. Par contre, ces conclusions vont à l'encontre des évolutions de l'épaisseur et de la conductivité observées ci-dessus.

Pour comprendre ce phénomène, il faut s'intéresser aux évolutions des écarts d'humidités absolues et aux températures de surface du givre. La figure 5.25a présente l'évolution de l'écart des humidités absolues. L'écart est plus important lorsque la vitesse est plus faible. Cette différence est due aux températures de surface du givre. La figure 5.25b montre en effet que la température de surface du givre est plus faible lorsque la vitesse est plus basse. Bien qu'égaux en début de test, les températures de surface du givre évoluent différemment très rapidement. Le coefficient d'échange convectif plus élevé ne contribue pas à la croissance du givre mais au réchauffement de la surface provoquant



(a) Variation de l'épaisseur du givre pour différentes vitesses d'air (b) Variation de la conductivité thermique effective du givre pour différentes vitesses d'air

FIGURE 5.23 – Variation des propriétés du givre pour différentes vitesses d'air

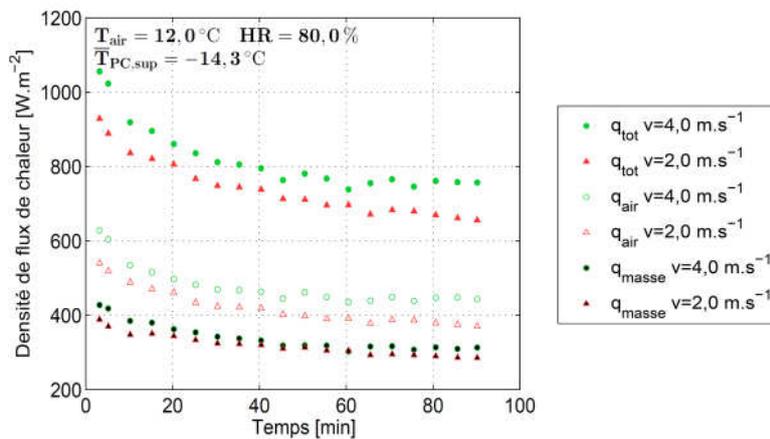
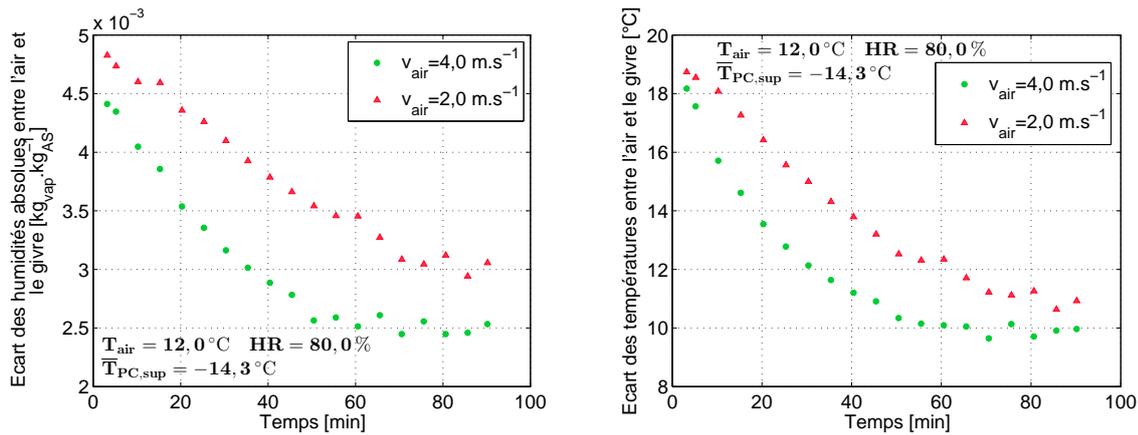


FIGURE 5.24 – Évolution des flux de chaleur et de matières pour différentes vitesses d'air

l'effet contraire. La partie précédente a en effet montré que la température de la surface froide avait un impact conséquent sur la quantité de givre déposée. Ces deux tests illustrent ce phénomène. Ceci peut expliquer pourquoi le givre semble légèrement plus épais quand la vitesse diminue.

Les plus faibles températures de plaque pour la vitesse de  $2 \text{ m.s}^{-1}$  peuvent aussi expliquer l'allure de la courbe de la conductivité. Les basses températures ont provoqué la naissance d'un givre très dense. Au contraire, à  $4 \text{ m.s}^{-1}$  le givre initialement formé est moins dense, mais se densifie par la suite en raison d'une température de surface plus élevée au contact de l'air. Dans le premier cas la densification se fait brutalement et évolue plus lentement suite au réchauffement de la surface tandis que dans le second cas, la densification se fait de manière continue.

Ces nouvelles constatations sur l'impact de la vitesse d'air viennent compléter les résultats contradictoires observés dans la littérature (ceux de Hermes et al. [24] et Lee and Ro [47] présentés dans le chapitre 3). Dans tous les cas, la vitesse de l'air ne semble pas être un paramètre très influent sur la formation du givre. Les effets de la vitesse ont peut-être aussi été minimisés car l'étude a été effectuée uniquement au centre de la plaque. Les conséquences se font peut-être davantage sentir à proximité du bord d'attaque.



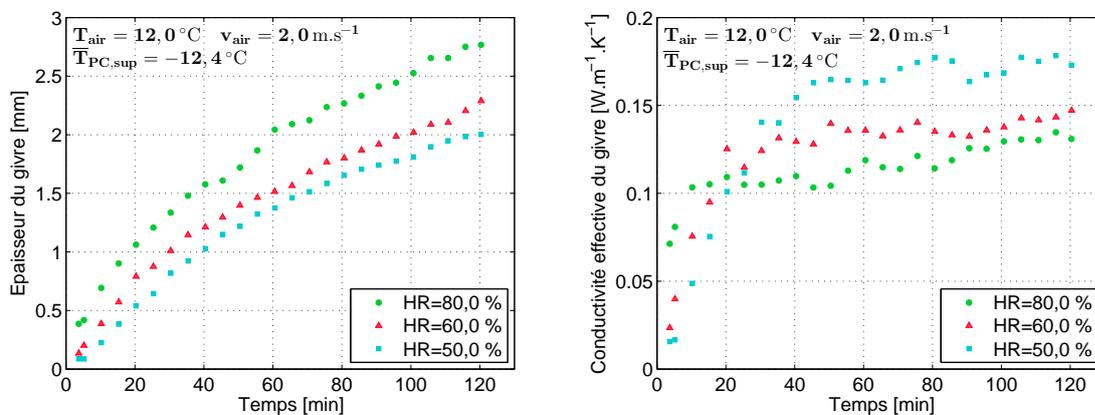
(a) Écart des humidités absolues entre l'air et la surface du givre (b) Écart de température entre l'air et la surface du givre

FIGURE 5.25 – Écarts des humidités absolues et des températures pour des vitesses d'air différentes

### 5.3.5 Impact de l'humidité relative

Cette partie a pour objectif l'étude de l'impact de l'humidité relative de l'air sur la formation du givre. Trois tests ont été réalisés pour des humidités de 80, 60 et 50 %. Les résultats obtenus pour l'épaisseur et la conductivité effective du givre sont présentés sur les figures 5.26a et 5.26b respectivement.

L'épaisseur du givre est fortement influencée par l'humidité relative. En effet, au bout de 120 minutes, un givre déposé avec une humidité de 80 % est 30 % plus épais que lorsqu'il est déposé à une humidité de 50 %. À température d'air constante, l'épaisseur augmente avec l'humidité relative. La conductivité thermique effective présente un comportement opposé, elle diminue lorsque l'humidité relative augmente. De plus, les courbes de conductivité thermique présentent un croisement en début de test. Au premier abord, les résultats constatés sur l'épaisseur semblent faciles à comprendre mais



(a) Variation de l'épaisseur du givre pour différentes humidités relatives (b) Variation de la conductivité thermique effective du givre pour différentes humidités relatives

FIGURE 5.26 – Variation des propriétés du givre pour différentes humidités relatives

ceux sur la conductivité thermique le sont moins.

La figure 5.27, qui présente les différentes vitesses de givrage, permet de comprendre les croisements observés sur les courbes de la conductivité thermique.

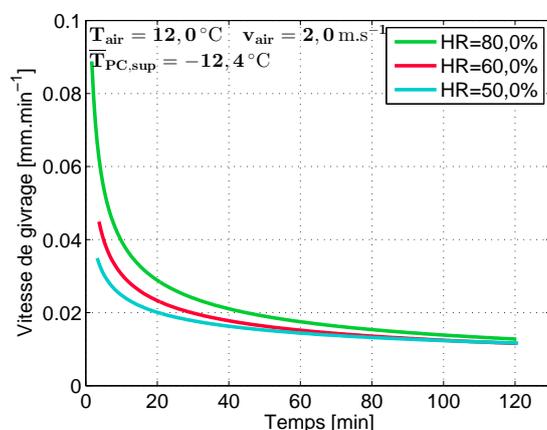
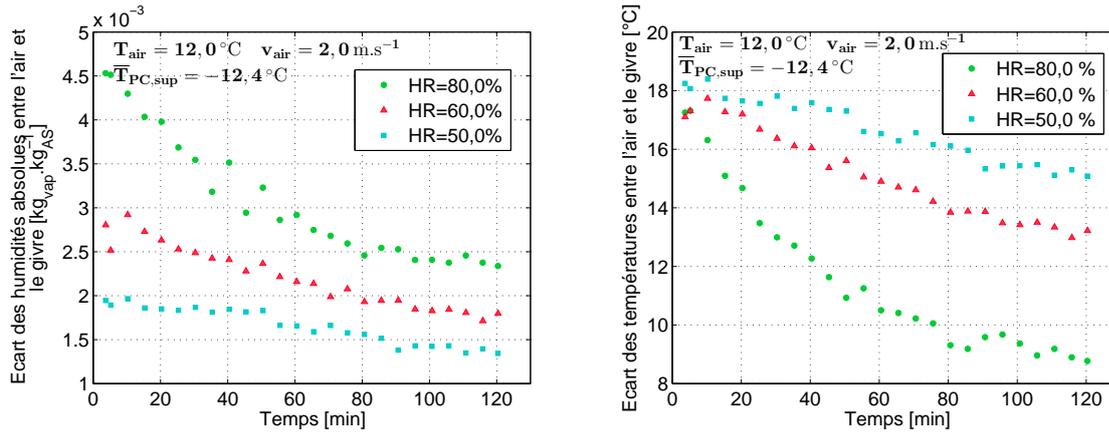


FIGURE 5.27 – Vitesses de givrage pour différentes humidités relatives

La vitesse de givrage à 80 % d'humidité relative est bien plus élevée en début de test que pour les deux autres humidités. Ceci engendre un dépôt de givre dense dès les premiers instants et donne lieu à une croissance de la conductivité plus élevée que pour les autres humidités relatives. En résulte donc, une stabilisation beaucoup plus rapide de la conductivité thermique.

Pour enrichir le raisonnement, il faut s'intéresser aux écarts d'humidités absolues et de températures. La figure 5.28a présente les écarts d'humidités absolues pour chaque humidité relative. Les écarts, qui diminuent au cours du temps suite à l'augmentation de la température de surface du givre (figure 5.28b), sont plus élevés pour les humidités relatives élevées. Ceci justifie bien que le givre est plus épais lorsque l'air est fortement chargé en eau.

Les évolutions des écarts de températures du givre présentent des comportements différents selon l'humidité. En effet, à 50 et 60 %, les écarts diminuent moins qu'à 80 %. À faible humidité, la température du givre augmente moins favorisant le dépôt par sublimation inverse. En revanche, à humidité relative plus élevée, il est possible que le givre se forme par condensation puis solidification. Ce dernier type de phénomène favorise la densification du givre. Or, il est assez logique de penser qu'un givre plus dense est aussi plus conducteur, ce qui est en contradiction avec les observations sur la conductivité thermique du givre. La section suivante propose de vérifier l'évolution de la masse volumique au cours du temps pour ce test afin de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu.



(a) Écart des humidités absolues entre l'air et la surface du givre (b) Écart de température entre l'air et la surface du givre

FIGURE 5.28 – Écarts des humidités absolues et de températures pour des humidités relatives différentes

## 5.4 Lien avec la masse volumique du givre

Cette section propose de se concentrer davantage sur les propriétés du givre et notamment la masse volumique. Il a été précisé dans le chapitre précédent que la masse volumique était un paramètre difficile à mesurer qui nécessite malheureusement une quantité de tests bien plus importante que les autres paramètres. Néanmoins, afin de proposer une analyse plus complète de l'impact de l'humidité relative sur la formation du givre, des relevés de masse et donc de masse volumique ont été effectués pour les conditions de tests de la partie précédente. La masse volumique a été relevée à chaque fin de test de durées de 30, 60, 90 et 120 minutes. Ces relevés ont été effectués pour les trois humidités relatives ci-dessus. Ce qui correspond à un nombre de 12 points. Ce nombre peut paraître assez faible mais malheureusement la masse volumique nécessite autant de tests que de points.

La figure 5.29 présente l'évolution de la masse de givre déposée au cours des trois tests. La masse de givre déposé augmente lorsque l'humidité relative augmente, résultat logique compte tenu des écarts d'humidités absolues. Il peut aussi être noté que la masse évolue linéairement en fonction du temps. Ce qui peut permettre de retrouver facilement des données lorsqu'elles sont manquantes. Le fait qu'une quantité de givre plus importante est déposée à humidité élevée ne permet pas de conclure quant à la masse volumique, qui doit être déterminée à partir de l'épaisseur.

La figure 5.30 présente les résultats obtenus pour la masse volumique. La masse volumique, comme attendu, augmente avec l'humidité relative. Il peut aussi être noté qu'elle évolue en  $\sqrt{t}$  aux temps longs comme l'avait identifié Hermes [23]. Cette observation sur la masse volumique ne permet pas d'expliquer pourquoi la conductivité thermique effective diminue lorsque l'humidité relative augmente.

De récentes recherches sur la conductivité et plus généralement sur la caractérisation des phénomènes de givrage ont mis en évidence d'autres paramètres que la masse volumique. Certains auteurs (Negrelli and Hermes [64]) complètent la notion de porosité (paramètres linéairement lié à la masse volumique) par la notion de tortuosité. La tortuosité est relative au chemin que peuvent emprunter la vapeur d'eau ou les gouttelettes liquides au sein de l'épaisseur du givre. Elle est donc plus caractérisée par la

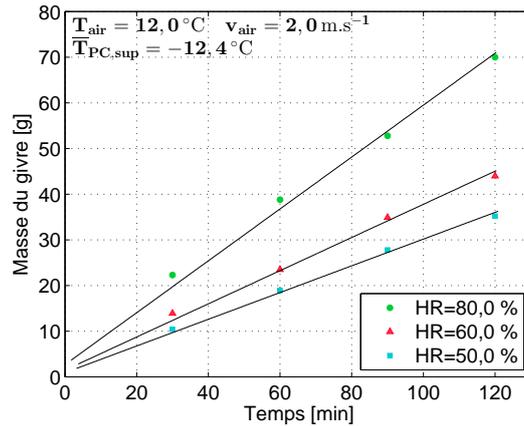


FIGURE 5.29 – Masse de givre déposé sur la plaque pour différentes humidités relatives

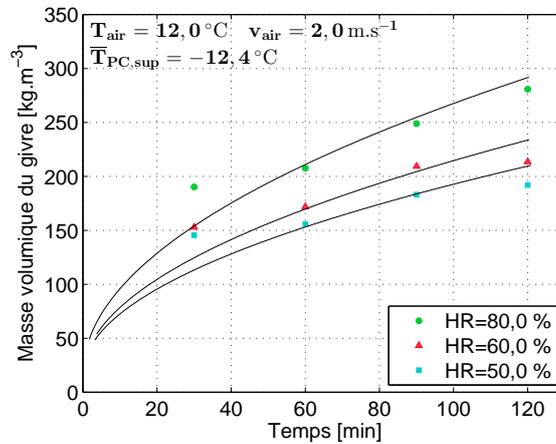


FIGURE 5.30 – Évolution de la masse volumique du givre pour différentes humidités relatives

géométrie des cristaux. Malheureusement, le dispositif expérimental actuel ne permet pas d’observer et de mesurer de manière aussi fine les cristaux de givre formés. Il est néanmoins possible de s’inspirer d’une étude proposée par Wu et al. [88] qui a réalisé la cartographie du givre (déjà utilisée dans cette étude). Les courbes établies par Wu et al. [88] ont été réutilisées. Pour comprendre le comportement de la vapeur d’eau lorsqu’elle entre en contact avec la surface du givre, deux types de points ont été placés sur la carte (tous les points ont été laissés pour une meilleure visibilité) :

- les trois points initiaux, correspondants aux conditions des tests (tracés à partir de la température de la plaque) ;
- les points relevés tout au long du test basés sur la température de surface du givre et non plus sur la température de la plaque froide.

La figure 5.31 met en évidence l’écart de morphologie entre les points initiaux et ceux mesurés par la suite. Les points initiaux présentent des structures de givre communes : ils sont tous sous forme d’aiguilles et bâtons. Le grand espace observé entre les types de points est dû à la méconnaissance de la température de surface du givre en début de test. La caméra infrarouge utilisée nécessite une épaisseur minimum de givre afin de ne plus ”voir” le feuillard. Ce sont probablement ces points qui permettraient d’identifier des cristaux différents en fonction des tests et donc de proposer davantage de conclusions. Néanmoins, en s’intéressant aux premiers points enregistrés, il semble qu’une humidité

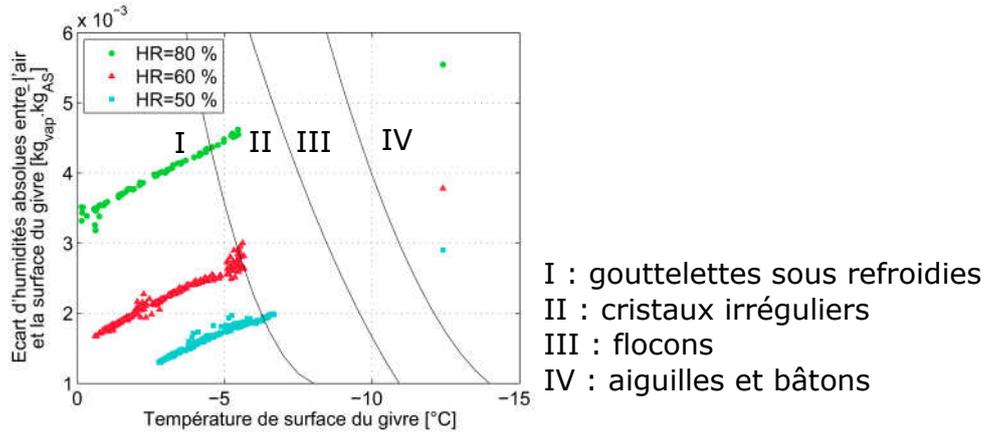


FIGURE 5.31 – Points expérimentaux positionnés sur la cartographie de Wu et al. [88]

relative élevée donne lieu à un givrage favorisant l'apparition de cristaux irréguliers alors que les plus faibles humidités donnent naissance à des gouttes d'eau sous refroidies plus rapidement. Ce sont peut-être ces cristaux irréguliers formés en début de test qui ont un impact néfaste sur la conductivité du givre malgré une densification plus importante. La tortuosité engendrée par ces cristaux n'est peut être pas favorable à la diffusion de la vapeur d'eau provoquant une sous-couche de givre moins conductrice. La densification est peut-être très active au dessus de cette sous couche ce qui permet d'améliorer sa conductivité. Le fait que les cristaux formés ne favorisent pas la tortuosité ne signifie pas pour autant qu'ils sont moins conducteurs comme le montre la figure 5.26b. En effet, leur géométrie a peut être comme conséquence de bloquer la diffusion de la vapeur et laisser une sous-couche initialement plus conductrice, mais qui devient limitante face à d'autres couches de givre dans lesquelles la densification s'est produite plus facilement et donc plus efficacement. Il faut aussi garder à l'esprit que ce ne sont que des hypothèses qui nécessitent d'être approfondies par les études qui suivront mais aussi par d'autres chercheurs intéressés par le sujet. D'autant plus que ce type de cartographie n'a été proposé que par un groupe de chercheurs (Wu et al. [88]). Malgré la fiabilité des recherches, il serait intéressant qu'un autre banc expérimental permette de confirmer ces résultats.

## 5.5 Synthèse

Ce chapitre a permis à la fois de mieux comprendre les phénomènes physiques liés au givrage mais aussi de mettre en évidence des problématiques qui nécessitent davantage de recherches.

L'étude bidimensionnelle a montré que travailler sur la formation du givre en deux dimensions pouvait s'avérer intéressant. Diverses études ont néanmoins permis de valider la représentativité des résultats observés au centre de la plaque. L'écart entre les valeurs intégrales moyennées et les valeurs au centre est au maximum de 30 %. Cette validation a permis de ne considérer que le centre de la plaque. L'analogie de Lewis a pu être vérifiée grâce à deux types de relevés expérimentaux indépendants. Cette analogie facilite les calculs et a permis de réaliser une étude de sensibilité approfondie des paramètres environnementaux.

Les paramètres environnementaux ayant fait l'objet d'une étude de sensibilité sont :

- la température de l'air à humidité relative constante ;
- la température de l'air à humidité absolue constante ;
- la température de la plaque froide ;
- la vitesse de l'air ;
- l'humidité relative de l'air.

L'épaisseur du givre augmente lorsque :

- la température de l'air à humidité relative constante augmente, avec un impact peu important. Les écarts de températures et d'humidités absolues, plus importants lorsque la température de l'air augmente, favorisent le dépôt du givre en surface ;
- la température de l'air à humidité absolue constante diminue. Les recherches ont permis d'émettre l'hypothèse qu'une température d'air plus élevée à humidité absolue constante favorise la densification, à travers une masse d'eau déposée plus importante, et qu'en opposition, une température plus faible provoque l'apparition d'un givre plus épais et moins lourd donc moins dense ;
- la température de la plaque froide diminue, favorisant la sublimation inverse. Les écarts de températures et d'humidités absolues élevés impliquent le givrage d'une quantité d'eau plus importante, donnant naissance à une couche de givre plus épaisse ;
- la vitesse de l'air diminue, avec un impact peu important. Ce résultat au premier abord est peu intuitif. Les vitesses d'air plus élevées provoquent une augmentation des coefficients de transferts de masse et de chaleur. En parallèle, la baisse de l'écart d'humidités absolues et l'augmentation de la température de surface permettent de comprendre que les coefficients de transferts élevés ne provoquent pas la croissance du givre mais le réchauffement de la surface. Les liens identifiés auparavant entre la température de surface du givre et l'épaisseur permettent de comprendre pourquoi l'épaisseur est un petit peu plus élevée quand la vitesse diminue ;
- l'humidité relative de l'air augmente. Les écarts de températures et d'humidités absolues, moteurs, favorisent l'épaississement de la couche de givre.

La conductivité thermique effective du givre augmente lorsque :

- la température de l'air à humidité relative constante augmente, avec un impact peu important. L'épaississement de la couche de givre couplé à l'augmentation de la température de l'air entraîne une élévation de la température de surface du givre. Cette température plus élevée provoque la fonte du givre en surface et le dépôt par condensation et donc l'infiltration. L'étude de la morphologie des cristaux formés permet d'émettre l'hypothèse qu'une température d'air élevée favorise la densification et donc l'augmentation de la conductivité thermique ;
- la température de la plaque froide diminue. La forme des cristaux semble jouer un rôle important sur la conductivité thermique du givre. Des températures de plaque froide plus faibles provoquent l'apparition de cristaux (en forme de bâtons) favorisant d'une part la densification mais aussi impactant directement la conductivité. Les températures plus élevées ont donné naissance à des cristaux en forme de flocons, qui sont supposés moins conducteurs ;
- l'humidité relative de l'air diminue. En début de test, le phénomène inverse est observé, la conductivité thermique effective est plus élevée pour des humidités

relatives plus importantes en raison de vitesses de givrage élevées. Par la suite, les phénomènes s'inversent, laissant un givre moins conducteur pour les humidités relatives élevées. Les humidités relatives élevées mènent aussi à la formation d'un givre plus dense. Pour comprendre pourquoi ce givre plus dense est moins conducteur, il faut s'intéresser à la tortuosité et donc à la morphologie des cristaux. En cours de test, des cristaux différents sont formés selon les humidités relatives. À humidité relative élevée, les cristaux sont irréguliers. Ces cristaux peuvent être responsables d'une tortuosité ayant un impact néfaste sur la diffusion de la vapeur, ce qui peut expliquer pourquoi le givre formé est à la fois plus épais, plus dense mais moins conducteur.

L'impact de la température de l'air à humidité absolue constante et de la vitesse de l'air ne sont pas renseignés pour la conductivité thermique car les conclusions obtenues ne sont pas contrastées.

Les résultats considérés comme non intuitifs ont fait l'objet d'une étude approfondie, ce qui est le cas pour l'humidité relative. Les études effectuées sur les points de masse volumique expérimentaux ont montré que la conductivité thermique du givre est une propriété difficile à évaluer. Il semblerait qu'elle ne soit pas uniquement dépendante de la masse volumique du givre, mais que sa structure joue un rôle non négligeable. En effet, le type de cristaux formés en début et au cours du test aurait une influence sur la diffusion de la vapeur ou de l'eau dans la couche de givre. C'est pourquoi la notion de tortuosité liée à la structure du givre, devrait être introduite pour qualifier la couche de givre.

# Chapitre 6

## Confrontation des modèles et des résultats expérimentaux

Ce chapitre a pour objectif de comparer les données expérimentales aux résultats fournis par différents modèles et corrélations. Les trois paramètres étudiés sont l'épaisseur du givre, sa masse volumique et sa conductivité thermique effective. Les travaux réalisés sont similaires à ceux réalisés dans le troisième chapitre de ce travail de thèse qui compare les modèles à des bases de données issues de résultats expérimentaux de la littérature. L'objectif est double : il s'agit de situer les résultats expérimentaux de cette thèse par rapport aux modèles mais aussi par rapport à la base de données de la bibliographie. Les trois premières parties de ce chapitre traitent respectivement de chaque paramètre étudié. Une dernière partie propose d'utiliser les modèles pour traiter des problématiques plus industrielles.

### 6.1 Prédiction de l'épaisseur du givre

Cette première partie se concentre sur la prédiction de l'épaisseur du givre. Pour cela, les différents modèles et corrélations qui avaient été utilisés dans le chapitre 3 sont appliqués. Les modèles et corrélations de Hermes [23], Hermes et al. [24], Schneider [76] ont été identifiés comme les plus satisfaisants. Leurs résultats, appliqués à la base de données des points expérimentaux sont présentés par la suite.

#### 6.1.1 Comparaison des points expérimentaux avec les différents modèles et corrélations

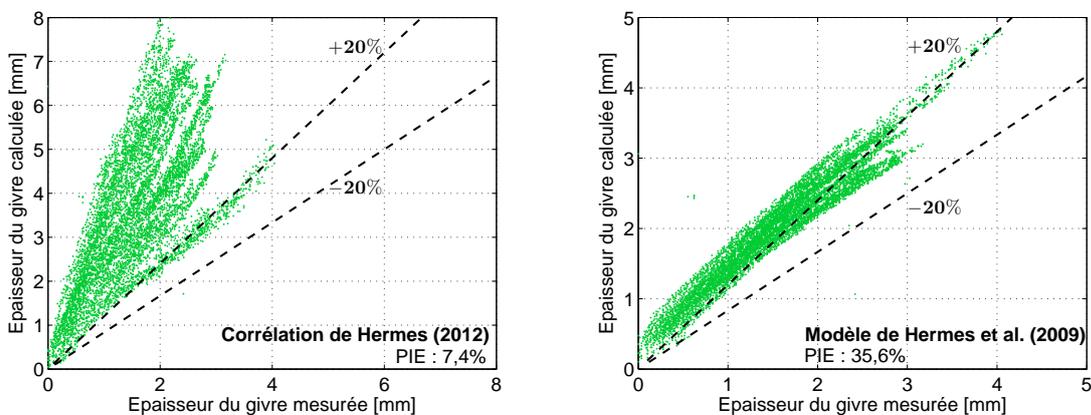
Cette partie se base sur une étude quantitative, qui fait appel à tous les points expérimentaux réalisés. La figure 6.1a montre que le modèle simplifié de Hermes [23] ne mène pas à de bonnes prédictions des résultats expérimentaux. Seulement 7,4 % des résultats sont compris dans l'intervalle des  $\pm 20$  %. Lors de l'application à la base de données de la littérature, ce modèle a montré de bien meilleurs résultats puisque 40,8 % de la base de données était comprise dans l'intervalle d'erreur de  $\pm 20$  %. Les tests réalisés sont pourtant compatibles avec les conditions environnementales pour lesquelles ce modèle est valide. Les écarts observés peuvent néanmoins être expliqués par les calculs de masse volumique et de conductivité thermique du givre. En effet, ces deux paramètres sont nécessaires à l'utilisation du modèle. Deux corrélations empiriques sont utilisées pour la masse volumique et la conductivité thermique. Ces paramètres, encore

mal maîtrisés, donnent lieu à des corrélations souvent déterminées uniquement à partir des données expérimentales d'un seul auteur. Le manque de fiabilité de ces corrélations peut expliquer les écarts observés entre les résultats expérimentaux et ceux calculés.

La figure 6.1b présente les résultats obtenus avec le modèle de Hermes et al. [24]. Ce modèle donne de meilleurs résultats que le précédent : 35,6 % des points sont compris dans l'intervalle d'erreur. Ce modèle a tendance à surestimer la valeur de l'épaisseur du givre. Des observations similaires avaient été faites pour la prédiction de la base de données de la littérature (54,9 % des points étaient compris dans l'intervalle d'erreur de  $\pm 20\%$ ). Malgré un pourcentage plus faible, le modèle appliqué aux résultats expérimentaux issus du banc de tests présente une dispersion beaucoup plus faible que lors de l'application à la base de données de la littérature. Deux raisons peuvent expliquer les écarts observés :

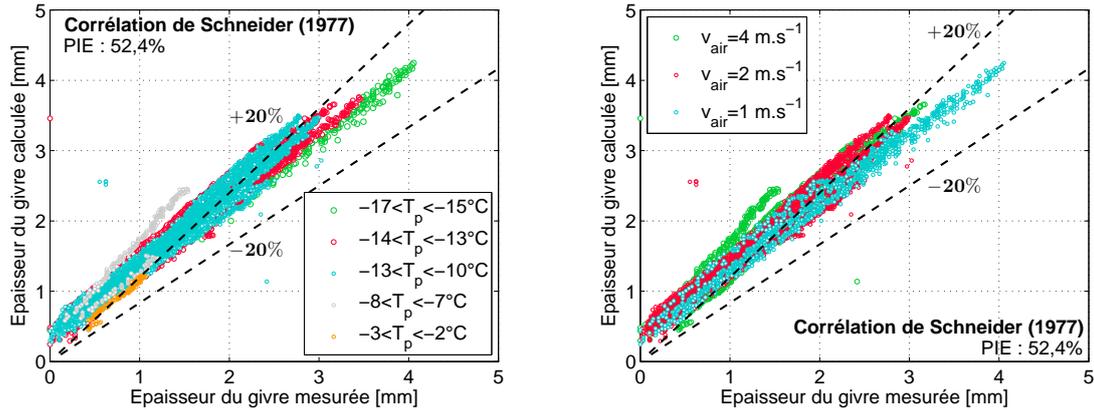
- La corrélation utilisée pour calculer la conductivité thermique effective du givre ne dépend que de la masse volumique. Il a été identifié dans de récentes études que la masse volumique du givre n'était pas l'unique paramètre influant sur la conductivité du givre. Cette corrélation n'est probablement pas la plus appropriée et peut être responsable des dérives observées. Ce paramètre intervient notamment dans le calcul de la température de surface du givre, qui est ensuite utilisée pour déterminer l'épaisseur.
- L'expression utilisée pour calculer le nombre de Nusselt et donc le coefficient d'échange peut aussi être responsable des écarts. En effet, l'expression du Nusselt utilisée est valable pour un nombre de Reynolds compris entre 6 000 et 50 000. Les nombres de Reynolds imposés par la vitesse d'air sont plus élevés pour les tests qui ont été réalisés, ce qui peut conduire à une mauvaise évaluation des coefficients de transfert de chaleur et de masse.

La figure 6.2 présente les résultats obtenus avec la corrélation de Schneider [76]. Les points présentés sur les deux figures sont identiques, ils ont juste été triés afin de faire apparaître l'impact de la température de la plaque et de la vitesse de l'air sur les prédictions. De manière générale, la corrélation de Schneider [76] prédit assez bien les résultats expérimentaux avec 52,4 % des points compris dans l'intervalle d'erreur de



(a) Modèle simplifié de Hermes [23] appliqué aux résultats expérimentaux (b) Modèle de Hermes et al. [24] appliqué aux résultats expérimentaux

FIGURE 6.1 – Prédications de l'épaisseur du givre à partir de deux modèles : Hermes [23] et Hermes et al. [24]



(a) Corrélation de Schneider [76] : variation de la température de la plaque (b) Corrélation de Schneider [76] : variation de la vitesse d'air

FIGURE 6.2 – Prédications de l'épaisseur du givre à partir de la corrélation de Schneider [76] : impact de la vitesse d'air et de la température de la plaque sur les prédictions

$\pm 20 \%$ . Appliquée à la base de données de la littérature, la corrélation de Schneider [76] prédit 66,7 % des points. Dans les deux cas, la corrélation surestime les valeurs de l'épaisseur du givre. Les résultats expérimentaux obtenus présentent une tendance similaire à ceux de la littérature.

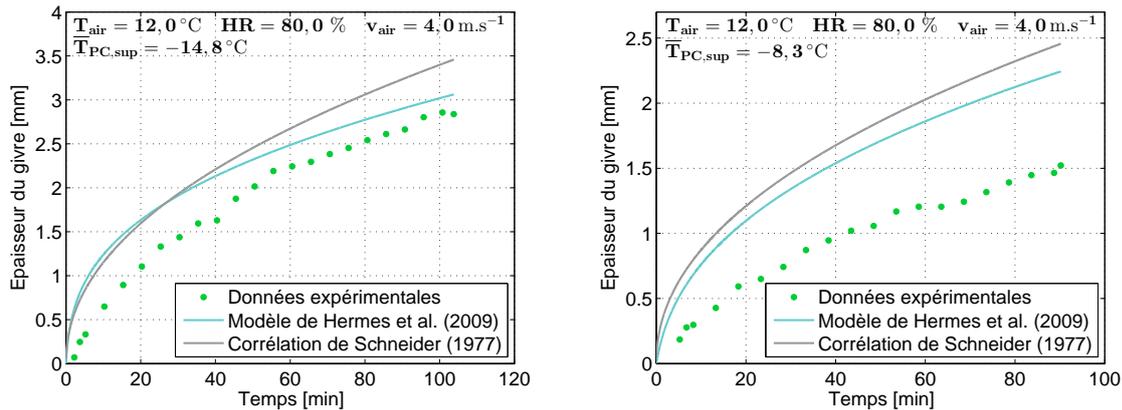
La figure 6.2a présente la répartition des résultats en fonction de la température de la plaque. Plus la plaque est froide plus les prédictions de la corrélation sont bonnes. La figure 6.2b montre que les prédictions de la corrélation sont meilleures lorsque la vitesse est plus faible. La raison est facilement identifiable : la corrélation est applicable à des écoulements dont le nombre de Reynolds est compris entre 4 000 et 32 000. Pour la vitesse de  $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ , le nombre de Reynolds est inférieur à 32 000. Ce n'est pas le cas pour les vitesses de  $2,0$  et  $4,0 \text{ m.s}^{-1}$ , ce qui peut expliquer les dérives observées.

Ces types de graphiques n'ont pas été présentés pour d'autres modèles / corrélations ni d'autres paramètres car ils ne montraient pas d'impact majeur. Seuls les graphiques dont les conclusions sont nettement identifiables sont présentés ici.

Les modèles et corrélations de Hermes et al. [24] et Schneider [76] présentent des résultats satisfaisants. Ils prédisent respectivement 35,6 et 52,4 % des points expérimentaux et présentent une faible dispersion. Ils surestiment tous les deux la valeur de l'épaisseur.

### 6.1.2 Impact de la température de la plaque froide et de l'humidité relative sur la prédiction de l'épaisseur du givre

Pour compléter cette étude, la capacité de prédiction des modèles pour deux des paramètres identifiés comme les plus influents a été testée à l'aide de graphiques qualitatifs. Comme dans le chapitre 3, pour ces tests, un seul paramètre varie, les autres étant maintenus constants. La figure 6.3 présente les résultats obtenus pour deux températures de plaque froide. Dans le premier cas, la température de la plaque froide est maintenue à  $-14,8 \text{ }^\circ\text{C}$  tandis qu'elle est de  $-8,3 \text{ }^\circ\text{C}$  pour le deuxième cas. La comparaison des deux graphiques montre que les prédictions du modèle et de la corrélation sont meilleures lorsque la température de la plaque est plus faible. Même si les valeurs numériques ne sont pas atteintes, les tendances des résultats sont respectées : les courbes théoriques et expérimentales présentent des allures proches. Des résultats



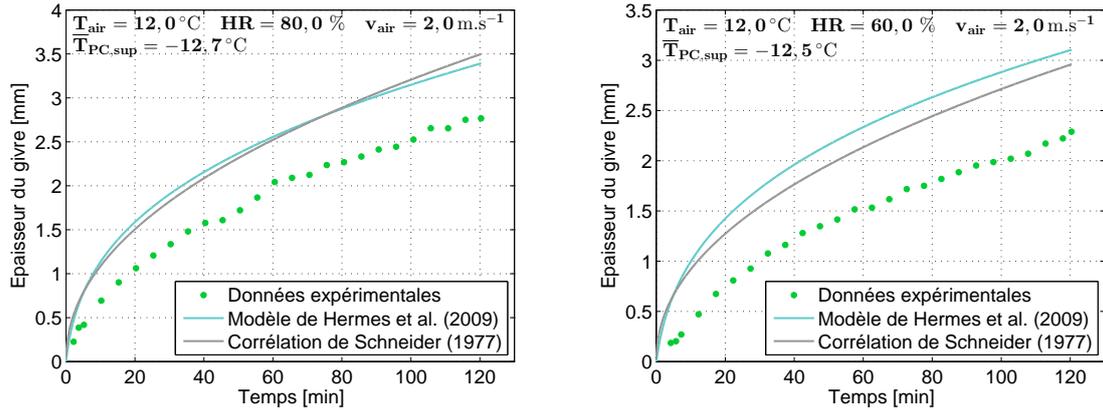
(a) Prédictions de l'épaisseur du givre à température de plaque relativement élevée (b) Prédictions de l'épaisseur du givre à faible température de plaque

FIGURE 6.3 – Prédictions de l'épaisseur du givre pour différentes températures de plaque froide

similaires avaient été observés lors de l'étude sur les points de données de la littérature. Une explication peut être donnée par la température de surface du givre. En effet, la faible température de plaque implique une température de surface du givre plus faible. Lorsque la température de surface du givre reste négative, le givre ne se forme que par sublimation inverse : phénomène plus facilement compris et identifié et donc mieux modélisé. Lorsque la température de la plaque froide est plus élevée, la température de surface du givre peut avoisiner 0 °C. À cette température, le givre ne se forme plus par sublimation inverse mais plutôt par condensation puis solidification. Cette température provoque aussi la fonte du givre en surface. Ces phénomènes sont plus difficiles à identifier et à détecter. C'est pourquoi les modèles peuvent être moins précis lorsque la température de la surface froide est plus élevée. Des études à une échelle plus fine permettraient éventuellement d'identifier la transition entre les deux régimes d'apparition et de croissance du givre.

La figure 6.4 présente un travail équivalent réalisé sur l'humidité relative. Les tests ont été réalisés pour des humidités de 60 et 80 %. Les graphiques montrent que la prédiction de l'épaisseur du givre est légèrement meilleure lorsque l'humidité relative est élevée et ce pour le modèle et la corrélation. Comme pour la température de la plaque, les tendances des résultats sont respectées. Pour la corrélation de Schneider [76], l'explication est fournie par le domaine d'applicabilité de la corrélation. En effet, sa corrélation a été définie pour des humidités relative comprises entre 96 et 99 %. Ces valeurs sont élevées, même pour le cas à 80 % d'humidité. Ces graphiques illustrent aussi la surestimation des valeurs déjà évoquée dans le paragraphe précédent. La détection du paramètre ou de la combinaison de critères entraînant la sur-évaluation de l'épaisseur dans chacune des méthodes pourrait constituer un travail futur.

Cette première étude sur la prédiction de l'épaisseur du givre a montré que les points expérimentaux obtenus avec le banc de tests mis en place mènent à des conclusions similaires à celles de la littérature. Le modèle de Hermes et al. [24] et la corrélation de Schneider [76] présentent des résultats satisfaisants, avec de faibles déviations. La non validité des corrélations dans les domaines testés peut expliquer une partie des écarts observés entre les résultats théoriques et pratiques. Néanmoins certaines limites



(a) Prédictions de l'épaisseur du givre à humidité relative élevée (b) Prédictions de l'épaisseur du givre à faible humidité relative

FIGURE 6.4 – Prédictions de l'épaisseur du givre pour différentes humidités relatives

des modèles se dégagent. L'identification de la transition entre les deux mécanismes d'apparition du givre semble nécessaire pour enrichir les modèles.

## 6.2 Prédiction de la masse volumique du givre

Cette partie s'intéresse aux corrélations disponibles dans la littérature capables de prédire la masse volumique du givre. Beaucoup de ces corrélations sont empiriques. Comme il a déjà été précisé au cours de ce manuscrit, seuls 12 points de masse volumique ont été réalisés dans cette étude, ce qui est assez peu mais mérite tout de même d'effectuer quelques investigations. Ces points, en nombre trop faible, ne seront pas utilisés pour développer une corrélation, qui ne serait pas suffisamment représentative. Les corrélations testées ont été proposées par les auteurs suivants :

- Hermes [23]
- Yang and Lee [92]
- Léoni et al. [52] (développée au cours de ce travail de thèse - Équation 3.10)
- Hermes et al. [25]
- Hayashi et al. [21]
- Hosoda and Uzuhashi [26]
- Kandula [35]

La figure 6.5 montre la prédiction des points de masse volumique pour chaque corrélation. Les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, aucune corrélation ne permet de prédire avec précision la masse volumique du givre mesurée.

La corrélation de Hosoda and Uzuhashi [26] présente un comportement particulier : les points sont tous alignés horizontalement, ce qui signifie qu'au moins un paramètre n'a pas été pris en compte. Cette corrélation dépend uniquement de la température de la plaque froide et de la vitesse. Un paramètre influent manquant est l'humidité relative qui semble avoir un impact important sur la masse volumique. De plus, la corrélation a été établie pour des températures d'air ne dépassant pas 10 °C. Les tests réalisés pour la masse volumique ont été effectués pour des températures d'air de 12 °C.

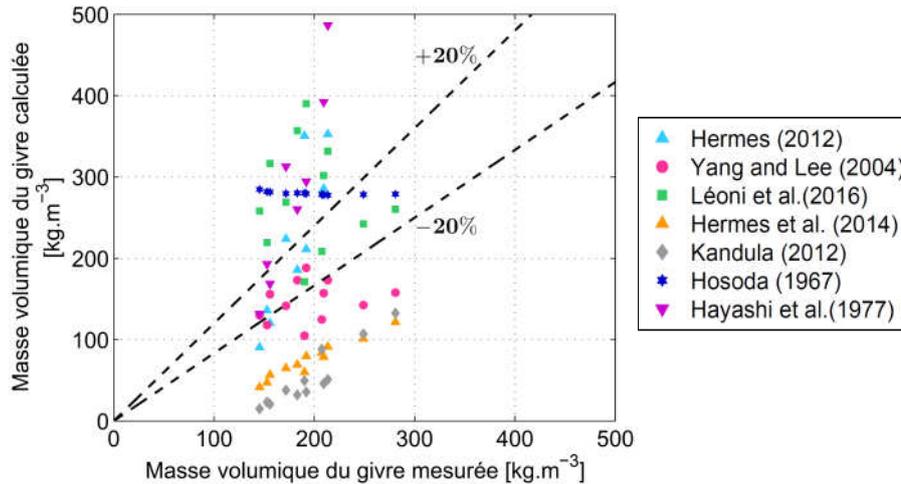


FIGURE 6.5 – Prédications de la masse volumique du givre

La corrélation de Kandula [35] minimise largement les valeurs de la masse volumique. En effet, les masses volumiques calculées avec la corrélation sont au moins deux fois inférieures aux valeurs mesurées. Comme Hosoda and Uzuhashi [26], Kandula [35] ne prend pas en compte dans la corrélation l'humidité relative de l'air.

La corrélation de Hayashi et al. [21] ne présente pas de meilleurs résultats. Elle ne dépend que de la température de surface du givre ce qui ne permet pas d'atteindre des résultats satisfaisants. De plus, la corrélation a été établie pour une humidité absolue qui ne correspond à aucune de celles utilisées lors des tests expérimentaux.

La corrélation de Hermes et al. [25] présente une allure cohérente mais minimise considérablement les valeurs de la masse volumique. Cette corrélation, qui prend en compte le nombre de Jakob modifié (donc la température et l'humidité de l'air) et le temps n'est pas totalement applicable aux tests réalisés. En effet, elle a été identifiée pour des températures d'air comprises entre 16 et 22 °C et pour une vitesse de 0,7 m.s<sup>-1</sup> alors que la température et la vitesse des tests sont respectivement de 12 °C et 2,0 m.s<sup>-1</sup>. Ces différences peuvent être responsables de la sous-estimation des valeurs de la masse volumique. Néanmoins la prise en compte de la racine carrée du temps (comme il a été observé dans le chapitre précédent) permet d'obtenir une allure cohérente pour les points de masse volumique.

La corrélation proposée dans cette thèse dans le chapitre 3 (Léoni et al. [52] basée sur les points de la littérature - Équation 3.10) a aussi été testée. Elle ne présente pas non plus des résultats très satisfaisants. En effet, il semblerait que les résultats de masse volumique présentés dans la littérature soient particulièrement variés, probablement parce qu'ils sont difficiles à mesurer. Chaque auteur développe sa propre corrélation, qui n'est en réalité applicable à aucun autre jeu de données. Même une corrélation élargie réalisée sur un nombre de points de données important ne permet pas d'aboutir à des résultats concluants. La corrélation pour la densité proposée dans cette étude surestime les valeurs de masse volumique. Un paramètre supplémentaire semble être nécessaire pour prédire les valeurs expérimentales.

La corrélation de Hermes [23] présente des résultats légèrement meilleurs, une partie des points peut être prédite. Ceux qui sont mal évalués sont surestimés mais moins que pour les autres corrélations. Encore une fois, le domaine d'application de la corrélation n'est pas complètement respecté. En effet, l'écart d'humidités absolues entre l'air et

la plaque défini pour la corrélation est supérieur à  $0,0057 \text{ kg}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$  alors que pour les tests réalisés l'écart est toujours inférieur à cette valeur ( $0,0056$  pour une humidité relative de 80 %,  $0,0038$  pour 60 % et  $0,0029$  pour 50 %).

Enfin, la dernière corrélation testée, celle de Yang and Lee [92] présente des résultats acceptables. La relation minimise généralement la masse volumique du givre. Comme les corrélations de Hermes et al. [25] et Léoni et al. [52], cette relation dépend de paramètres faisant intervenir la vitesse, l'humidité, la température de l'air et la température de la plaque froide. Elle fait, de plus, intervenir le coefficient de transfert de masse, peut-être en partie responsable des meilleurs résultats. Cependant, elle ne fait pas intervenir le temps, paramètre qui semble essentiel. Incorporer le temps dans cette relation peut être une piste d'amélioration.

Pour approfondir la réflexion, les trois corrélations jugées les meilleures à la suite du test précédent ont été réutilisées en faisant apparaître le paramètre variant : l'humidité relative. Les tests sont ainsi identifiés chacun selon la corrélation et l'humidité afin d'identifier s'il existe un lien entre l'humidité relative et les mauvaises prédictions. La figure 6.6 présente les résultats obtenus.

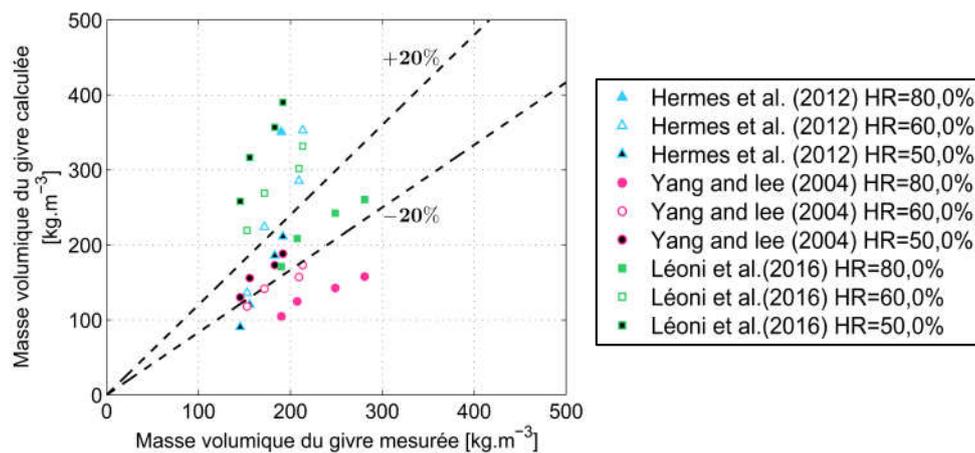


FIGURE 6.6 – Prédications de la masse volumique du givre : variation de l'humidité relative

Aucun lien ne semble pouvoir être établi entre l'humidité relative et la capacité ou non à prédire la masse volumique du givre : des résultats dispersés peuvent être identifiés pour chacune des trois humidités relatives.

Les verrous liés à la masse volumique du givre et à sa prédiction ne semblent pas encore levés. Ces difficultés concernent aussi bien l'aspect théorique que l'aspect pratique. En effet, la masse volumique est un paramètre expérimentalement difficile à mesurer c'est pourquoi certaines valeurs de la littérature ne sont peut être pas totalement fiables. Ces valeurs sont responsables de la création de corrélations inadaptées et ne facilitent pas la validation de nouveaux points expérimentaux. Pour lever ces verrous, il est nécessaire de développer une méthode de mesure de la masse volumique du givre fiable afin de comparer les modèles à des points expérimentaux robustes. Par ailleurs, la théorie nécessite elle aussi d'être approfondie. Comme pour l'épaisseur, la détection de la transition entre les deux mécanismes d'apparition du givre est nécessaire. La présence d'eau sous forme liquide ou vapeur dans la couche de givre a forcément un impact sur la masse volumique du givre. Enfin, un autre paramètre, encore mal maîtrisé,

est la structure du givre. La forme des cristaux de givre semble impacter la masse volumique du givre. C'est pourquoi, des recherches devraient aussi être menées dans cette direction.

## 6.3 Prédiction de la conductivité thermique effective du givre

Cette partie a pour but d'évaluer les différentes corrélations proposées dans la littérature pour calculer la conductivité thermique effective du givre. La difficulté réside dans le fait que la conductivité thermique du givre est supposée dépendre fortement de la masse volumique du givre. Comme le nombre de points expérimentaux pour la masse volumique est faible, il est nécessaire de choisir une corrélation de la littérature pour la masse volumique qui est ensuite utilisée dans le calcul de la conductivité thermique. Or, la partie précédente a montré qu'il est difficile d'identifier une méthode fiable de prédiction de la masse volumique, ce qui ne facilite pas le travail pour la conductivité thermique.

Les corrélations de conductivité thermique testées sont listées ci-dessous :

- Negrelli and Hermes [64] ;
- Brian et al. [7] ;
- Auracher [1] ;
- Na and Webb [62] ;
- Yang and Lee [92] ;
- Yonko and Sepsy [95].

La plupart de ces corrélations dépendent de la masse volumique. Or, une grande partie d'entre elles ne sont pas fournies avec une corrélation pour la masse volumique étant donné que les auteurs disposaient de points expérimentaux lors de leur établissement. Pour pouvoir tester ces corrélations, il a donc fallu choisir une corrélation capable de calculer la masse volumique à partir des conditions environnementales dans lesquelles ont été réalisés les tests expérimentaux. Ainsi, il a été décidé de tester chacune des corrélations recensées dans la partie sur la masse volumique avec chacune des corrélations de la conductivité présentées ci-dessus. C'est pour cela que parmi les résultats présentés, certaines corrélations de conductivité sont associées à des corrélations de masse volumique qui leur sont postérieures. Les résultats obtenus sont donc issus d'un couple de corrélations masse volumique/conductivité.

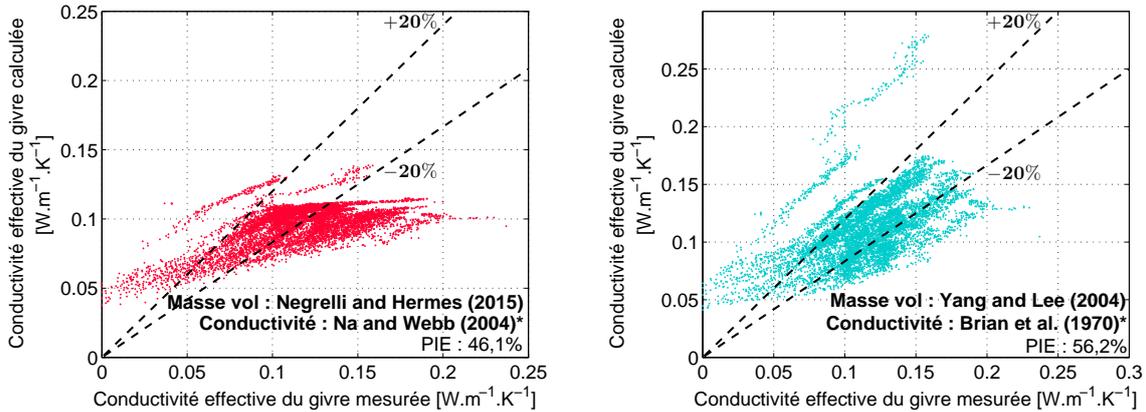
### 6.3.1 Comparaison de la base de données expérimentales aux différentes corrélations

Les trois couples qui prédisent le mieux la conductivité du givre sont présentés sur la figure 6.7.

La figure 6.7a présente les résultats obtenus pour la combinaison de la corrélation de la masse volumique de Negrelli and Hermes [64] et celle de Na and Webb [62] modifiée pour la conductivité. Cette combinaison permet de prédire 46,1 % des points expérimentaux. Au vu des graphiques obtenus pour la masse volumique, ces premiers résultats sont plutôt satisfaisants et encourageants. La corrélation de Na and Webb [62] n'est appropriée que pour les tests courts ce qui peut expliquer la déviation d'un nombre

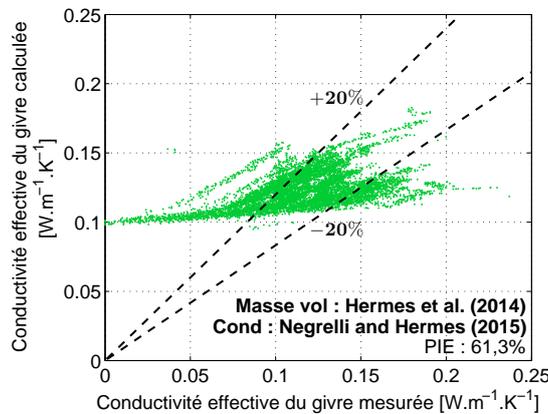
important de points. Elle n'est pas tout à fait appropriée aussi pour la température et la vitesse de l'air. Les points qui ont permis la détermination de cette corrélation ont été réalisés pour des températures d'air inférieures à 10 °C et des vitesses maximales de 1,5 m.s<sup>-1</sup>. Les températures d'air pour les tests expérimentaux peuvent monter jusqu'à 16 °C et les vitesses jusqu'à 4 m.s<sup>-1</sup>. Les auteurs proposent en fait trois corrélations différentes variant en fonction de la température de la plaque. Comme établi au chapitre précédent, la température de la plaque a une influence sur le type de cristaux formés dont dépend aussi la conductivité thermique. Malgré un domaine d'application pas totalement approprié, la considération de trois types de cristaux permet d'atteindre des résultats tout à fait acceptables.

La figure 6.7b montre les résultats obtenus grâce à la combinaison de la corrélation de Yang and Lee [92] pour la masse volumique et de Brian et al. [7] modifiée pour la conductivité : 56,2 % des points expérimentaux sont inclus dans l'intervalle d'erreur de ± 20 %. La corrélation de Brian et al. [7], bien moins élaborée que celle de Na and Webb [62] sous-estime les valeurs de la conductivité thermique. La corrélation dépend



(a) Prédications de la conductivité effective du givre : couple Negrelli and Hermes [64] / Na and Webb [62] modifiée

(b) Prédications de la conductivité effective du givre : couple Yang and Lee [92] / Brian et al. [7] modifiée



(c) Prédications de la conductivité effective du givre : couple Hermes et al. [25] / Negrelli and Hermes [64]

FIGURE 6.7 – Prédications de la conductivité thermique effective du givre (\* corrélation modifiée)

uniquement de la température de surface du givre et de la masse volumique. Cette corrélation n'est applicable que pour des masses volumiques faibles, ce qui explique en partie pourquoi elle est compatible avec celle de Yang and Lee [92], qui minimise les valeurs de masse volumique.

La figure 6.7c présente les meilleurs résultats qui ont pu être obtenus. La corrélation pour la conductivité thermique de Negrelli and Hermes [64] couplée à la corrélation de Hermes et al. [25] permet de prédire 61,3 % des résultats expérimentaux (la corrélation de Hermes et al. [25] pour la masse volumique est conseillée dans les travaux de Negrelli and Hermes [64] - ces travaux ont été réalisés par le même groupe de chercheurs). Comme pour les autres auteurs, les faibles conductivités thermiques sont mal prédites. Il faut aussi rester vigilant sur les valeurs des conductivités en début de test. Comme expliqué dans le chapitre précédent, étant donné que les mesures de températures de surface sont effectuées par une caméra infrarouge, lorsque la plaque est partiellement givrée, la température n'est probablement pas aussi précise que lorsque la couche de givre est bien formée. La corrélation de Negrelli and Hermes [64] prend en compte la masse volumique du givre à travers la porosité. Elle est aussi divisée en trois sous-corrélations en fonction de la température de la plaque froide.

La figure 6.8 compare les résultats des trois couples de corrélations entre eux. Les trois corrélations fournissent des résultats assez différents. La corrélation pour la conductivité de Negrelli and Hermes [64] présente des résultats généralement plus élevés que ceux fournis par Na and Webb [62] modifiée. Pour cette dernière corrélation, la conductivité thermique calculée est généralement inférieure à celle mesurée. Les points de Brian et al. [7] modifiés présentent une dérive moins importante mais sont beaucoup plus éparpillés, moins précis, ce qui est probablement dû à l'unique prise en compte dans la relation de la masse volumique et de la température du givre. De manière générale, les résultats laissent penser qu'un critère impactant la conductivité thermique n'a pas encore été détecté et donc n'a pas été incorporé dans les modèles ou alors qu'il a mal été quantifié.

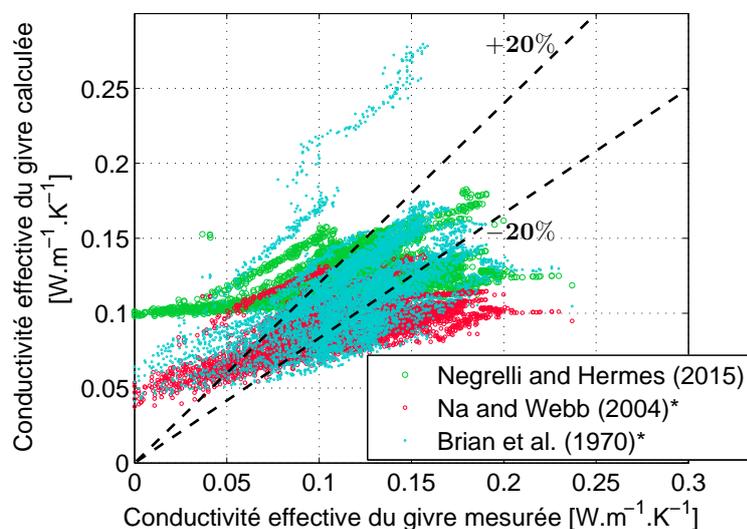


FIGURE 6.8 – Prédications de la conductivité du givre : superposition des trois meilleurs couples de corrélations (\* corrélation modifiée)

De ces premiers résultats se dégagent deux conclusions principales :

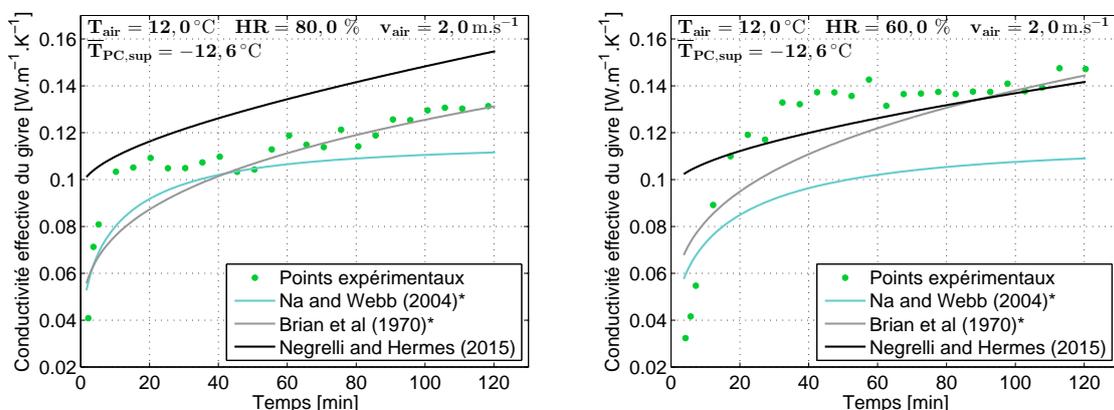
- il semble important de prendre en compte le temps dans l'évaluation de la conductivité ;
- la masse volumique et la température de la plaque sont deux paramètres indispensables et prépondérants.

### 6.3.2 Impact de l'humidité relative sur la prédiction de la conductivité thermique effective du givre

Ce paragraphe propose de comparer la qualité des prédictions fournies par les trois corrélations précédentes pour deux humidités relatives différentes. L'humidité relative a été identifiée comme le paramètre ayant le plus d'influence sur la conductivité du givre dans le chapitre précédent.

La figure 6.9 présente les résultats obtenus à partir des trois corrélations et de deux jeux de points expérimentaux. Passé le début de test, la corrélation de Negrelli and Hermes [64] semble être celle qui respecte le plus l'évolution de la conductivité du givre. Elle surévalue la valeur de la conductivité pour l'humidité relative la plus élevée et est plus proche des points expérimentaux pour l'humidité de 60 %. Les deux figures montrent aussi que la corrélation de Na and Webb [62] modifiée ne respecte pas l'évolution des points expérimentaux (les courbes ne présentent pas du tout les mêmes pentes, surtout à humidités relatives élevées). Quant à Brian et al. [7] modifiée, les résultats sont assez satisfaisants en milieu et fin de test (passé 40 à 60 minutes).

La combinaison des résultats obtenus jusqu'à présent laisse penser que la corrélation de Negrelli and Hermes [64] est celle qui offre les meilleurs résultats, et qui de plus, ne nécessite pas d'être modifiée par l'ajout d'une corrélation pour calculer la masse volumique. Pour approfondir et essayer de comprendre comment améliorer cette corrélation, un focus est fait sur les résultats qui en sont issus.



(a) Prédiction de la conductivité thermique effective du givre à humidité relative élevée (b) Prédiction de la conductivité thermique effective du givre à humidité relative faible

FIGURE 6.9 – Prédictions de la conductivité thermique effective du givre pour différentes humidités relatives (\* corrélation modifiée)

### 6.3.3 Investigations supplémentaires sur la corrélation de Negrelli and Hermes [64]

Les éléments qui suivent se concentrent sur la corrélation de Negrelli and Hermes [64], qui présente les meilleurs résultats. La figure 6.10 présente la répartition des points en fonction du temps. Les points ont été séparés en trois périodes :

- le début de test :  $t < 30$  minutes ;
- le milieu de test :  $30 < t < 90$  minutes ;
- la fin de test :  $t > 90$  minutes.

La figure 6.10 permet de confirmer que les faibles conductivités thermiques, mal évaluées, correspondent aux débuts de test. Comme il est difficile de savoir si les mauvais résultats obtenus dans les premières 30 minutes sont dus à une mauvaise prise en compte des paramètres dans les corrélations ou bien à des points expérimentaux biaisés, cette partie des tests sera exclue dans les figures qui suivront.

En se focalisant sur les points d'une durée supérieure à 30 minutes, la figure 6.10 permet aussi de comprendre que le temps n'est pas le seul critère responsable de la mauvaise prédiction des valeurs de conductivité. En effet, des valeurs expérimentales élevées mal prédites sont identifiées dans les deux intervalles de temps. Il est donc nécessaire d'approfondir les analyses afin d'identifier un ou des paramètres responsable(s) de ces déviations.

À cette fin, il est nécessaire d'observer la répartition des points selon chacun des paramètres :

- la température de l'air ;
- la vitesse de l'air ;
- la température de la plaque ;
- l'humidité relative.

La figure 6.11a montre les résultats obtenus pour la température de l'air qui ne semble pas avoir une influence considérable sur la répartition des résultats. Elle ne semble pas être responsable de la sous-évaluation de la corrélation. La figure 6.11b présente

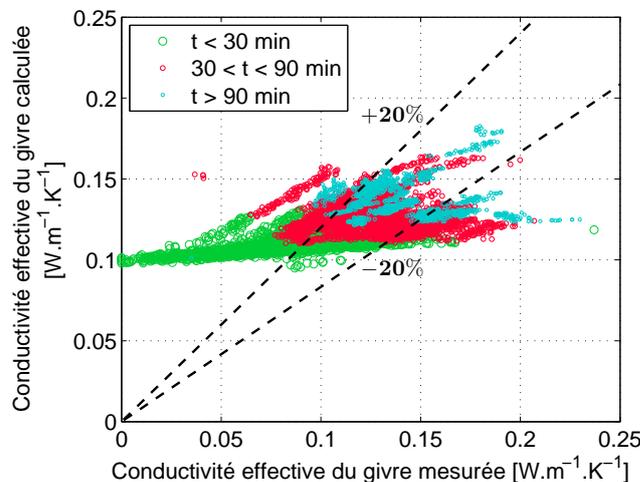
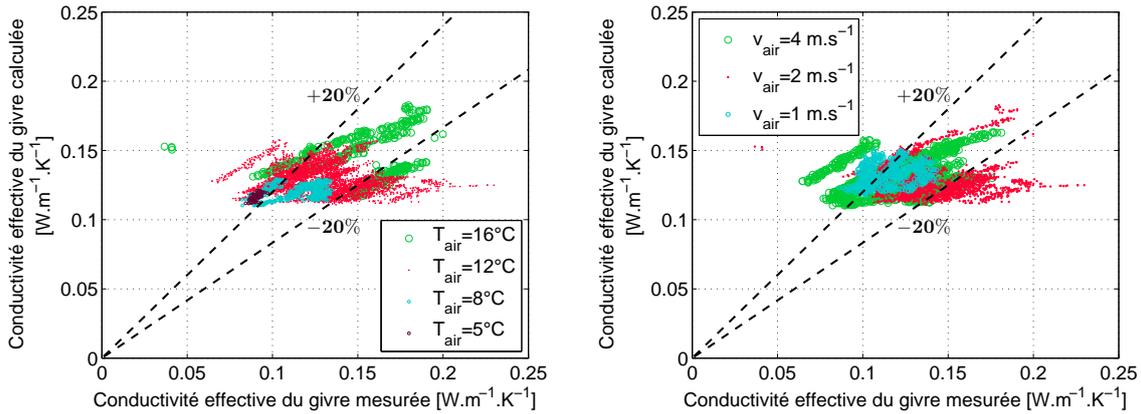


FIGURE 6.10 – Impact du temps sur les prédictions de la conductivité thermique effective du givre



(a) Répartition des points de la conductivité thermique pour différentes températures de l'air (b) Répartition des points de la conductivité thermique pour différentes vitesses d'air

FIGURE 6.11 – Répartition des points de la conductivité thermique effective du givre : températures et vitesses d'air

les mêmes résultats pour la vitesse de l'air. Tout comme la température de l'air, il ne semble pas y avoir un lien entre ce paramètre et la déviation des résultats. En effet, à  $4 \text{ m.s}^{-1}$  les résultats sont surévalués, à  $2 \text{ m.s}^{-1}$ , ils sont plutôt sous-estimés et mieux prédits pour la vitesse la plus faible de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ . Aucune prédominance n'est identifiée. Le paramètre responsable ne doit pas être la vitesse de l'air.

La figure 6.12 présente les résultats obtenus pour la température de la plaque refroidie. Ce paramètre, comme les deux précédents ne semble pas non plus impacter de manière directe la répartition des résultats, ce qui n'est pas surprenant. En effet, la corrélation proposée a déjà été divisée en trois cas qui dépendent de la température de la plaque froide.

Enfin, la figure 6.13 montre l'impact de l'humidité relative sur la répartition des résultats. Ici, l'influence de l'humidité relative est nettement identifiée. La déviation est plus importante pour des humidités relatives de 50 % que de 80 %. Les résultats sont

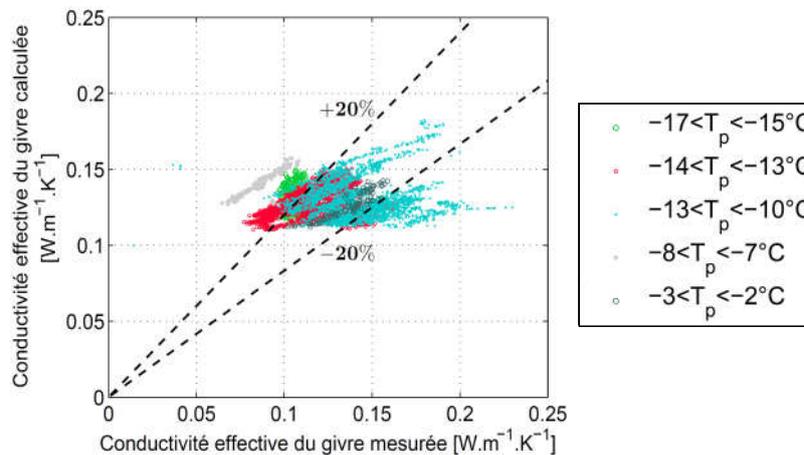


FIGURE 6.12 – Répartition des points de la conductivité thermique effective du givre : température de la plaque froide

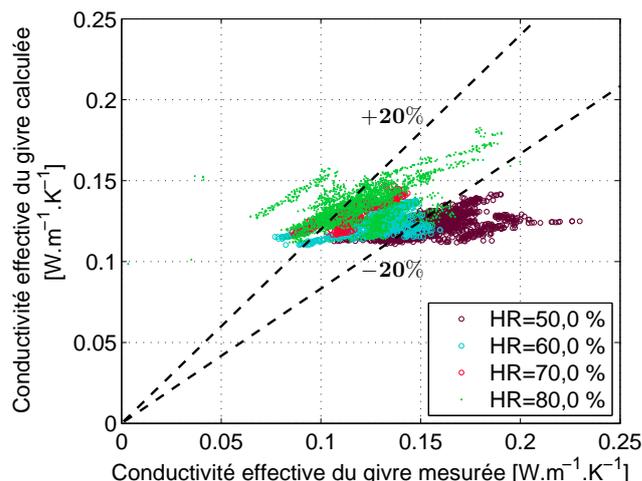


FIGURE 6.13 – Répartition des points de la conductivité thermique effective du givre : humidité relative

cohérents avec ceux observés sur la figure 6.9 et ne sont pas étonnants. En effet, les tests qui ont servi à établir cette corrélation ont été réalisés entre 75 et 80 %. Cette corrélation se montre efficace pour les humidités relatives assez élevées mais l’est moins pour les plus faibles. Une extension de cette corrélation aux faibles humidités relatives permettrait d’aboutir à des résultats vraiment satisfaisants.

## 6.4 Utilisation des modèles de prédiction de la formation du givre

Cette dernière partie a pour objectif de montrer comment les modèles peuvent être utilisés pour répondre à des problématiques qui peuvent être rencontrées dans l’industrie, notamment lors du dimensionnement d’un évaporateur de pompe à chaleur. Pour cela, les modèles présentés précédemment sont utilisés afin de prédire la formation du givre sur un échangeur de type tubes-ailettes. Trois essais de performances d’une PAC testée au CETIAT selon les normes en vigueur (NF EN 14511 :2013 *”Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur avec compresseur entraîné par moteur électrique pour le chauffage et la réfrigération des locaux”*) ont été sélectionnés. Les conditions de tests sont précisées dans le tableau 6.1.

Les jeux de conditions présentés sont, pour presque tous les paramètres, compris dans les domaines de validités des modèles (excepté pour les températures de l’air qui sont

TABLEAU 6.1 – Jeux de conditions appliqués aux problématiques industrielles (les températures de l’évaporateur sont issues de tests réalisés au CETIAT sur une PAC)

	$T_{\text{air}} [^{\circ}\text{C}]$	HR [%]	$v_{\text{air}} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$T_{\text{évaporateur}} [^{\circ}\text{C}]$
<b>C1</b>	-7,0	82	1,0	-12,2
<b>C2</b>	2,0	84	1,0	-5,5
<b>C3</b>	-10	79	1,0	-14,2

inférieures à celles proposées dans la littérature). Les trois jeux de conditions sont utilisés dans le modèle de Hermes et al. [24] afin de déterminer le temps au bout duquel l'épaisseur du givre atteint différentes valeurs (0,25 mm - 0,50 mm - 0,75 mm - 1,00 mm - 1,25 mm et 1,50 mm). La figure 6.14 présente les résultats obtenus.

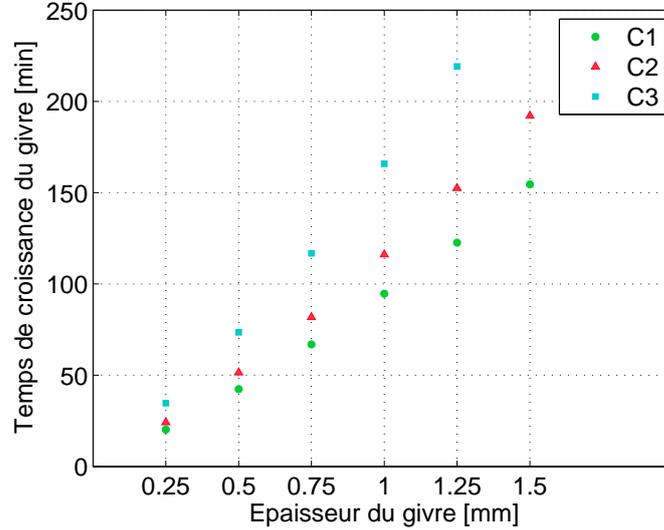


FIGURE 6.14 – Temps nécessaire pour atteindre une épaisseur de givre donnée pour trois conditions d’essais normatives

Les trois jeux de conditions présentent des résultats différents. Le jeu de conditions C3 présente une croissance de givre moins rapide probablement due à une température d’air et une humidité relative plus faibles. Ces premières informations sont ensuite utilisées pour calculer le temps de demie obstruction de l’évaporateur, qui correspond au temps qu’il faut pour réduire de moitié la section de passage entre deux ailettes. Les résultats sont proposés sur la figure 6.15 pour chacune des conditions et pour quatre espacements d’ailettes : 2 - 3 - 4 et 6 mm. La figure 6.15 renforce des conclusions déjà connues et intuitives : plus le pas d’ailette est petit plus la batterie s’obstrue rapidement. Généralement, les pas d’ailettes dans les pompes à chaleur sont de l’ordre de deux millimètres. Dans ce cas, la batterie met entre 45 et 75 minutes à se boucher de moitié selon les conditions d’essais. Suite à ces résultats, l’hypothèse suivante est formulée : il est supposé que le critère de dégivrage de la machine correspond à la demie obstruction de la batterie (il existe bien d’autres critères mais celui-ci est choisi en exemple). Il est alors considéré que le temps de demie obstruction correspond au temps de dégivrage. Une fois ce critère atteint, la PAC procède au dégivrage de la batterie.

L’objectif du travail qui suit est d’évaluer le temps nécessaire au dégivrage dans chaque condition. Les essais réalisés au CETIAT ont permis de connaître la densité de puissance  $q_{\text{dégivrage}}$  fournie par la machine pour dégivrer (dégivrage par inversion de cycle). La corrélation de Hermes et al. [25] a été utilisée pour connaître la masse volumique et donc déduire la masse de givre déposée sur toute la surface de l’évaporateur. Le temps de dégivrage est calculé à partir des différentes données :

$$t_{\text{dégivrage}} = \frac{m_{\text{givre}} \cdot \Delta h_{\text{fus}}}{q_{\text{dégivrage}} \cdot S_{\text{batterie}}} = \frac{\rho_{\text{givre}} \cdot e_{\text{givre}} \cdot S_{\text{batterie}} \cdot \Delta h_{\text{fus}}}{q_{\text{dégivrage}} \cdot S_{\text{batterie}}} \quad (6.1)$$

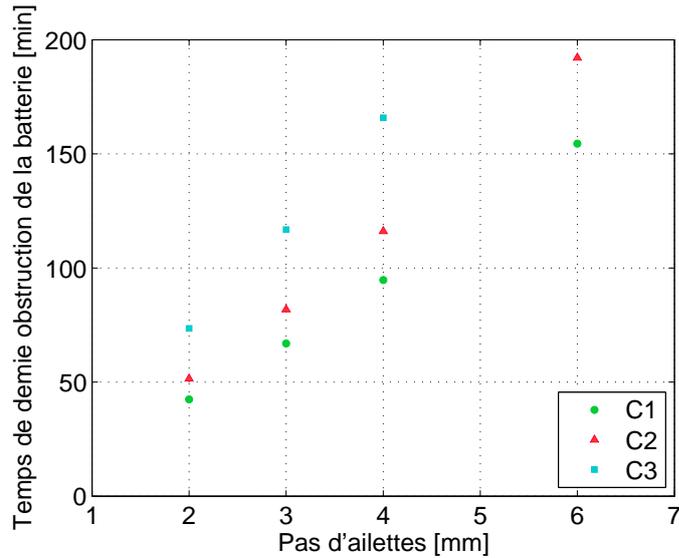


FIGURE 6.15 – Temps de demie obstruction pour différents espacements d'ailettes

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 6.16. Les conditions C1 et C3 mènent à des résultats similaires car les masses de givre calculées à partir de la corrélation renvoient des valeurs proches. De manière logique, le temps de dégivrage croît avec la masse (le temps de dégivrage augmente avec le pas d'ailettes parce que la masse déposée est plus importante). Les divers résultats obtenus permettent de tracer des cycles successifs de givrage/dégivrage pour les trois jeux de conditions et les différents pas d'ailettes.

La figure 6.17a montre les cycles de givrage/dégivrage simulés sur 4 heures de fonctionnement. C3 est la condition pour laquelle la PAC fonctionne le plus longtemps en cas de givrage. En effet, les temps de givrage sont longs et les temps de dégivrage très

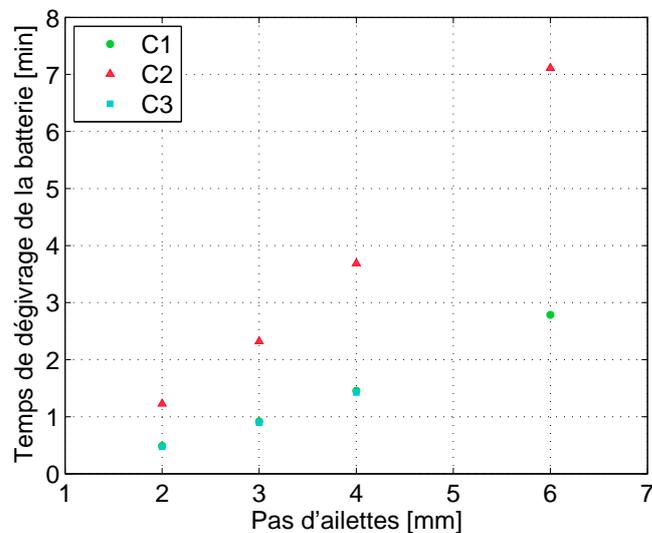
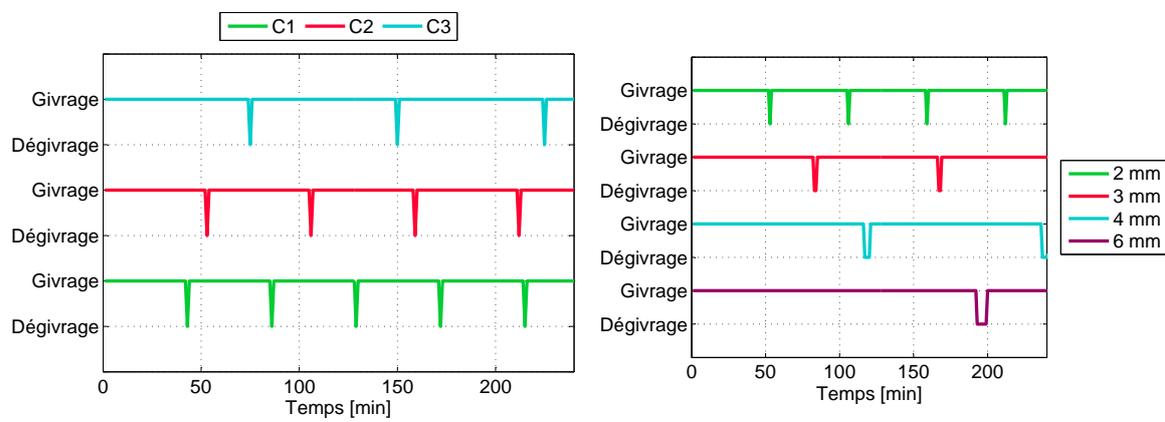


FIGURE 6.16 – Temps nécessaire au dégivrage de la machine pour différentes conditions environnementales et différents pas d'ailettes

courts, ce qui favorise les performances de la machine. À puissance de dégivrage égale, comme c'est le cas ici, la surconsommation liée au dégivrage est moins importante que dans les deux autres cas. En revanche, le jeu de conditions C1 n'est pas favorable pour la machine. Malgré un temps de dégivrage court, la PAC a fréquemment besoin d'être dégivrée.

La figure 6.17b montre les cycles de givrage/dégivrage obtenus pour différents pas d'ailettes pour le jeu de conditions C2. Plus le pas d'ailette est petit, plus le nombre de dégivrages est important. Néanmoins, à puissance de dégivrage égale, les dégivrages sont plus courts car l'épaisseur de givre déposé est moins importante. En revanche, les conclusions inverses sont observées pour les pas d'ailettes plus élevés : le temps de givrage est long, mais le dégivrage nécessite plus de temps.



(a) Cycles de givrage/dégivrage pour les trois jeux de conditions (b) Cycles de givrage/dégivrage pour différents pas d'ailettes - Condition C2

FIGURE 6.17 – Cycles de givrage/dégivrage pour différentes conditions et différents espaces d'ailettes

Cette dernière partie donne un aperçu de la manière dont les modèles peuvent être utilisés par des fabricants de PAC. Ils permettent aux industriels d'identifier les avantages et inconvénients de différentes géométries et d'anticiper les performances de la machine en givrage. Bien entendu, ces modèles ne simulent pour l'instant pas tout à fait la réalité. En effet, il faut garder à l'esprit les premières études réalisées dans ce travail de thèse qui montraient que les modèles n'étaient pas très aboutis en configuration verticale. De plus, le critère de dégivrage de demie obstruction pris en exemple peut aussi être discuté. Néanmoins, une première idée de futur modèle plus élaboré est proposée ici. Même si les résultats numériques sont à utiliser avec précautions, les tendances sont conservées.

## 6.5 Synthèse

L'étude des modèles et corrélations de prédictions de l'épaisseur du givre montre que deux d'entre eux présentent des résultats satisfaisants :

- le modèle de Hermes et al. [24] ;
- la corrélation de Schneider [76].

Le modèle de Hermes et al. [24] permet de prédire plus d'un tiers des résultats expérimentaux et la corrélation de Schneider [76] plus de la moitié. Les raisons qui peuvent expliquer les écarts entre les résultats expérimentaux et numériques sont :

- un domaine de validité de la corrélation ou du modèle non étendu jusqu'aux conditions des tests expérimentaux ;
- l'utilisation de corrélations empiriques.

Les études qualitatives ont montré que malgré des valeurs numériques non atteintes, les tendances sont respectées. L'évolution numérique suit l'évolution expérimentale. Le modèle et la corrélation présentent de meilleurs résultats lorsque la température de la plaque diminue et que l'humidité relative est élevée.

Malgré le faible nombre de points expérimentaux sur la masse volumique, sept corrélations ont été testées. Les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants. Aucune corrélation ne permet de prédire avec précision les valeurs de la masse volumique. De plus, l'humidité relative (paramètre variant pour lequel ont été réalisés les tests de masse volumique) ne semble pas responsable des bonnes ou mauvaises prédictions. Trois corrélations ont néanmoins été retenues. Elles présentent les résultats les plus acceptables. Ces trois corrélations sont :

- Hermes [23] ;
- Yang and Lee [92] ;
- Léoni et al. [52].

Il est nécessaire que les études futures se concentrent sur des mesures expérimentales fiables de masse volumique sur un large domaine de validité. Un travail conséquent sera nécessaire pour développer une technique de mesure automatique et fiable. Une base de données robuste permettra alors d'établir une corrélation utilisable par de nombreux chercheurs.

Le faible nombre de résultats issus du travail sur la masse volumique ne facilite pas celui sur la conductivité. En effet, la conductivité dépendant fortement de la masse volumique, cette dernière est très souvent utilisée dans les corrélations de la conductivité. Dans cette étude, comme le nombre de points expérimentaux pour la masse volumique est restreint, il est nécessaire de calculer la masse volumique (ensuite utilisée pour déterminer la conductivité) à partir de corrélations. Malheureusement, la plupart des auteurs qui proposent des corrélations pour la conductivité, utilisent des valeurs expérimentales de masse volumique. Ils ne proposent donc pas de corrélation pour la masse volumique associée à leur corrélation de conductivité. Face à cette difficulté, et comme aucune corrélation de masse volumique ne s'est détachée de l'étude précédente, il a été décidé de modifier chacune des corrélations de conductivité en y ajoutant les corrélations pour la masse volumique. Des corrélations couplées de masse volumique / conductivité ont été réalisées afin d'identifier les meilleurs binômes. Trois couples ont montré des résultats intéressants :

- Hermes et al. [25] / Na and Webb [62] modifiée ;
- Yang and Lee [92] / Brian et al. [7] modifiée ;
- Hermes et al. [25] / Negrelli and Hermes [64].

Les recherches se sont plus particulièrement concentrées sur le couple Hermes et al. [25] / Negrelli et al. [65] qui présente les meilleurs résultats (61,3 % de la base de données expérimentales a pu être prédit). De plus, cette corrélation de conductivité ne nécessite aucune modification, car elle est fournie avec une corrélation pour la masse volumique.

Une étude qualitative a montré que le binôme respecte les évolutions de la conductivité du givre. Un approfondissement des études quantitatives a permis d'identifier que le temps n'était pas responsable des mauvaises prédictions en fin de test. Néanmoins, il est clairement identifiable que les débuts de tests constituent de vrais verrous aussi bien pratiques que théoriques. En effet, il est difficile de garantir la fiabilité des mesures de conductivité thermique en début de test. Il est donc incontestablement compliqué d'en extraire des corrélations et de comprendre les phénomènes physiques liés aux premiers instants de la formation du givre. L'humidité relative a été identifiée comme étant le paramètre responsable des déviations : plus l'humidité relative est faible plus les résultats numériques sont éloignés des résultats expérimentaux.

Une dernière partie propose d'utiliser les différents modèles et corrélations pour répondre à des problématiques plus industrielles. Des cycles de givrage/dégivrage sont présentés pour trois jeux de conditions utilisés pour déterminer les performances des PAC. Les résultats présentés permettent aux fabricants de PAC d'estimer les avantages et inconvénients de différentes géométries (notamment le pas d'ailettes vis-à-vis du givrage) et d'anticiper le fonctionnement de la machine. Ces modèles nécessitent d'être améliorés pour répondre au mieux aux besoins industriels.



# Chapitre 7

## Conclusions et perspectives

Ce chapitre présente les conclusions principales issues de ce travail de thèse. À cette partie, vient s'ajouter une liste des perspectives de ce projet afin d'orienter de futurs travaux.

### 7.1 Conclusions

Les trois années passées à étudier la formation du givre ont permis de traiter le sujet selon différentes approches.

Un premier travail a donné lieu à une synthèse approfondie de la bibliographie. L'impact du givrage à l'échelle des PAC et systèmes frigorifiques a d'abord été abordé et a été complété par une étude bibliographique sur le dégivrage et ses conséquences sur les performances des machines. Comme attendu, les recherches menées ont confirmé que le givrage dégrade fortement les performances à cause de l'obstruction de l'écoulement d'air dans l'évaporateur mais aussi à la résistance thermique induite par la couche de givre. Les machines, pour retrouver leurs performances initiales, doivent dégivrer régulièrement ce qui engendre une surconsommation énergétique. Il s'avère donc nécessaire d'optimiser aussi bien les techniques de dégivrage que les outils permettant de détecter et de déclencher le dégivrage au moment optimal. Étudier le givrage à l'échelle des évaporateurs présentait quelques inconvénients, qui pouvaient constituer un frein à la compréhension des phénomènes liés au givrage. C'est pourquoi les recherches se sont essentiellement concentrées sur la formation du givre sur une plaque plane refroidie.

Le travail de bibliographie a conduit à l'élaboration de bases de données regroupant les points expérimentaux de la littérature. 6 bases de données ont été réalisées : 3 regroupant les points expérimentaux d'épaisseur du givre et 3 pour la masse volumique. Pour chacun des paramètres étudiés, trois géométries ont été identifiées : la plaque plane horizontale, la plaque plane verticale et les plaques planes parallèles (plus proches des ailettes). En parallèle, des modèles de prédiction de l'épaisseur et de la masse volumique du givre sur des plaques planes horizontales disponibles dans la littérature ont été reproduits. Ces modèles ont été appliqués aux différentes bases de données. Les résultats obtenus ont montré que les modèles de prédiction de l'épaisseur du givre étaient meilleurs que ceux de la masse volumique. Les principales raisons sont qu'un nombre plus important d'études a déjà été réalisé sur le sujet et surtout que l'épaisseur est une propriété plus simple à mesurer. La masse volumique est, elle, fonction de l'épaisseur mais aussi de la masse de givre déposé. Certains modèles de dépôt de givre permettent de prédire plus de la moitié des points issus de la base de données pour

les plaques planes contre seulement un tiers pour la masse volumique. C'est face à ces résultats peu concluants, qu'il a été décidé d'établir une nouvelle corrélation de la masse volumique basée sur les points de la littérature. Cette corrélation a permis d'améliorer les prédictions. Les modèles, appliqués aux bases de données des plaques verticales et parallèles, ont donné des résultats moins satisfaisants. Pour les plaques verticales, la gravité joue probablement un rôle important. Pour les plaques parallèles, c'est l'influence des couches limites qui doit être étudiée.

Ce travail sur l'épaisseur et la masse volumique a été complété par une étude bibliographique de la conductivité thermique du givre. Un groupe de chercheurs (Negrelli and Hermes [64]) a publié une étude similaire à celle qui a été effectuée pour l'épaisseur et la masse volumique. Les résultats principaux ont été présentés dans la revue bibliographique. Les conclusions de leur étude sont complétées par une présentation des différentes corrélations permettant de prédire la conductivité thermique.

De manière générale, le travail réalisé met en avant la nécessité de compléter les bases de données par des points expérimentaux. C'est dans cette optique qu'il a été choisi de réaliser un banc expérimental. L'existence au laboratoire d'une boucle d'air maintenue en température par une chambre froide a permis d'intégrer une section d'essais consacrée à l'étude du givrage sur une plaque refroidie. Toutefois, les moyens existants utilisés ont contraint certains des choix techniques limitant le nombre et le potentiel des résultats.

L'objectif était de réaliser un dispositif permettant de mesurer les propriétés du givre et les échanges mis en jeu de manière précise et automatique. Le principal problème rencontré pendant la mise en place du dispositif a été la mesure de masse (nécessaire au calcul de la masse volumique du givre). En effet, malgré deux dispositifs différents testés, il n'a pas été possible de réaliser des mesures de masse automatiques et en continu. La mesure de masse nécessite un dispositif de mesure très précis, le givre étant peu dense, il est nécessaire de disposer d'une valeur précise au gramme voire centigramme près. Deux éléments viennent perturber les mesures de masse : l'écoulement d'air et surtout la circulation de l'eau glycolée dans la plaque qui est pesée. Ces éléments induisent des perturbations non reproductibles qui n'ont pu être supprimées ni expérimentalement, ni numériquement. Les mesures de masse volumique ont donc dû être réalisées de manière non automatique, en fin d'essais, menant à un nombre de points restreint. Le banc d'essais réalisé a été qualifié. Les résultats obtenus sont reproductibles. Les mesures qui en sont issues sont donc fiables.

Les essais expérimentaux ont été réalisés en vue d'une étude de sensibilité. Ainsi, les paramètres étudiés sont les suivants :

- la température de l'air à humidité relative constante ;
- la température de l'air à humidité absolue constante ;
- la température de la plaque froide ;
- la vitesse de l'air ;
- l'humidité relative.

Cette étude de sensibilité a montré que les deux paramètres les plus influents sont la température de la plaque froide et l'humidité relative. L'épaisseur du givre augmente lorsque :

- la température de la plaque diminue ;
- l'humidité relative augmente.

La conductivité thermique augmente lorsque :

- la température de la plaque diminue ;
- l’humidité relative diminue.

Les différentes conclusions de l’étude de sensibilité ont mis en avant l’importance de la morphologie du givre notamment pour comprendre l’évolution de la conductivité. Cet aspect de la formation du givre a pour l’instant été peu exploré, mais les récents travaux sur le sujet laissent penser que son impact est non négligeable.

Une comparaison entre les modèles et les points expérimentaux vient compléter ces premiers résultats. Les modèles de prédiction de l’épaisseur du givre ont présenté des résultats semblables à ceux obtenus avec la base de données de la littérature, en surestimant toujours légèrement les valeurs. Ces résultats sont rassurants d’un point de vue expérimental, car cela signifie que les résultats obtenus sur le banc sont cohérents avec ceux de la littérature. Du point de vue de la modélisation, ces résultats encourageants laissent penser que les modèles pour l’épaisseur représentent de mieux en mieux la réalité. Les résultats obtenus pour la masse volumique sont beaucoup moins satisfaisants. Le faible nombre points expérimentaux combiné à des corrélations pour la plupart d’entre elles empiriques, bien souvent, ne mènent pas à de bonnes prédictions. Cette partie met en avant la nécessité d’enrichir les bases de données, de mesurer avec précision la masse volumique et d’étendre les domaines de validité des corrélations. Pour ce qui est de la conductivité thermique du givre, les résultats obtenus sont satisfaisants (bien qu’ils dépendent fortement de la masse volumique). Les valeurs de conductivité obtenues en début de test restent difficiles à prédire en raison de mesures expérimentales qui restent incertaines et de phénomènes transitoires non maîtrisés. En dehors de ces points, les résultats sont plutôt bien évalués. Les pistes d’amélioration des corrélations concernent l’impact de l’humidité relative sur la conductivité et celui de la morphologie des cristaux. Une dernière partie présente une ouverture aux problématiques rencontrées dans l’industrie. Il est proposé d’utiliser un des modèles étudiés auparavant pour calculer des temps de givrage et de dégivrage. Ces calculs permettent de proposer des cycles de givrage/dégivrage pour différentes conditions environnementales et différentes caractéristiques géométriques. Bien que ces modèles nécessitent encore des améliorations, ce premier travail pourrait aider les constructeurs à identifier des logiques de dégivrage.

Ce travail de thèse laisse entrevoir de nombreuses perspectives. Cette thèse a permis d’évoluer dans la compréhension des phénomènes physiques liés à la formation du givre. Ce travail ne demande qu’à être complété. Les nombreuses pistes permettant d’orienter les recherches futures constituent la suite de ce chapitre.

## 7.2 Perspectives

Cette thèse ouvre la porte à de nombreuses perspectives. Elles concernent à la fois l’étude de la formation du givre en général, mais aussi ce qu’il est possible de faire avec le banc actuel, les améliorations qui peuvent lui être apportées, ainsi que les verrous à lever pour développer des modèles plus adaptés.

### 7.2.1 Formation du givre

Suite aux résultats obtenus, il paraît nécessaire de travailler sur la formation du givre à une échelle microscopique. En effet les travaux ont montré que la morphologie

des cristaux jouait un rôle très certainement non négligeable sur la formation du givre. C'est pourquoi ce type d'étude pourrait être intéressant. Cette étude pourrait aussi inclure la détection des premiers nucléus sur la surface froide. L'identification de ces premiers cristaux pourrait permettre de comprendre leurs mécanismes de formation (sublimation inverse, condensation + solidification), d'établir des cartographies de leur forme en fonction des conditions et d'étudier si cette dernière est amenée à évoluer au cours du temps. Ces études permettraient aussi de développer des modèles plus fiables pour les débuts de tests. Un volet pourrait aussi concerner l'état de surface en testant des matériaux peu ou très rugueux, hydrophiles ou hydrophobes, nanostructurés, etc... Pour réaliser ce type de test, il sera nécessaire de construire un nouveau dispositif expérimental, plus fin et plus précis. Il faudra être vigilant à l'environnement dans lequel sera placé ce dispositif. A ce niveau de précision, la moindre poussière peut potentiellement être responsable de la nucléation. Ce type d'installation expérimentale demandera beaucoup de précautions.

## 7.2.2 Banc expérimental

La nécessité de construire un nouveau banc expérimental pour les études présentées ci-dessus ne signifie pas pour autant la mise à l'arrêt du banc actuel. Il peut en effet être utilisé en l'état pour réaliser davantage de points de masse volumique. Il peut aussi servir à tester l'impact du revêtement de surface sur la formation du givre avec le deuxième feuillard (qui n'a pas été testé), de manière certes plus grossières qu'avec un nouveau dispositif, mais cela peut déjà donner un ordre d'idée.

Le banc expérimental peut aussi être modifié afin de mettre au point une mesure de la masse volumique fiable et automatique. Il pourrait être envisagé de remplacer la balance pour en mettre une capable de réaliser des pesées dynamiques. Ce changement ne suffira pas, il faudra réfléchir à éliminer les perturbations induites notamment par le bain thermostaté. Pour cela, il faut réfléchir à des moyens qui permettent d'amortir les vibrations, à des fixations qui n'influeraient pas sur les mesures de masse. Ce type de modification inclurait probablement des changements au niveau de l'instrumentation.

L'avenir de la mesure de la masse volumique n'est peut être pas dans la pesée. Peut être existe-t-il d'autres techniques de mesure? Certaines techniques utilisées dans le domaine de la médecine pourraient servir de bases à de futures recherches. En effet, dans le cadre du diagnostic de l'ostéoporose, des médecins utilisent des appareils basés sur la technique de l'absorptiométrie pour déterminer la masse volumique minérale osseuse. Cette technique repose sur la mesure de l'absorption d'un faisceau de photons X. Des recherches complémentaires sont nécessaires afin d'évaluer l'applicabilité de la méthode au givre (notamment réfléchir aux problèmes de transparence), à la précision des résultats, au coût des appareils, etc... En revenant dans des domaines scientifiques plus proches, il peut être envisagé de réaliser des mesures de masse volumique par absorption de rayons gamma. Des tests ont été réalisées sur des boues. La source de rayons gamma utilisée est de l'oxyde de samarium. L'utilisation de cette technique pose néanmoins un problème : la substance dont la masse volumique doit être déterminée doit être située entre deux milieux transparents afin de positionner l'émetteur et le récepteur de chaque côté. Les deux méthodes évoquées présentent des verrous, il sera donc nécessaire d'effectuer des recherches approfondies afin d'évaluer si elles sont envisageables.

Le banc expérimental peut aussi être utilisé pour tester des plaques froides verticales,

des plaques parallèles ainsi que des ailettes. La mise en place de ces tests nécessitera des modifications notamment au niveau de l'instrumentation. Il faudra déplacer la caméra infrarouge et l'appareil photo et revoir les mesures de températures dans la plaque froide.

Expérimentalement, ce sujet offre de nombreuses possibilités, assez variées, qui peuvent permettre d'étudier la formation du givre à plusieurs échelles, ce qui constitue un réel apport scientifique.

### **7.2.3 Modélisation**

Les dernières perspectives de cette étude concernent la modélisation. Les résultats ont montré que de nombreuses améliorations étaient encore possibles. Il faudrait élargir les domaines de validité des modèles et corrélations proposées dans la littérature. Bien entendu, cette extension va de pair avec l'enrichissement des bases de données extraites de la littérature. L'amélioration des modèles peut être effectuée en considérant l'impact de la morphologie du givre. La forme des cristaux du givre est traduite à travers la tortuosité. C'est ce paramètre que les modèles et corrélations futures devront prendre en compte.



# Annexe A

## Résumé des corrélations pour la prédiction de la conductivité thermique du givre proposé par Iragorry et al. [29]

Cette annexe présente le tableau récapitulatif proposé par Iragorry et al. [29] des différentes corrélations pour la conductivité thermique du givre disponibles dans la littérature jusqu'en 2004.

No.	Geometric Configuration	Equation (or Equation Set)*	Units	Operational Range	Limitations	Date Published	Reference
K1	FLAT PLATE	$k_f = 0.0140 + 0.00668\rho_f + 0.000175\rho_f^2$ ( $k_f = 0.02422 + 0.0007214\rho_f + 0.0000011797\rho_f^2$ ) <b>(Empirical)</b>	Btu/h-ft <sup>2</sup> F (W/m-K)	$T_w = -22^\circ\text{F}$ to $14^\circ\text{F}$ ( $T_w = 30^\circ\text{C}$ to $-10^\circ\text{C}$ ) $T_a = 68^\circ\text{F}$ to $77^\circ\text{F}$ ( $T_a = 20^\circ\text{C}$ to $25^\circ\text{C}$ )	Max. density $573 \text{ kg/m}^3$	1967	Yonko and Sempy
K2	FLAT PLATE	$k_f = 8.49 \times 10^{-17} T_f^{5.44} + 6.86 \times 10^{-14} (\rho_f - 0.025) T_f^{4.84}$ <b>(Empirical)</b>	Btu/h-ft <sup>2</sup> F ( $\rho_f$ in lb/ft <sup>3</sup> )	$T_f = -215^\circ\text{F}$ to $20^\circ\text{F}$ ( $-137^\circ\text{C}$ to $-7^\circ\text{C}$ ) $\rho_f = 1.6$ to $8.1 \text{ lb/ft}^3$ ( $25$ to $130 \text{ kg/m}^3$ )	Max. density $130 \text{ kg/m}^3$	1970	Brian et al.
K3	FLAT PLATE	$k_f = 1.202 \times 10^{-3} \rho_f^{0.963}$ <b>(Empirical)</b>	W/m-K ( $\rho_f$ in kg/m <sup>3</sup> )	$T_w = -22^\circ\text{C}$ to $11^\circ\text{C}$ $T_a = -10^\circ\text{C}$ to $0^\circ\text{C}$ $u = 4$ to $9 \text{ m/s}$	Max. density $500 \text{ kg/m}^3$	1974	Sanders et al.
K4	FLAT PLATE	$k_{eff} = \epsilon_{ice} K_{ice} + (1 - \epsilon_{ice}) K_f$ $\frac{K_\beta}{K_f} = 1 - \left(\frac{6s}{\pi}\right)^{1/3} \left[ 1 - \left(\frac{a^2 - 1}{a}\right) \ln\left(\frac{a+1}{a-1}\right) \right]$ $a = \left( 1 + 4 \sqrt{\pi \left(\frac{K_{ice}}{K_\beta} - 1\right) \left(\frac{6s}{\pi}\right)^{2/3}} \right)^{1/2} \quad s = \frac{\rho_f - \rho_\beta}{\rho_{ice} - \rho_\beta}$ $K_\beta = K_a + \frac{D}{RT} \left( \frac{P}{P - P_{sat}} \right) \frac{dP_{sat}}{dT} h_{sg}$ $D = 0.086 \frac{10000}{P} \left( \frac{T}{273} \right)^{2/3}$ <b>(Theoretical)</b>	W/m-K	Assumed universal	Max. density $450 \text{ kg/m}^3$	1977	Hayashi et al.
K5	FLAT PLATE	$k_f = \text{funct}(\rho_f, T_f) \quad \bar{k}_f = \int_{T_w}^{T_{fs}} \frac{k_f dT}{T_{fs} - T_w}$ <b>(Theoretical)</b>	W/m-K	Assumed universal	Max. density $550 \text{ kg/m}^3$	1983	Deitenberger
K6	FLAT PLATE	$k_f = K_c + K_D$ ; $K_c = \frac{1}{\frac{C_1}{K_{perp}} + \frac{1 - C_1}{K_{par}}}$ $K_D = \frac{\rho_{ice} - \rho_f}{\rho_{ice} - 0.58\rho_f} h_{sg} 1.958 \times 10^{-9} \frac{\rho_f^{sat} \left(\frac{T}{T_{sat}}\right)^{-1.28} \exp\left(24.02 - \frac{6145}{T}\right)}{P}$ $C_1 = 0.042 + 0.42 \times 0.995^{(\rho_f)}$ <b>(Theoretical)</b>	W/m-K	Assumed universal	Max. density $800 \text{ kg/m}^3$	1987	Auracher
K7	FLAT PLATE	$k_f^* = 0.011(X)^{-0.37} (W)^{2.044} \left(\frac{T_{fs} - T_w}{T_a - T_w}\right)^{0.216} \text{Re}^{1.093} \text{Fo}^{0.699}$ $k_f^* = \frac{q_f \delta_f}{0 - T_w} k_{ice}$ <b>(Empirical)</b>	W/m-K	$T_w = -5^\circ\text{C}$ to $-15^\circ\text{C}$ $T_a = 15^\circ\text{C}$ to $23^\circ\text{C}$ $u = 1.15$ to $2.67 \text{ m/s}$	Max. density $200 \text{ kg/m}^3$ Assumed $T_{fs} = 0\text{C}$	1992	Mao et al.
K8	FLAT PLATE	$k_f = 0.132 + 3.13 \times 10^{-4} \rho_f + 1.6 \times 10^{-7} \rho_f^2$ <b>(Empirical)</b>	W/m-K	$T_w = -15^\circ\text{C}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$ $u = 0.5$ to $2.0 \text{ m/s}$	Max. density $400 \text{ kg/m}^3$	1994	Lee et al.
K9	FLAT PLATE	$\frac{1}{k_f} = \frac{C_1}{k_{perp}} + \frac{1 - C_1}{k_{par}}$ ; $\frac{1}{k_{perp}} = \frac{1 - \epsilon_\alpha}{k_a} + \frac{\epsilon_\alpha}{k_{ice}}$ $k_{par} = (1 - \epsilon_\alpha) k_a + \epsilon_\alpha k_{ice}$	W/m-K	Assumed universal	Max. density $800 \text{ kg/m}^3$	1997	Le Gall et al.

\* $k_f$  is equivalent to  $k_{eff}$ .

No.	Geometric Configuration	Equation (or Equation Set)	Units	Operational Range	Limitations	Date Published	Reference
K10	FLAT PLATE	$k_f(T) = 0.131 \times 10^{-6} (1-\beta) \frac{h_{sg} P_{atm} P_0}{T_0^{1.94} R^2 T^{1.06}} \exp\left[\frac{h_{ig}}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]$ $+ 1.202 \times 10^{-3} \beta (\rho_c)^{0.963} + (1-\beta)(1.0465 + 0.0177) \times 10^{-5}$ $\beta = \frac{A_\alpha}{A_\alpha + A_\beta} \quad \frac{1}{k_{eff}} = \frac{1}{\delta_f} \int_0^{\delta_f} \frac{1}{k_f(T)} dy$ <p><b>(Theoretical)</b></p>	W/m-K	Assumed universal	Max. density 250 kg/m <sup>3</sup>	2000	Sahin
K11	CYLINDER	$k_f = \frac{K_w (T_{w,in} - T_{w,out}) \ln((\delta_f + r_{w,out})/r_{w,out})}{(T_w - T_{fs}) \ln(r_{w,out}/r_{w,in})}$ <p><b>(Analytical)</b></p>	W/m-K	$T_a = 9.6^\circ\text{C}$ to $20.3^\circ\text{C}$ $\text{Re} = 10430$ to $18200$ $t = 0$ to $180$ min	Graphic results	2001	Lee and Ro
K12	FLAT PLATE	$k_f = k_{ice} 6.534 \times 10^{-4} (X^*)^{-0.048} (W)^{0.004}$ $((T_{ip} - T_w)/(T_a - T_w))^{0.737} (\text{Re}_D)^{0.375} (\text{Fo})^{0.18}$ <p><b>(Empirical)</b></p>	W/m-K	$T_w = -20.5^\circ\text{C}$ to $-41^\circ\text{C}$ $T_a = -10.1^\circ\text{C}$ to $-25.8^\circ\text{C}$ $\text{Re} = 3278$ to $13112$	Not recommended; only to be used with other equations of this study	1999	Mao et al.
K13	FLAT PLATE	$k_{fr} = k_a + \rho_a f_s C_{pa} f_s u^2 C_f / 2(y(t) + \delta) / 2.5 ;$ $k_{f,in} = \frac{k_a}{\left(1 - \left(\frac{6s}{\pi}\right)\right)^{1/3}} \left[1 - \left(\frac{a^2 - 1}{2}\right) \ln\left(\frac{a+1}{a-1}\right)\right]$ $a = \left(1 + 4/\pi \left(\frac{k_{ice}}{k_a} - 1\right) \left(\frac{6s}{\pi}\right)^{2/3}\right)^{1/2}$ $s = \frac{\rho_f - \rho_a}{\rho_{ice} - \rho_a}$ $k_{tot} = \frac{k_{f,r} k_{f,in} (x_{f,r} + x_{f,in})}{k_{f,in} x_{f,r} + k_{f,r} x_{f,in}}$ <p><b>(Theoretical)</b></p>	W/m-K	$T_w = -10^\circ\text{C}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$ $u = 1.5$ to $2.0$ m/s	Max. density 400 kg/m <sup>3</sup>	2002	Yun et al.
K14	FLAT PLATE	$k_{f,eff} = C_{DCD}(0.0448 + 4.42 \times 10^{-8} \rho_f^3);$ $C_{DCA} = 1.09 - 8 \times 10^{-5} (DCA - 55)^2$ <p><b>(Empirical)</b></p>	W/m-K	$T_w = -22^\circ\text{C}$ $T_a = 12^\circ\text{C}$ $u = 1.57$ m/s $DCA = 23, 55, 88$	Max. density 250 kg/m <sup>3</sup>	2003	Shin et al.
K15	FLAT PLATE	$k_f = \xi_f k_{f,max} + (1 - \xi_f) k_{f,min}$ <p>Region 1: <math>\xi_f = 0.283 + e^{-0.020\text{pf}}</math> (<math>T_w = -4^\circ\text{C}</math> to <math>-10^\circ\text{C}</math>)</p> <p>Region 2: <math>\xi_f = 0.140 + 0.919e^{-0.0142\text{pf}}</math> (<math>T_w = -10^\circ\text{C}</math> to <math>-21^\circ\text{C}</math>)</p> <p>Region 3: <math>\xi_f = 0.0107 + 0.419e^{-0.00424\text{pf}}</math> (<math>T_w = -21^\circ\text{C}</math>)</p> <p><b>(Semi-empirical)</b></p>	W/m-K	$T_w = -5^\circ\text{C}$ to $-30^\circ\text{C}$ $T_a = 10^\circ\text{C}$ to $-1.5^\circ\text{C}$ $u = 0.5$ to $1.5$ m/s	Only appropriate for early stage	2004	Na and Webb

\*  $k_f$  is equivalent to  $k_{eff}$ .



# Annexe B

## Procédure de réalisation d'un test expérimental

La réalisation d'un test expérimental nécessite une méthodologie précise afin d'optimiser le temps et de réaliser des tests précis. Pour cela, la méthodologie à respecter est précisée ci-dessous :

1. La plaque doit être placée position basse, ce qui veut dire qu'elle est accessible, elle ne ferme pas la veine d'air. En premier, il faut s'assurer de la propreté du feuillard et que la mire est bien en place. Lorsque les vérifications sont effectuées, il faut recouvrir le feuillard de deux épaisseurs de film plastique. Le nombre deux est important car doubler l'épaisseur permet de renforcer le film afin qu'il ne se déchire pas. Le rôle de ce film plastique est de protéger la surface du feuillard pendant sa descente en température : si le feuillard n'est pas protégé, il commence à givrer avant le début du test. Le film garantit un feuillard propre non givré. Il faut aussi placer un carton au niveau du trou laissé par la plaque en position basse afin de fermer la veine d'air.
2. Une fois le feuillard protégé, le bain thermostaté peut être mis en marche. Il faut régler la température de consigne voulue. La descente en température est assez longue. Il faut compter environ 2h30 pour passer d'une température de 15 °C à -20 °C.
3. Une fois le bain proche de sa température de consigne (à 0,5 °C environ), il faut mettre en route la chambre froide. Il faut la programmer en cycle continu afin qu'elle produise en permanence du froid. Il n'est donc pas nécessaire de lui imposer une température de consigne. Dans le même temps, il faut mettre en marche le ventilateur, et régler le débit à partir du registre et des anémomètres à fils chauds. Ensuite, il faut allumer le régulateur des résistances thermiques qui permet de piloter la température de l'air. C'est donc ici, que la température de consigne de l'air est imposée. Le dernier appareil à mettre en route est le générateur de vapeur, qui est réglé à l'humidité souhaitée. Attention, il faut laisser une petite quantité d'eau s'écouler afin que l'eau qui se vaporise soit renouvelée. Attention à ne pas trop remplir la cuve du générateur, un excès d'eau entraîne une mauvaise régulation. Il ne faut pas dépasser les 3/5 de la cuve.
4. Du côté de la section d'essais, il faut mettre la caméra infrarouge, l'appareil photo, les deux lampes led (jusqu'à l'avant dernier trait), le Keithley, et le PC en marche (attention, il est long !) pour l'acquisition des données. Afin de surveiller la mise en régime, il faut lancer le programme Labview, enregistrer les résultats

dans un dossier de préparation. Cette action permet de visualiser sur l'écran la stabilisation de la température et de l'humidité de l'air.

5. Lorsque le régime permanent est atteint dans la plaque et dans la veine d'air, il faut couper l'acquisition en cours et entrer un nouveau nom pour le fichier de sauvegarde.
6. La prochaine étape consiste à mettre en place la plaque dans la veine. Pour cela, il faut enlever le film plastique de la plaque en restant vigilant de ne pas le déchirer. S'il se casse et que le givre formé au dessus tombe sur la plaque froide, le test n'est plus réalisable. Une fois le film retiré, faire monter la plaque à fleur de la veine à l'aide du verin mécanique. Il faut ensuite brancher les thermocouples le plus rapidement possible afin de saisir les premiers instants. Attention, il faut vérifier la qualité des photos prises par l'appareil (notamment le réglage du focus) et régler la caméra infrarouge (elle se dérègle à chaque démarrage).
7. Il faut ensuite laisser le test se dérouler en faisant attention au niveau d'eau dans la cuve du générateur de vapeur et à la caméra infrarouge qui parfois s'arrête sans raison en plein milieu du test. Dans ce cas, il faut arrêter et redémarrer rapidement le programme Labview en faisant bien attention de changer le nom du fichier d'enregistrement des résultats afin de ne pas écraser les données enregistrées auparavant. Ne pas oublier de rerégler la caméra infrarouge lors du deuxième lancement.
8. Une fois le test terminé, il faut couper le programme, les différents appareils et se préparer à mesurer la masse volumique. Une fois que tout est coupé, il faut déconnecter les thermocouples (de chaque côté). Il faut ensuite déconnecter les quatre raccords rapides qui alimentent la plaque en eau glycolée. Il faut ensuite essuyer le givre résiduel et peser la plaque en l'état. Il faut ensuite dégivrer la plaque à l'aide du décapeur thermique et la nettoyer afin qu'il ne reste ni givre, ni eau dessus. Il faut la peser de nouveau. La différence des deux pesées donne la masse de givre déposée au cours du test complet.
9. Il faut ensuite reconnecter les raccords rapides pour préparer le test suivant.

Quelques astuces à savoir :

- La cuve du générateur de vapeur s'encrasse très rapidement. Pour la nettoyer, il faut laisser l'eau chaude du dernier test de la journée dans la cuve et y incorporer une dizaine de centilitres de vinaigre blanc. Il faut laisser agir toute la nuit et bien rincer la cuve à l'eau claire le lendemain matin.
- Lorsque le PC est éteint puis rallumé, la probabilité que le programme Labview dysfonctionne est proche de 100 %. Son symptôme principal : il ne boucle plus. Il tourne une fois, deux fois puis s'arrête. Pour résoudre ce problème, il suffit de supprimer le bouton stop en face avant et de le recréer. Il faut recâbler sur le diagramme et si tout se passe bien, le programme devrait fonctionner de nouveau.

# Annexe C

## Conductivité thermique de la plaque de KC57

La conductivité thermique de la plaque en carbone a été déterminée à partir de mesures réalisées par Influtherm. Influtherm est un centre d'expertise thermique spécialisée dans la mesure des propriétés thermiques.

Des échantillons de différentes dimensions issus du même bloc que la matière constituant la plaque utilisée lors des essais ont été fournis à Influtherm. La conductivité ne pouvant pas être estimée à partir d'une mesure directe, il a été choisi de réaliser des mesures, de chaleur massique, de diffusivité thermique apparente et de masse volumique. La connaissance de ces trois propriétés permet de calculer la conductivité thermique du matériau.

Les pages suivantes présentent les éléments extraits du procès verbal délivré par Influtherm. Les détails des échantillons, le matériel utilisé, les résultats et les incertitudes associées sont présentés ci-dessous. L'obtention de toutes ces informations a permis d'obtenir un calcul précis de la conductivité thermique de la plaque en fonction de la température.

# PROCES VERBAL D'ESSAI

## MESURE DE CHALEUR MASSIQUE : Méthode Calorimétrique

Date(s) : 28 janvier 2015  
 Opérateur(s) : T. Rignon, D. Varieras  
 Appareillage : Calorimètre C80II SETARAM [ambiante à 300 °C]

### ■ Type de matériaux

- Homogène  
 Hétérogène  
 Autre :

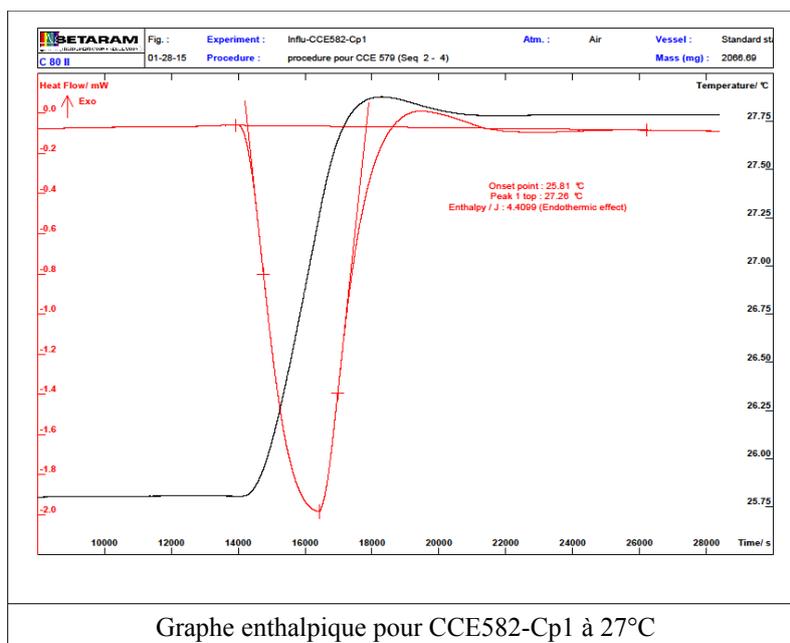
### ■ Échantillons

Référence client	Référence Influtherm	Masse [g]
Fluxmètre_givrage	CCE582-Cp1	2,0667

### ■ Résultats

Référence client	Référence Influtherm	Température au maximum du pic enthalpique [°C]	Chaleur Massique apparente [J/kg/K]	Incertitude [J/kg/K]
Fluxmètre_givrage	CCE582-Cp1	27,26	731	37

### ■ Graphe enthalpique



**Pour INFLUTHERM**  
**Didier VARIERAS**

**PROCES VERBAL D'ESSAI**  
**MESURE DE CHALEUR MASSIQUE : Méthode DSC**

Date(s) : 3 février 2015  
Opérateur(s) : C. Navarro  
Appareillage : DSC204 Phoenix NETZSCH  
Gaz : Azote (40ml/min) sous P<sub>atm</sub>

■ **Type de matériaux**

- Homogène  
 Hétérogène  
 Autre :

■ **Échantillons**

Référence client	Référence Influtherm	Masse [mg]
Fluxmètre_givrage	CCE582-DSC1	55,12

Rq : les échantillons sont mis en creuset platine chemisé alumine muni d'un couvercle percé

■ **Résultats**

Référence client	Fluxmètre_givrage
Référence Influtherm	CCE582-DSC1
Température [°C]	Cp [J/kg/K]
<b>-40</b>	<b>529*</b>
<b>-30</b>	<b>559</b>
<b>-20</b>	<b>588</b>
<b>-10</b>	<b>616</b>
<b>0</b>	<b>644</b>
<b>10</b>	<b>673</b>
<b>20</b>	<b>702</b>
<b>30</b>	<b>730</b>
<b>40</b>	<b>757*</b>

Rq : Barre d'erreur environ 7%.

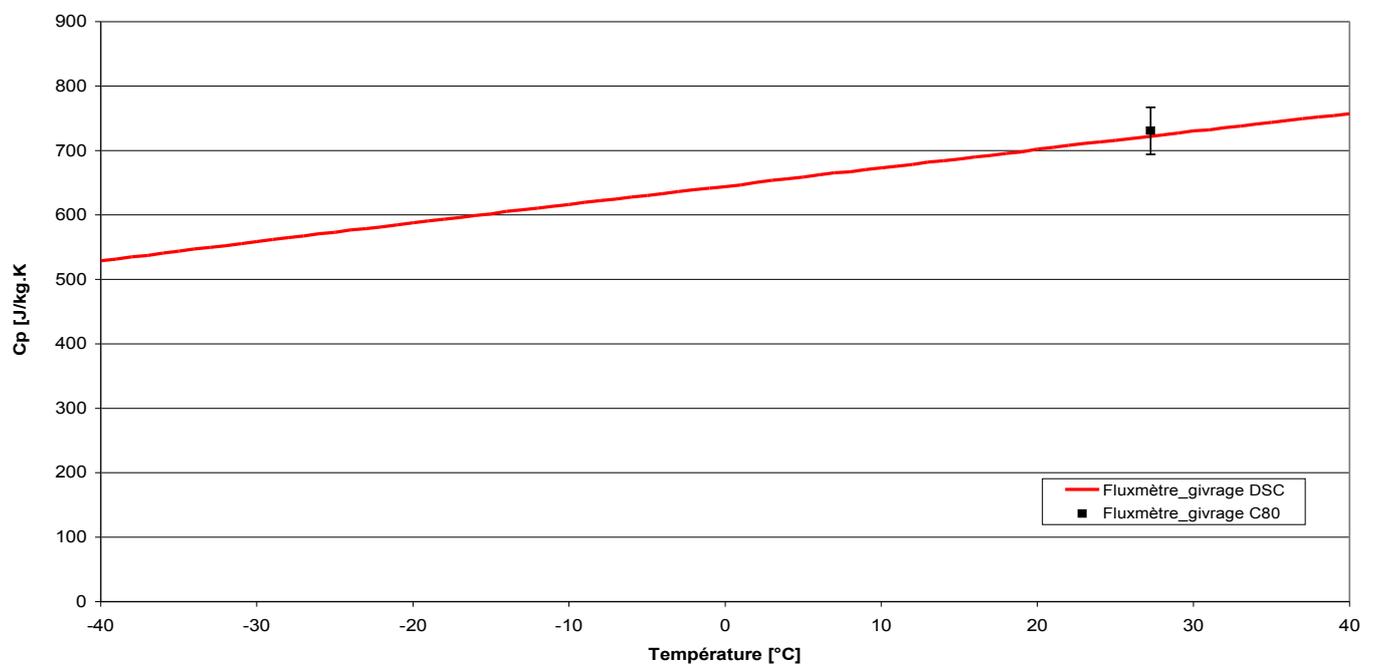
\* non contractuel

**Pour INFLUTHERM**  
**Didier VARIERAS**

## Grphe : Chaleur Massique Apparente



Chaleur Massique apparente : CCE582



**PROCES VERBAL D'ESSAI**  
**MESURE DE DIFFUSIVITE THERMIQUE APPARENTE**

Date(s) : 30 janvier et 2 et 5 Février 2015  
Opérateur(s) : T. Rignon  
Appareillage(s) : Diffusivimètre flash [-30°C à 200°C]

■ **Type de matériaux**

- Homogène  
 Hétérogène  
 Autre :

■ **Échantillons**

Référence client	Référence Influtherm	Épaisseur [mm]	Diamètre [mm]
Fluxmètre_givrage	CCE582-D1	5,00	25

■ **Résultats**

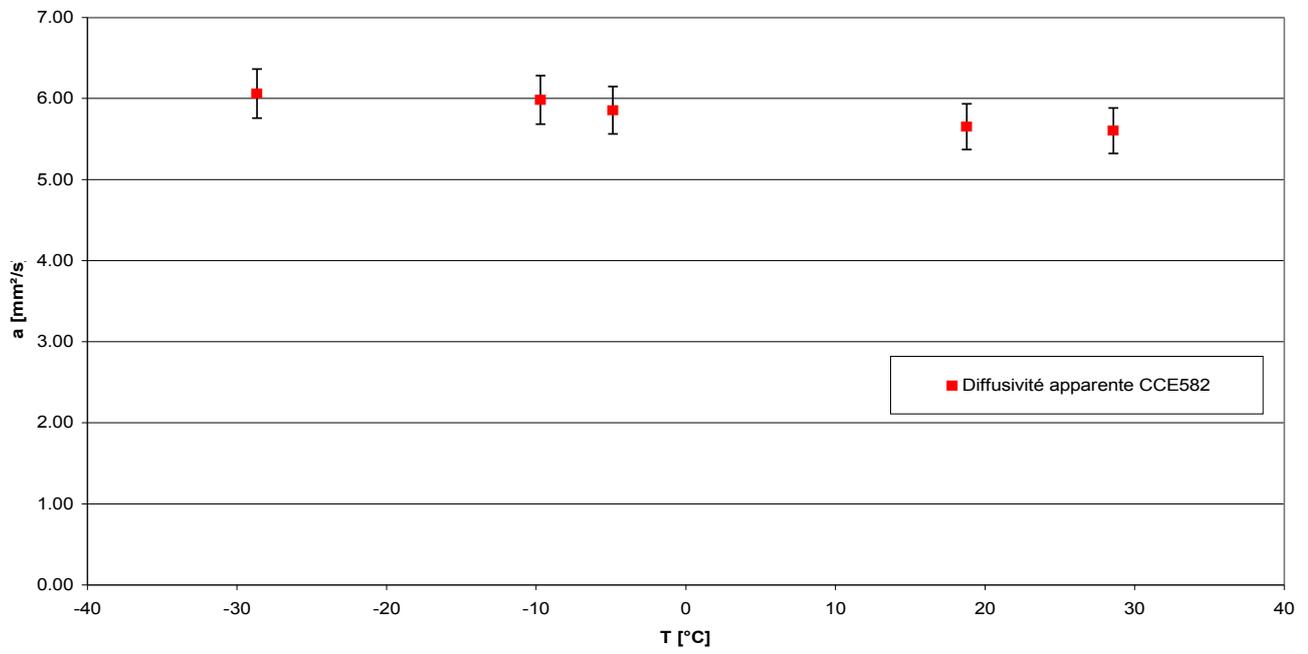
Référence Client	Référence Influtherm	Température moyenne de l'essai [°C]	Diffusivité thermique apparente [ $10^{-6} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ ]	Incertitude [ $10^{-6} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ ]
Fluxmètre_givrage	CCE582-D1	-29	6,06	0,30
		-10	5,98	0,30
		-5	5,86	0,29
		19	5,65	0,28
		29	5,6	0,28

**Pour INFLUTHERM**  
**Didier VARIERAS**

■ Graphe



Diffusivité thermique apparente CCE582



**PROCES VERBAL D'ESSAI**  
**ESTIMATION DE LA MASSE VOLUMIQUE A TEMPERATURE**  
**AMBIANTE**

Date(s) : 17 Février 2015  
Opérateur(s) : T. Rignon  
Appareillage(s) : Pied à coulisse universel de 150mm au 0,01mm : Facom 1300E  
Micromètre de précision de 0 à 25mm au 0,001mm : Mitutoyo IP65  
Balance de précision : Mettler Toledo XA 105

■ **Type de matériaux**

- Homogène  
 Hétérogène  
 Autre :

■ **Échantillons**

Référence client	Référence Influtherm	Dimension en mm		Volume en m <sup>3</sup>	Masse en g
		Rayon	épaisseur		
Fluxmètre_givrage	CCE582-D1	12,49	5,01	2,45E-06	4,437

■ **Résultats**

Référence client	Référence Influtherm	Température de mesure [°C]	Masse volumique apparente $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Fluxmètre_givrage	CCE582-D1	25,0	<b>1809</b>

**Pour INFLUTHERM**  
**Didier VARIERAS**

# PROCES VERBAL D'ESSAI

## MESURE DE DILATOMETRIE

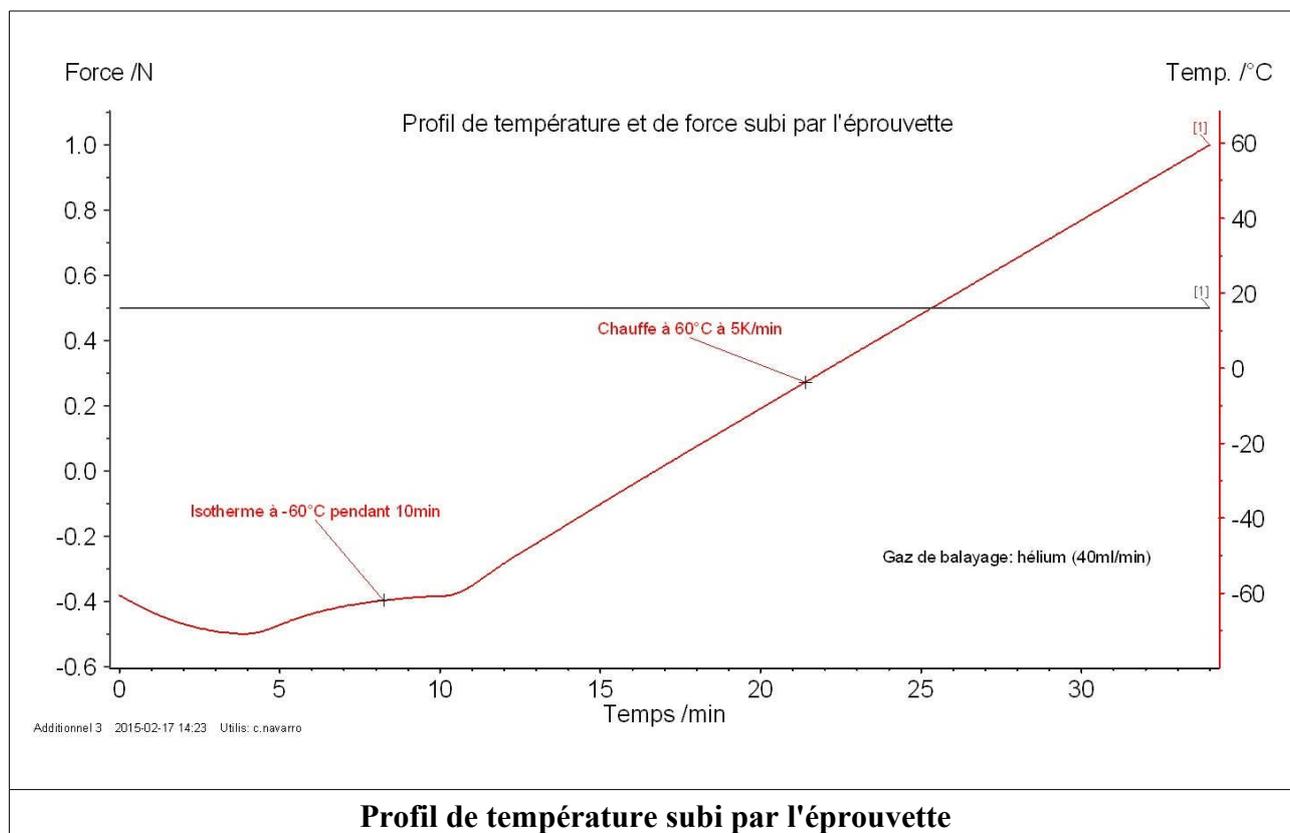
Date(s) : 28 et 29 janvier 2015  
 Opérateur(s) : T. Rignon et D. Varieras  
 Appareillage : TMA 402 F3 NETZSCH [-170°C à 1000°C]  
 Gaz utilisé : Azote à P<sub>atm</sub> avec débit de 40ml/min  
 Vitesse de montée : 5K/min

### ■ Type de matériaux

- Homogène  
 Hétérogène  
 Autre :

### ■ Échantillons

Référence client	Référence Influtherm	Longueur (L <sub>0</sub> ) [mm]	Type de porte éprouvette	Force appliquée (N)
Fluxmètre_givrage	CCE582-Dil1	24,97	expansion	0,500
Fluxmètre_givrage	CCE582-Dil2	25,01	expansion	0,500



## ■ Résultats

---

Température [°C]	Dilatation thermique dL/L <sub>0</sub>	
	CCE582-Dil1	CCE582-Dil2*
-40.00	-2.99E-04*	-2.96E-04
-30.00	-2.51E-04	-2.48E-04
-20.00	-2.02E-04	-1.99E-04
-10.00	-1.52E-04	-1.50E-04
0.00	-1.02E-04	-1.01E-04
10.00	-5.07E-05	-5.03E-05
20.00	4.96E-07	4.78E-07
30.00	5.16E-05	5.12E-05
40.00	1.03E-04*	1.02E-04

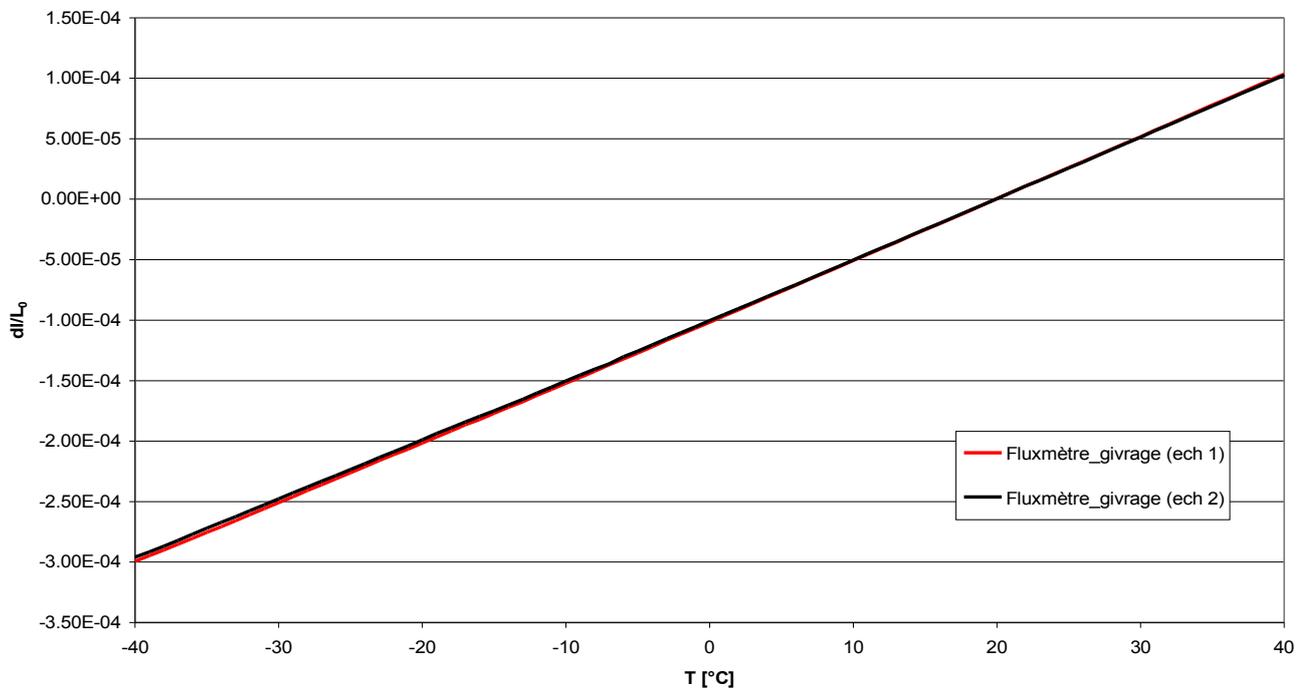
\* non contractuel  
Barre d'erreur environ 7%.

Pour INFLUTHERM  
Didier VARIERAS

### Graphe : Dilatométrie



### Dilatométrie CCE582



## Annexe D

Programme Labview de traitement  
des images pour le calcul de  
l'épaisseur du givre



## Annexe E

Caractéristiques du fluide  
frigoporteur utilisé dans le bain  
thermostaté : Kryo30

Wichtige Eigenschaften  
Important properties  
Propriétés importantes

Preiswerte, nicht brennbare Temperierflüssigkeit für den Wärme- und Kältebereich.

Low-cost non-flammable thermostating liquid for heating and low-temperature range.

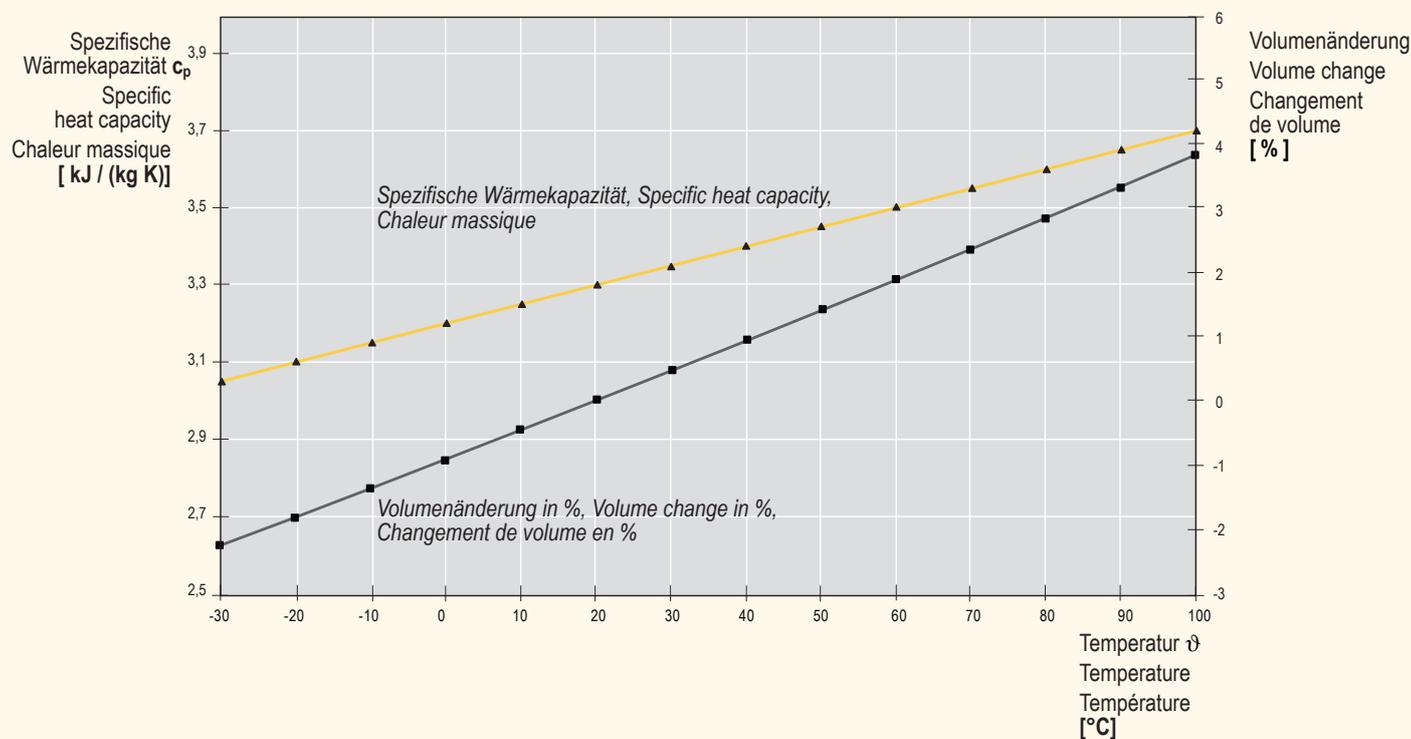
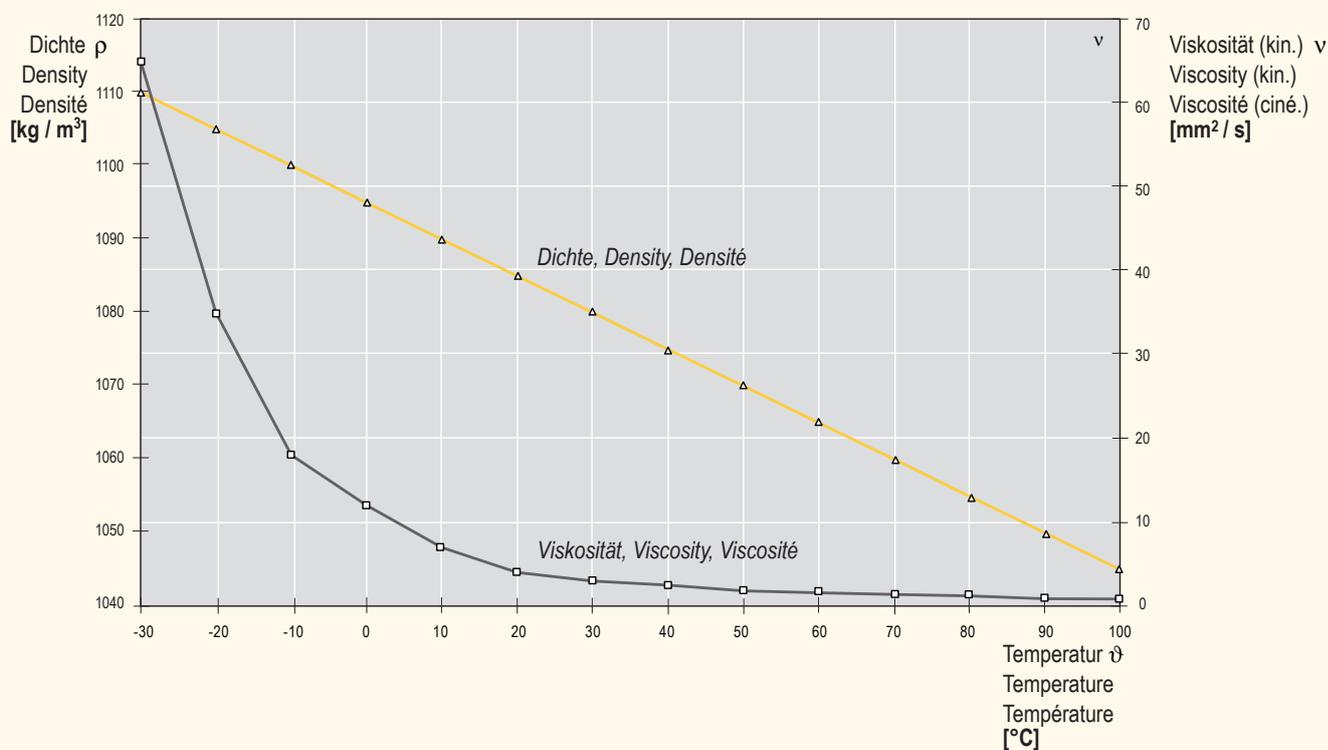
Liquide caloporteur ininflammable à prix avantageux pour travailler en chaud et en froid.

Empfohlener Temperaturbereich Recommended temperature range Domaine de température recommandé	von -30 °C bis 90 °C from -30 °C to 90 °C de -30 °C à 90 °C	
Chemische Charakterisierung Chemical characterisation Identification de la substance	Monoethylenglykol-Wasser-Mischung mit Inhibitoren Monoethylene glycol/water mixture with inhibitors Mélange monoethylene glycol/eau avec inhibiteurs	
Farbe Colour Couleur	hellgelb light yellow jaune pâle	
Viskosität, kinematisch Viscosity, kinematic Viscosité cinématique	bei 20 °C at 20 °C à 20 °C	4 mm <sup>2</sup> /s
Dichte Density Densité	bei 20 °C at 20 °C à 20 °C	1085 kg/m <sup>3</sup>
Stockpunkt Pour point Température de fusion		< -70 °C
Flammpunkt Flash point Point d'éclair		—
Brennpunkt Fire point Point de feu		—
Siedepunkt Boiling point Température d'ébullition		≥ 108 °C
Zündtemperatur Ignition temperature Température d'auto-inflammation		—
Wasserlöslichkeit Water solubility Solubilité de l'eau		vollständig löslich completely soluble complètement soluble
Lösemittel Solvent Solvant		—
Materialunverträglichkeit Material incompatibility Incompatibilité du matériau		Es liegen keine Erkenntnisse über Materialunverträglichkeit vor No incompatibility with other materials is known Aucune connaissance d'incompatibilité de matériau

Geeignetes Schlauchmaterial: siehe Seite 30, suitable tubing: see page 30, tuyaux appropriés: voir page 30.

Empfohlener Temperaturbereich von -30 °C bis 90 °C  
 Recommended temperature range from -30 °C to 90 °C  
 Domaine de température recommandé de -30 °C à 90 °C

Physikalische Eigenschaften  
 Physical properties  
 Propriétés physiques



Inhalt, Size, Contenu:	5 L	10 L	20 L
Bestell-Nr., Cat.-No., Réf.:	LZB 109	LZB 209	LZB 309



# Annexe F

## Correction de l'épaisseur du givre en configuration inclinée

Cette annexe présente la correction qu'il est nécessaire d'apporter lorsque l'appareil photo n'est pas placé dans l'alignement de la couche de givre. Dans certaines configurations, l'appareil photo peut être placé en hauteur et donc constituer un angle avec l'alignement de l'horizontale comme le montre la figure F.1. Le programme Labview ne permet de ce fait pas de mesurer l'épaisseur  $e$  mais le déplacement  $\Delta x$ . Il est donc nécessaire de corriger la valeur renvoyée par le programme pour en déduire la véritable épaisseur du givre. La correction nécessite quelques calculs géométriques présentés ci-dessous. Une première relation dans le triangle BOC donne :

$$\cos(\beta) = \frac{\Delta x + l}{d} \quad (\text{F.1})$$

La seconde relation, issue du triangle AEC permet de déduire la valeur de l'angle  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta \quad (\text{F.2})$$

La relation dans le triangle ABD donne :

$$\rho = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (\text{F.3})$$

La valeur de l'angle  $\phi$  peut alors être déduite :

$$\varphi = \gamma - \rho \quad (\text{F.4})$$

Le triangle isocèle ABC permet de déduire la valeur de l'angle  $\Gamma$  :

$$\Omega = \frac{\pi - \varphi}{2} \quad (\text{F.5})$$

Puis de l'angle  $\varepsilon$  à l'aide du triangle OBC :

$$\varepsilon = \Omega - \beta \quad (\text{F.6})$$

Ce qui permet de calculer la valeur de l'épaisseur du givre :

$$e = \Delta x \cdot \tan(\varepsilon) \quad (\text{F.7})$$

Le diagramme ci dessous est issu du programme Labview qui a été réalisé à partir de ces équations afin de calculer l'épaisseur du givre.

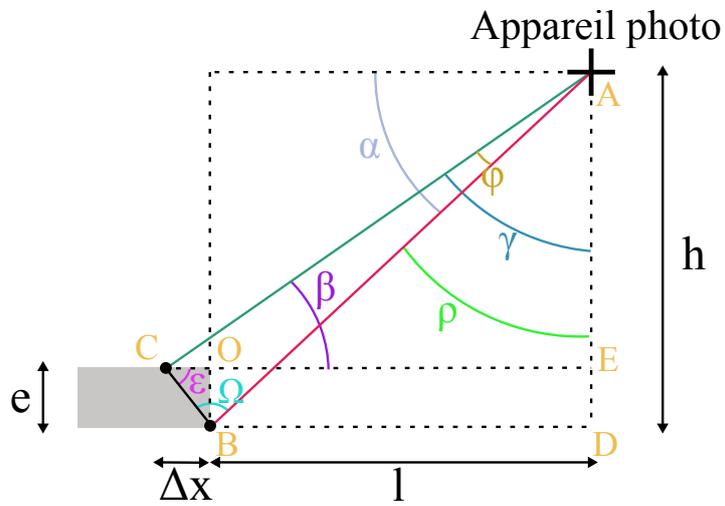


FIGURE F.1 – Description de la configuration avec l'appareil photo placé en hauteur

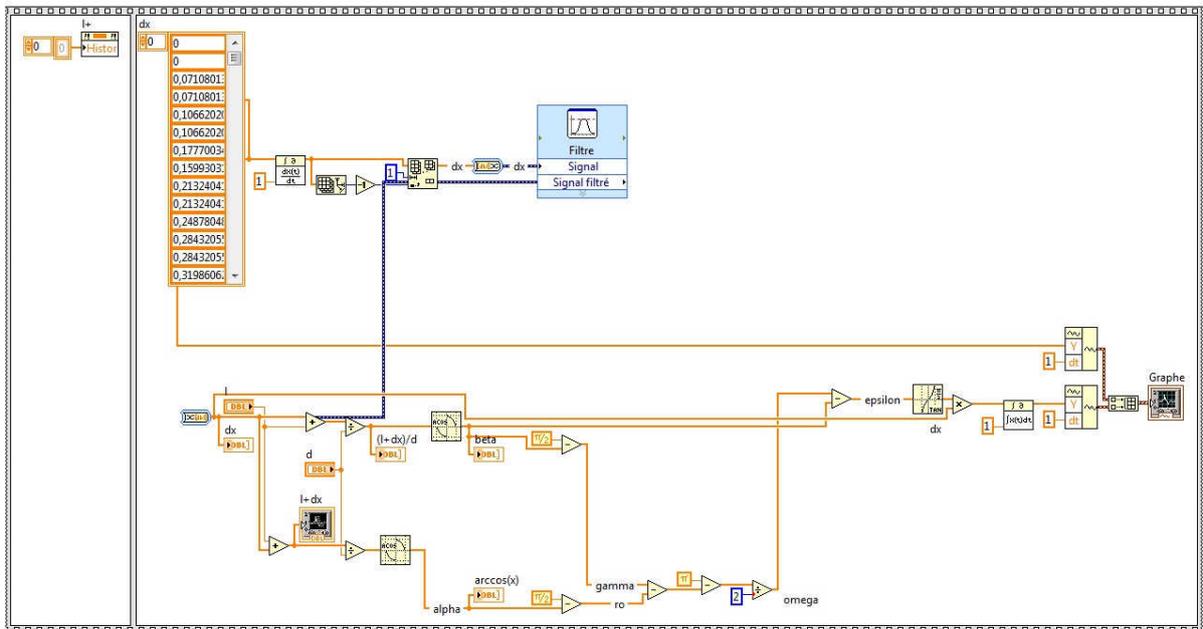


FIGURE F.2 – Diagramme du programme Labview pour la correction de la mesure d'épaisseur

# Bibliographie

- [1] H. Auracher. Effective thermal conductivity of frost. *Proceedings of the International Symposium of Heat and Mass Transfer in Refrigeration Cryogenics, Dubrovnik*, pages 285–302, 1986. 58, 59, 60, 136
- [2] Y. Barzanoni, O. Noorshams, H. Basirat Tabrizi, and E. Damangir. Experimental investigation of frost formation on a horizontal cold cylinder under cross flow. *International Journal of Refrigeration*, 34(4) :1174–1180, 2011. 16, 17, 19, 21
- [3] Nabil Benabdelmoumene. Note technique : Comportement des pompes à chaleur en givrage à température positive. Technical report, Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques, 2003. 9
- [4] M. Bigorre. Etude du givrage et du dégivrage d'évaporateurs de chambres froides. Technical report, DEA Transferts thermiques. Institut National des Sciences Appliquées - Ecole Centrale de Lyon - Laboratoire d'Énergétique et Automatique, 1988. 8
- [5] G. Biguria and L.A. Wenzel. Measurement and correlation of water frost thermal conductivity and density. *I&EC Fundam.* 9, pages 129–137, 1970. 58, 59
- [6] T.Y. Bong, N.E. Wijesundera, E.L. Saw, and K.O. Lau. Comparison of beta-ray and gamma-ray transmission methods for measurement of frost density. *Experimental Thermal and Fluid Science*, pages 393–420, 2015. 20
- [7] P.L.T Brian, R.C. Reid, and I. Brazinsky. Cryogenic frost properties. *Cryogenic Technology*, pages 205–212, 1969. 58, 59, 136, 137, 138, 139, 146
- [8] Riccardo Brignoli, Luca Cecchinato, and Claudio Zilio. Experimental analysis of an air–water heat pump with micro-channel heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 50(1) :1119–1130, 2013. 12
- [9] Liang Cai, Ronghan Wang, Puxiu Hou, and Xiaosong Zhang. Study on restraining frost growth at initial stage by hydrophobic coating and hygroscopic coating. *Energy and Buildings*, 43(5) :1159–1163, 2011. 9, 23, 41
- [10] Chin-Hsiang Cheng and Yu-Chieh Cheng. Predictions of frost growth on a cold plate in atmospheric air. *International Communications in heat and Mass Transfer*, 28 :953–962, 2001. 29, 58
- [11] Chin-Hsiang Cheng and Chiuan-Che Shiu. Frost formation and frost crystal growth on a cold plate in atmospheric air flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(21) :4289–4303, 2002. 19

- [12] J. Cui, W.Z. Li, Y. Liu, and Y.S. Zhao. A new model for predicting performance of fin-and-tube heat exchanger under frost condition. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32(1) :249–260, 2011. 28
- [13] Diogo L. Da Silva, Christian J.L. Hermes, and Claudio Melo. Experimental study of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators. *Applied Thermal Engineering*, 31(6-7) :1013–1020, 2011. 13, 30
- [14] M.A. Dietenberg. Generalized correlation of the water frost thermal conductivity. *Int. J. Heat Mass Transf.* 26, pages 607–619, 1982. 58
- [15] Jiankai Dong, Shiming Deng, Yiqiang Jiang, Liang Xia, and Yang Yao. An experimental study on defrosting heat supplies and energy consumptions during a reverse cycle defrost operation for an air source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 37 :380–387, 2012. 10
- [16] A. El Cheikh and A. Jacobi. A mathematical model for frost growth and densification on flat surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77 : 604–611, 2014. 24, 47, 48
- [17] Marco Fossa and Giovanni Tanda. Frost formation in vertical channels under natural convection. *International Journal of Multiphase Flow*, 36(3) :210–220, 2010. 16, 17, 18, 19, 21, 24, 47
- [18] Norihiko. Fukuta. Experimental studies on the growth of small ice crystals. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26, 1968. xix, 14, 15
- [19] Xian-Min Guo, Yi-Guang Chen, Wei-Hua Wang, and Chun-Zheng Chen. Experimental study on frost growth and dynamic performance of air source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 28(17) :2267–2278, 2008. 8
- [20] Philippe Haberschill, M. Heim, D. Bracon, and M. Lallemand. Optimisation expérimentale du dégivrage d’une machine frigorifique. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 14 :46–51, 1991. 9
- [21] Y. Hayashi, a. Aoki, and K. Hori. Study of frost properties correlating with frost formation types. *Journal of heat Transfer*, 199 :291–245, 1977. 15, 16, 23, 30, 33, 36, 43, 45, 133, 134
- [22] Michael Heim. Étude du givrage et du dégivrage d’évaporateurs de chambre froide - optimisation expérimentale. Technical report, DEA Transferts thermiques. Institut National des Sciences Appliquées - Ecole Centrale de Lyon - Laboratoire d’Énergétique et Automatique, 1989. 8
- [23] Christian J.L. Hermes. An analytical solution to the problem of frost growth and densification on flat surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(23-24) :7346–7351, 2012. ix, xxii, 29, 30, 32, 33, 34, 37, 41, 42, 43, 44, 45, 50, 51, 55, 62, 124, 129, 130, 133, 134, 146
- [24] Christian J.L. Hermes, Robson O. Piucco, Jader R. Barbosa, and Cláudio Melo. A study of frost growth and densification on flat surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(2) :371–379, 2009. xxii, 14, 18, 19, 21, 23, 30, 32, 34, 35, 39, 40, 41, 42, 44, 46, 50, 52, 55, 57, 62, 91, 92, 121, 129, 130, 131, 132, 143, 145, 146

- [25] Christian J.L. Hermes, Felipe R. Loyola, and Valter S. Nascimento. A semi-empirical correlation for the frost density. *International Journal of Refrigeration*, 46 :100–104, 2014. 25, 29, 35, 36, 56, 133, 134, 135, 137, 138, 143, 146
- [26] T. Hosoda and H. Uzuhashi. Effects of frost on the heat transfer coefficient. *Hitashi Review*, 16 :254–259, 1967. 35, 36, 43, 45, 133, 134
- [27] Dong Huang, Quanxu Li, and Xiuling Yuan. Comparison between hot-gas bypass defrosting and reverse-cycle defrosting methods on an air-to-water heat pump. *Applied Energy*, 86(9) :1697–1703, 2009. 10
- [28] Duc Manh Huynh. *Mécanismes de transfert au sein d’une couche de glace en développement en présence d’un écoulement turbulent : approches expérimentale et numérique*. PhD thesis, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d’Aérotechnique - Poitiers, 2015. 19, 21, 28
- [29] Jose Irigaray, Yong Xin. Tao, and Shaobo Jia. Review article : a critical review of properties models for frost formation analysis. *HVAC&R Research*, 10 :4 :393–420, 2004. xvii, 30, 59, I
- [30] K. A. R. Ismail and C. S. Salinas. Modeling of frost formation over parallel cold plates. *International Journal of Refrigeration*, 22(5) :425–441, 1999. 112
- [31] D.D. Janssen, W.F. Mohs, and F.A. Kulacki. High resolution imaging of frost melting. *Proceedings of the ASME 2012 Summer Heat Transfer Conference*, 2012. 16, 19
- [32] D.D. Janssen, W.F. Mohs, and F.A. Kulacki. Modeling frost layer growth : a physical approach. *Proceedings of the ASME 2012 Summer Heat Transfer Conference*, 2012. 16, 24, 47
- [33] B.W. Jones and J.D. Parker. Frost variation with varying environmental parameters. *ASME Journal of Heat Transfer*, 97 :255–259, 1975. 23, 29, 41, 112
- [34] Cesare Maria Joppolo, Luca Molinaroli, Stefano De Antonellis, and Umberto Merlo. Experimental analysis of frost formation with the presence of an electric field on fin and tube evaporator. *International Journal of Refrigeration*, 35 (2) :468–474, 2012. 9
- [35] M. Kandula. Frost growth and densification on a flat surface in laminar flow with variable humidity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39 (8) :1030–1034, 2012. 29, 36, 41, 43, 45, 133, 134
- [36] Max Kandula. Correlation of water frost porosity in laminar flow over flat surfaces. *Special Topics and Reviews in Porous Media : An International Journal*, 3 :79–87, 2014. 23, 33, 34
- [37] Kyoung-Hoon Kim, Hyung-Jong Ko, Kyoungjin Kim, Yong-Wook Kim, and Kie-Joo Cho. Analysis of heat transfer and frost layer formation on a cryogenic tank wall exposed to the humid atmospheric air. *Applied Thermal Engineering*, 29(10) : 2072–2079, 2009. 19

- [38] Kyoungmin Kim and Kwan-Soo Lee. Frosting and defrosting characteristics of surface-treated louvered-fin heat exchangers : Effects of fin pitch and experimental conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 60 :505–511, 2013. 9, 13
- [39] Fernando T. Knabben, Christian J.L. Hermes, and Cláudio Melo. In-situ study of frosting and defrosting processes in tube-fin evaporators of household refrigerating appliances. *International Journal of Refrigeration*, 34(8) :2031–2041, 2011. 28
- [40] T. Kobayashi. On the habit of snow crystals artificially produced at low pressures. *J. Met. Soc. Jpn.*, pages 193–208, 1958. xix, 15, 57, 58
- [41] Jeong-Tae Kwon, Hyo Jae Lim, Young-Chul Kwon, Shigeru Koyama, Dong-Hwi Kim, and Chieko Kondou. An experimental study on frosting of laminar air flow on a cold surface with local cooling. *International Journal of Refrigeration*, 29(5) : 754–760, 2006. 19, 21
- [42] Jeong-Tae Kwon, Dong-Hwi Kim, Cheol Huh, Shigeru Koyama, and Young-Chul Kwon. Frost distribution characteristics of laminar airflow on cold surface of mini-channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(7) : 887–892, 2011. 19
- [43] R. Le Gall and Ralph L. Griot. Modelling of frost growth and densification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40 :3177–3187, 1997. 29, 112
- [44] Kwan-Soo Lee, Woo-Seung Kim, and Tae-Hee Lee. A one-dimensional model for frost formation on a cold surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40 :4359–4365, 1997. 18, 19, 23, 29, 30, 32, 33, 34, 37, 41, 42, 91, 112
- [45] Kwan-Soo Lee, Sung Jhee, and Dong-Keun Yang. Prediction of the frost formation on a cold flat surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(20) : 3789–3796, 2003. 18, 19, 21, 23, 41, 42
- [46] Sang Hun Lee, Mooyeon Lee, Won Jae Yoon, and Yongchan Kim. Frost growth characteristics of spirally-coiled circular fin-tube heat exchangers under frosting conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64 :1–9, 2013. 17, 19
- [47] Y. B. Lee and S. T. Ro. Frost formation on a vertical plate in simultaneously developing flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(8) :939–945, 2002. 16, 18, 19, 21, 29, 47, 49, 51, 121
- [48] Y.B. Lee and S.T. Ro. Analysis of the frost growth on a flat plate by simple models of saturation and supersaturation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29 : 685–696, 2005. 24, 30
- [49] Kristian Lenic, Anica Trp, and Bernard Frankovic. Transient two-dimensional model of frost formation on a fin-and-tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(1-2) :22–32, 2009. 28
- [50] Zhongliang Liu, Hongyan Wang, Xinhua Zhang, Sheng Meng, and Chongfang Ma. An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under

- natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint. Part I. Anti-frosting performance and comparison with the uncoated metallic surface. *International Journal of Refrigeration*, 29(2) :229–236, 2006. 9, 16
- [51] Zhongliang Liu, Xinghua Zhang, Hongyan Wang, Sheng Meng, and Shuiyuan Cheng. Influences of surface hydrophilicity on frost formation on a vertical cold plate under natural convection conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31(7) :789–794, 2007. 16, 19
- [52] A. Léoni, M. Mondot, F. Durier, R. Revellin, and P. Haberschill. State-of-the-art review of frost deposition on flat surfaces. *International Journal of Refrigeration*, 68 :198 – 217, 2016. 27, 47, 133, 134, 135, 146
- [53] G. Mader and C. Thybo. A new method of defrosting evaporator coils. *Applied Thermal Engineering*, 39 :78–85, 2012. 10
- [54] Y. Mao, R.W. Besant, and K.S. Rezkallah. Measurement and correlations of frost properties with airflow over a plate. *ASHRAE Transactions*, 98 :65–77, 1992. 19, 21, 33, 58, 59
- [55] Y. Mao, R.W. Besant, and H. Chen. Frost characteristics and heat transfer on a flat plate under freezer operating conditions : Part i, experimentation and correlations. *ASHRAE transactions*, 105 :231–251, 1999. 14, 19, 21, 33, 35, 58
- [56] Ehsan Moallem, Lorenzo Cremaschi, and Daniel E. Fisher. New Correlations for the Air-Side Heat Transfer Coefficient of Microchannel Heat Exchangers Under Quasi-Steady State Frosting Operating Conditions. In *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2012. 12
- [57] Ehsan Moallem, Lorenzo Cremaschi, Daniel E. Fisher, and Sankar Padhmanabhan. Experimental measurements of the surface coating and water retention effects on frosting performance of microchannel heat exchangers for heat pump systems. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 39 :176–188, 2012. 19, 21
- [58] Ehsan Moallem, Tommy Hong, Lorenzo Cremaschi, and Daniel E. Fisher. Developing empirical correlations for frost thickness and air face velocity degradation for microchannel heat exchangers used in heat pump applications under frosting conditions. *HVAC&R Research*, 19(7) :779–787, 2013.
- [59] Ehsan Moallem, Tommy Hong, Lorenzo Cremaschi, and Daniel E. Fisher. Effects of surface coating and water retention on frost formation in microchannel evaporators (ASHRAE RP-1589). *Hvac&R Research*, 19(4) :347–362, 2013. 9, 11
- [60] Ehsan Moallem, Tommy Hong, Lorenzo Cremaschi, and Daniel E. Fisher. Experimental investigation of adverse effect of frost formation on microchannel evaporators, part 1 : Effect of fin geometry and environmental effects. *International Journal of Refrigeration*, 36(6) :1762–1775, 2013. 12
- [61] Byeongchul Na and Ralph L. Webb. Mass transfer on and within a frost layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 :899–911, 2004. 30
- [62] Byeongchul Na and Ralph L. Webb. New model for frost growth rate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 :925–936, 2004. 30, 58, 59, 136, 137, 138, 139, 146

- [63] Valter S. Nascimento, Felipe R. Loyola, and Christian J.L. Hermes. A study of frost build-up on parallel plate channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60 :328–336, 2015. 16, 19, 21, 53, 54
- [64] Silvia Negrelli and Christian J.L. Hermes. A semi-empirical correlation for the thermal conductivity of frost. *International Journal of Refrigeration*, 58 :243 – 252, 2015. ix, xvii, xix, xx, 15, 59, 60, 61, 63, 124, 136, 137, 138, 139, 140, 146, 150
- [65] Silvia Negrelli, Valter S. Nascimento Jr., and Christian J.L. Hermes. A study of the effective thermal conductivity of frost formed on parallel plate channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 78 :301 – 308, 2016. xx, 60, 146
- [66] D.A. Nield and A. Bejan. Convection in porous media. *Springer*, 2006. 60
- [67] D.L O’Neal and D.R. Tree. A review of frost formation on simple geometries. *ASHRAE Transactions*, 91 :278–290, 1984. 19, 21, 29
- [68] R. Ostin and S. Andersson. Frost growth parameters in forced air stream. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34, 1991. 16, 19, 21, 25, 53, 55, 57
- [69] S.K. Padhmanabhan, D.E. Fisher, L. Cremaschi, and E. Moallem. Modeling non-uniform frost growth on a fin-and-tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 34(8) :2018–2030, 2011. 19, 21
- [70] D. Pitman and D. Zuckerman. Effective thermal conductivity of snow at  $-88^{\circ}\text{c}$ ,  $-27^{\circ}\text{c}$ , and  $-5^{\circ}\text{c}$ . *Appl. Phys.*, pages 2698–2699, 1967. 57, 58, 59
- [71] Kaiyang Qu, Satoru Komori, and Yi Jiang. Local variation of frost layer thickness and morphology. *International Journal of Thermal Sciences*, 45(2) :116–123, 2006. 16, 18, 19
- [72] S.P. Raju and S.A. Sherif. Frost formation and heat transfer on circular cylinders in cross-flow. *International Journal of Refrigeration*, 16, 1993. 37
- [73] A.G. Sahin. Effective thermal conductivity of frost during the crystal growth period. *Int. J. Heat Mass Transf.* 43, pages 539–553, 2000. 58, 112
- [74] S.M. Sami and T. Duong. Mass and heat transfer during frost growth. *ASHRAE Transactions*, pages 158–165, 1989. 29, 57, 58, 112
- [75] C.T Sanders. *Frost formation : the influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers*. PhD thesis, Dept. of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, TU Delft, The Netherlands, 1974. 60
- [76] H. W. Schneider. Equation of the growth rate of frost forming on cooled surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21(8) :1019–1024, 1978. xxii, 16, 17, 30, 31, 34, 40, 41, 42, 62, 129, 130, 131, 132, 145, 146
- [77] N. Seki, K. Matsuo, S. Uemura, and others. An analysis of incipient frost formation. *Wärme-und Stoffübertragung*, 19(1) :9–18, 1985. 16

- [78] Liang-Liang Shao, Liang fa, and Chun-Lu Zhang. Comparison of heat pump performance using fin-and-tube and microchannel heat exchangers under frost conditions. *Applied Energy*, 87(4) :1187–1197, 2010. 12, 13
- [79] Jongmin Shin, Alexei V. Tikhonov, and Cheolhwan Kim. Experimental Study on Frost Structure on Surfaces With Different Hydrophilicity : Density and Thermal Conductivity. *Journal of Heat Transfer*, 125(1) :84, 2003. 21, 23
- [80] Y.-X Tao, R.w. Besant, and Y. Mao. Characteristics of frost growth on a flat plate during the early growth period. *ASHRAE Transactions*, 99 :746–743, 1993. 19, 57
- [81] Y.X. Tao, R.W. Besant, and K.S. Rezkallah. A mathematical model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 1993. 112
- [82] S.A. Tassou and C.J. Marquand. Effects of evaporator frosting and defrosting on performance of air-to-water heat pumps. *Applied Energy*, 28 :19 – 33, 1987. 8
- [83] I. Tokura, H. Saito, and K. Kishinami. Prediction of growth rate and density of frost layer developing under forced convection. *Wärme-und Stoffübertragung*, 22 (5) :285–290, 1988. 18
- [84] P. P. Votsis, S. A. Tassou, D. R. Wilson, and C. J. Marquand. Investigation of the performance of a heat pump under frosting and defrosting conditions. *Heat Recovery Systems and CHP*, 9(5) :399–406, 1989. 8
- [85] Dingyuan Wang, Tangfei Tao, Guanghua Xu, Ailing Luo, and Shaoying Kang. Experimental study on frosting suppression for a finned-tube evaporator using ultrasonic vibration. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36 :1–11, 2012. 10
- [86] W. Wang, Q.C. Guo, W.P. Lu, Y.C. Feng, and W. Na. A generalized simple model for predicting frost growth on cold flat plate. *International Journal of Refrigeration*, 35(2) :475–486, 2012. 23, 30, 32, 39, 41, 53
- [87] Jianghong Wu, Guang Ouyang, Puxiu Hou, and Haobin Xiao. Experimental investigation of frost formation on a parallel flow evaporator. *Applied Energy*, 88 (5) :1549–1556, 2011. 19
- [88] Xiaomin Wu, Wantian Dai, Wangfa Xu, and Liming Tang. Mesoscale investigation of frost formation on a cold surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31 (8) :1043–1048, 2007. xix, xxi, xxii, 16, 19, 114, 115, 120, 125, 126
- [89] Y. Xia, Y. Zhong, P.S. Hrnjak, and A.M. Jacobi. Frost, defrost, and refrost and its impact on the air-side thermal-hydraulic performance of louvered-fin, flat-tube heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*, 29(7) :1066–1079, 2006. 19
- [90] Bo Xu, Qing Han, Jiangping Chen, Feng Li, Nianjie Wang, Dong Li, and Xiaoyong Pan. Experimental investigation of frost and defrost performance of microchannel heat exchangers for heat pump systems. *Applied Energy*, 103 :180–188, 2013. xix, 12, 19

- [91] K. Yamashita, K. Hamada, S. Ise, and H. Ohkubo. Study of frost properties in a low temperature environment. *Proceedings of the International Congress of Refrigeration*, pages 393–420, 2007. 16, 24, 47
- [92] Dong-Keun Yang and Kwan-Soo Lee. Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate. *International Journal of Refrigeration*, 27(1) :89–96, 2004. 18, 19, 35, 36, 42, 43, 44, 51, 56, 58, 133, 135, 136, 137, 138, 146
- [93] Dong-Keun Yang, Kwan-Soo Lee, and Simon Song. Fin spacing optimization of a fin-tube heat exchanger under frosting conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(15-16) :2619–2625, 2006. 13
- [94] Liu Yaomin, Liu Zhongliang, and Lingyan Huang. Experimental and theoretical investigations of the fractal characteristics of frost crystals during frost formation process. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36(7) :217–223, 2012. 16, 19
- [95] J.D. Yonko and G.F. Sepsy. An investigation of the thermal conductivity of frost while forming on a flat horizontal plate. *ASHRAE Trans.* 2043, pages I1.1–I1.9, 1967. 23, 41, 57, 59, 61, 136
- [96] Shinhyuk Yoon, Gaku Hayase, and Keumnam Cho. Measurements of Frost Thickness and Frost Mass on a Flat Plate under Heat Pump Condition. *Heat Transfer Engineering*, 31(12) :965–972, 2010. 14, 18, 19, 21
- [97] Rin Yun, Yongchan Kim, and Man-ki Min. Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate. *International Journal of Refrigeration*, 25(3) :362–371, 2002. 30
- [98] Wang Zhiyi, Wang Xinmin, and Dong Zhiming. Defrost improvement by heat pump refrigerant charge compensating. *Applied Energy*, 85(11) :1050–1059, 2008. 10
- [99] Derya Burcu Özkan and Eralp Özil. Experimental study on the effect of frost parameters on domestic refrigerator finned tube evaporator coils. *Applied Thermal Engineering*, 26(17-18) :2490–2493, 2006. 13





## FOLIO ADMINISTRATIF

### THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : LÉONI

DATE de SOUTENANCE : 17 février 2017

Prénoms : Aurélia

TITRE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET MODÉLISATION DE LA FORMATION ET DU DÉVELOPPEMENT DU GIVRE SUR UNE PLAQUE PLANE REFROIDIE

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2017LYSEI014

École doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA)

Spécialité : Thermique Énergétique

#### RESUMÉ :

Dans un objectif de réduction des consommations énergétiques et des impacts environnementaux, la pompe à chaleur (PAC) s'est imposée comme une alternative aux systèmes à combustion fossile pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire dans les secteurs résidentiel et tertiaire.

Les industriels ne cessent de chercher à accroître la performance énergétique des pompes à chaleur. Toutefois, un phénomène encore mal maîtrisé limite les progrès : le givrage. En effet, dans certaines conditions de température et d'humidité de l'air extérieur, du givre peut se former sur la surface de l'évaporateur de la PAC, provoquant ainsi une chute de performance. En France, près de 98% des PAC du marché utilisent l'air extérieur comme source de chaleur et sont donc exposées à ce phénomène. Malgré des logiques de dégivrage de plus en plus sophistiquées mises en œuvre par les industriels, le fonctionnement cyclique givrage /dégivrage réduit fortement les performances des PAC.

Pour optimiser les méthodes de dégivrage, il est nécessaire de comprendre en amont, les mécanismes d'apparition et de croissance du givre. Ce travail de thèse propose ainsi d'étudier la formation et le développement du givre sur une plaque plane refroidie.

Une étude approfondie de la bibliographie a permis d'établir des bases de données regroupant des points expérimentaux de l'épaisseur et de la masse volumique du givre. Des modèles et corrélations de formation du givre disponibles dans la littérature ont été reproduits et appliqués à ces bases de données afin d'évaluer la capacité de prédiction de chacun de ces modèles. Les plus performants ont ainsi pu être identifiés.

En parallèle, un banc d'essais a été conçu pour observer la formation et la croissance du givre sur une plaque plane. L'étude de sensibilité menée sur la température de l'air, la température de la plaque froide, la vitesse de l'air et l'humidité relative a permis d'évaluer l'impact de ces paramètres sur la formation du givre, et plus particulièrement sur trois de ses propriétés : l'épaisseur, la masse volumique et la conductivité thermique. L'humidité relative et la température de la plaque froide ont été identifiées comme les paramètres prépondérants.

Un des résultats importants de ce travail a été de mettre en évidence le rôle de la structure du givre sur ses propriétés (masse volumique et conductivité). Les points expérimentaux obtenus sur le banc d'essais ont été comparés aux résultats issus des modèles de la littérature. Les méthodes de prédiction identifiées comme satisfaisantes dans la partie bibliographique de cette thèse ont fourni des résultats similaires d'un point de vue statistique.

Des perspectives de travail ont également été proposées.

MOTS-CLÉS : givrage, épaisseur, masse volumique, conductivité, cristaux, pompe à chaleur, air humide

Laboratoire (s) de recherche : Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL UMR 5008)

Directeurs de thèse: Philippe Haberschill, Rémi Revellin

Composition du jury : Jean-Pierre Bedecarrats, Laurence Fournaison, Yves Bertin, François Durier, Michèle Mondot, Philippe Haberschill, Rémi Revellin