

UQAC

Université du Québec
à Chicoutimi

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

SAMUEL GAUDREULT

CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT AINSI QUE DE LA CAPACITÉ

GIVRANTE D'UNE SOUFFLERIE RÉFRIGÉRÉE À BASSE VITESSE

AOÛT 2019

RÉSUMÉ

Une soufflerie réfrigérée givrante est un outil essentiel afin d'évaluer la performance d'appareils aérodynamiques tels que les avions. En effet, l'accumulation de glace sur leurs composantes critiques peut s'avérer extrêmement dangereuse et l'envergure de tels appareils rend difficile d'effectuer des essais à grandeur réelle.

Ce mémoire porte sur les caractéristiques thermodynamiques et aérodynamiques de l'écoulement d'air de la soufflerie réfrigérée à basse vitesse du laboratoire international des matériaux antigivres (LIMA). De plus, la qualité et les caractéristiques du nuage givrant produit à l'aide de rampes de gicleurs ont été évalué. En particulier, l'uniformité spatiale et stabilité temporelle des caractéristiques incluant la distribution de vitesse, le pourcentage de turbulence, l'angle de l'écoulement et la distribution de température sont étudiés. De plus, le nuage givrant a été caractérisé en fonction de son uniformité spatiale, de son contenu en eau liquide (LWC) et du diamètre des gouttelettes (MVD). Le tout en accord avec la pratique recommandée ARP5905 de la Society of Automotive Engineers (SAE).

Plusieurs instruments de mesure ont été utilisés afin d'accomplir ces tâches incluant un tube de Pitot pour la vitesse, des thermocouples pour la température, un anémomètre à fil chaud pour la turbulence et une sonde à cinq trous pour l'angle de l'écoulement. Ces appareils ont été utilisés conjointement à un système de déplacement automatisé de la section d'essai. Trois méthodes ont été utilisées pour déterminer la teneur en eau liquide (LWC) du nuage givrant à des fins de comparaison soit : la méthode du profil aérodynamique, la méthode du cylindre rotatif et une sonde de type King. La grosseur des gouttelettes (MVD) a été déterminée à l'aide de la méthode de l'huile de silicone en accord avec la pratique AIR4906.

L'état des performances de la soufflerie a été analysé à l'aide des données recueillies lors des essais de caractérisation. Ceux-ci ont démontré une variation notable de l'uniformité de la vitesse, de la turbulence et de l'uniformité de l'angle de l'écoulement. La température, quant à elle, respecte les normes tant en ce qui a trait à la stabilité temporelle qu'à l'uniformité spatiale. La stabilité temporelle étant la variation de la température en un point donné sur une période de temps préalablement définie. L'uniformité spatiale représente pour sa part l'uniformité de la stabilité temporelle sur une section prédéfinie.

Les essais de givrage ont permis d'uniformiser le nuage givrant en plaçant les rampes adéquatement. La sonde de type King a été testée, et ce, à différentes températures et teneurs en eau. Ces résultats ont ensuite été comparés aux méthodes conventionnellement utilisées par le LIMA. Malgré un écart maximum de l'ordre de 15% entre les essais à 20°C, à 5°C et à -5°C, ceux à 20°C semblent correspondre aux valeurs de teneur en eau des méthodes du cylindre rotatif et du profil aérodynamique, et ce, avec un écart inférieur à 10%.

Enfin, des recommandations ont été formulées. Ces dernières permettront au LIMA d'améliorer la qualité de l'écoulement de la soufflerie réfrigérée givrante ainsi que l'obtention d'un nuage givrant optimal.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	i
Table des matières	v
Table des figures	vii
Liste des tableaux	xiii
Nomenclature	xv
Remerciements	xix
Introduction	1
1 Revue de la littérature	5
1.1 Principes fondamentaux de la dynamique des fluides	5
1.2 Les souffleries	21
1.3 Paramètres aérodynamiques, thermiques et instrumentation	31
1.4 La glace atmosphérique	37
1.5 Simulation en soufflerie	45
1.6 Paramètres de givrage en laboratoire et instrumentation	48
1.7 Caractérisation d'une soufflerie	62
2 Méthodes et instrumentation	65
2.1 Soufflerie réfrigérée givrante à basse vitesse du LIMA	66
2.2 Caractérisation de l'écoulement d'air	77
2.3 Mesure du système de givrage	89
3 Essais de caractérisation aérodynamique et thermodynamique	99
3.1 Planification des essais	99
3.2 Analyse des résultats	102
4 Essais de givrage	123
4.1 Planification des essais	123
4.2 Analyse et résultats	125

Conclusion et recommandations	139
A Protocoles expérimentaux	145
A.1 Mise en service	145
A.2 Utilisation de la soufflerie et des instruments de mesure	148
B Résultats de caractérisation	157
B.1 Vitesse	157
B.2 Turbulence	163
B.3 Angle de l'écoulement	169
B.4 Température	173
C Équations et exemples de calcul	187
C.1 Vitesse dans la section d'essai	187
C.2 Calcul de la teneur en eau liquide (LWC)	188
D Fiches d'essai	193
D.1 Calcul LWC (LWC-200)	194
D.2 Calcul LWC (cylindre rotatif)	196
D.3 Calcul LWC (profil aérodynamique)	198
D.4 Uniformité du nuage givrant (méthode de la grille)	200
Bibliographie	203

TABLE DES FIGURES

1.1 Régime de turbulence d'un écoulement fluide et nombre de Reynolds (Elert, 2017)	13
1.2 Injection d'un colorant dans un écoulement laminaire ainsi que d'un écoulement turbulent (Çengel et Cimbala, 2010, p.339)	15
1.3 Représentation de couches limites (Libii, 2011, p.245)	17
1.4 Illustration de la trainée d'objets et orientation différentes (Çengel et Cimbala, 2010, p.590)	19
1.5 Illustration de la force de portance (lift) et trainée (drag) (Çengel et Cimbala, 2010, p.588)	20
1.6 Exemple d'une soufflerie en circuit ouvert (Barlow et al., 1999, p.26)	23
1.7 Exemple d'une soufflerie en circuit fermé (Barlow et al., 1999, p.26)	24
1.8 Différentes composantes d'une soufflerie en circuit fermé et retour unique (Barlow et al., 1999, p.69)	27
1.9 Schéma d'un convergent (Nozzle)(Barlow et al., 1999, p.96)	28
1.10 Ventilateur et zone de redressement (Barlow et al., 1999, p.102)	29
1.11 Exemple de grilles de différentes géométries (Barlow et al., 1999, p.90)	30
1.12 Démonstration de l'effet Venturi (HappyApple, 2006)	33
1.13 Fonctionnement d'un tube de Pitot (Çengel et Cimbala, 2010, p.382)	34
1.14 Exemple d'anémomètre à fil chaud (Jørgensen, 2002, p.8)	35
1.15 Coupe de la section d'une sonde à 5-trous (gauche) et appareil d'étalonnage (droite) (Hall, 2015)	37
1.16 Exemple de givre blanc, type de glace atmosphérique (Littmann, 2016)	39
1.17 Diagramme de phase de l'eau (Lobban et al., 1998)	40
1.18 Exemple de distribution verticale de température menant à une pluie verglaçante (Fikke et al., 2008, p.5)	41
1.19 Type de glace atmosphérique en fonction des conditions météorologiques (température et vitesse) (Kuroiwa, 1965)	43
1.20 Effet sur le coefficient de portance C_L (gauche) et effet sur le coefficient de trainée C_D (droite) (Gent et al., 2000)	46
1.21 Rampe de gicleur du NASA Glenn Research Center (Center, 2012) (a) et rampe de gicleur du Laboratoire International des Matériaux Antigivre de l'UQAC (b)	46
1.22 Lame de givrage (SAE International, 2015)	51

1.23	Schéma illustrant les différentes variables lors du calcul du coefficient de captation (équation 1.31 (Fortin, 2010)	52
1.24	Efficacité de captation de la lame d'un cylindre rotatif utilisant l'équation 1.33 (SAE International, 2015, p.47)	54
1.25	Grillage typique pour l'uniformité spatiale d'un nuage givrant (SAE International, 2015, p.26)	58
1.26	Exemple d'un graphique en contour représentant l'uniformité spatiale d'un nuage givrant (SAE International, 2015, p.36)	59
1.27	Dimension d'une lame et sa poignée (SAE International, 2013, p.39)	61
2.1	Soufflerie réfrigérée du LIMA	66
2.2	Plan de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA	67
2.3	Ventilateur de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA	68
2.4	Interface de l'utilisateur du contrôle de la soufflerie réfrigérée du LIMA	69
2.5	Boîtier de contrôle de la température de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA	70
2.6	Rampe de gicleurs de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA	71
2.7	Panneau de commande des rampes de gicleurs de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA	72
2.8	Gicleur atomiseur d'air (Villeneuve et Perron, 2012)	73
2.9	Distribution d'eau d'un gicleur dans la section d'essai de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA (Villeneuve et Perron, 2012)	74
2.10	Enveloppe théorique du diamètre volumétrique médian (Villeneuve et Perron, 2012)	75
2.11	Enveloppe théorique de la teneur en eau liquide (Villeneuve et Perron, 2012)	76
2.12	Interface de l'utilisateur du programme LabView servant à enregistrer les données brutes ainsi que le contrôle du bras sur ses axes	78
2.13	Zone de la section considérée lors de l'analyse des résultats	79
2.14	Montage du bras de positionnement	80
2.15	Anémomètre à fil chaud TSI 1201-20 (Villeneuve et Perron, 2012)	82
2.16	Anémomètre à température constante (CTA) IFA-300 (Villeneuve et Perron, 2012)	82
2.17	Thermocouples CF-000-T-4-60-1 d'OMEGA (Villeneuve et Perron, 2012)	87
2.18	Sonde à cinq trous produite sur mesure	88
2.19	Démonstration graphique du fonctionnement de la sonde à cinq trous (Vectroflow GmbH, 2017a)	89
2.20	Système de coordonnées et position des plans de références standards (Vectroflow GmbH, 2017b)	90
2.21	Montage utilisé lors de la mesure du LWC à l'aide d'un cylindre rotatif	91
2.22	Montage utilisé lors de la mesure du LWC à l'aide du profil aérodynamique	92
2.23	Coefficient d'efficacité de captation du profil utilisé en fonction de la vitesse et du MVD	93

2.24	Tête de la sonde LWC-200 (gauche) ainsi que son unité de traitement de signal (droite) (Droplet Measurement Technologies, 2013)	94
2.25	Fil chaud (Droplet Measurement Technologies, 2013)	94
2.26	Bras utilisé lors de l'utilisation du LWC-200	95
2.27	Exemple de captation de gouttelette vu au microscope (Villeneuve et Perron, 2012)	96
2.28	Microscope et ordinateur utilisés lors de la mesure des gouttes	96
2.29	Diamètre des gouttelettes en fonction de la fréquence cumulative (Villeneuve et Perron, 2012)	97
2.30	Valeurs de MVD mesurées selon la pression d'air et le débit d'eau dans les gicleurs (Fortin et Perron, 2007)	98
3.1	Températures limites en régime permanent mesurées expérimentalement lors des essais de mise en service	103
3.2	Zone d'essai définie pour les travaux de caractérisation	104
3.3	Facteur de correction (FC) en fonction de la vitesse	105
3.4	Position des rampes de gicleurs vue de la section d'essai	106
3.5	Exemple de données aberrantes lors de l'acquisition de la température	113
3.6	Exemple d'application du critère de Chauvenet dans Excel	116
3.7	Température mesurée en fonction de la température commandée	118
3.8	Facteur de correction de la température calculée en fonction de la température commandée	119
4.1	Visualisation de la teneur en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide du cylindre rotatif le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à -18°C	127
4.2	Teneur en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide du profil aérodynamique le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à -18°C	129
4.3	Teneur en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide de l'appareil LWC-200 le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à 20°C	130
4.4	Teneur en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide de l'appareil LWC-200 le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à 5°C	132
4.5	Teneur en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide de l'appareil LWC-200 le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à -5°C	133
4.6	Teneur en eau liquide (LWC) moyenne mesurée à l'aide de l'appareil LWC-200 le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à différentes températures	135
4.7	Teneur en eau liquide (LWC) moyenne mesurée à l'aide de l'appareil LWC-200 le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai lors de deux différentes séries à 20°C	136
A.1	Interface du logiciel de contrôle de la vitesse	146
A.2	Contrôle de la température de l'écoulement d'air de la soufflerie	146
A.3	Commutateur contrôlant la ligne d'air	151

A.4	Valve d'ouverture de la ligne d'eau	152
B.1	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 5 m/s et 20°C sans gicleur	157
B.2	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 5 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	158
B.3	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 10 m/s et 20°C sans gicleur	158
B.4	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 10 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	159
B.5	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 20 m/s et 20°C sans gicleur	159
B.6	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 20 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	160
B.7	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 30 m/s et 20°C sans gicleur	160
B.8	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 30 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	161
B.9	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 40 m/s et 20°C sans gicleur	161
B.10	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 40 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	162
B.11	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 5 m/s et 20°C sans gicleur	164
B.12	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 5 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	164
B.13	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 10 m/s et 20°C sans gicleur	165
B.14	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 10 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	165
B.15	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 20 m/s et 20°C sans gicleur	166
B.16	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 20 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	166
B.17	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 30 m/s et 20°C sans gicleur	167
B.18	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 30 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	167
B.19	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 40 m/s et 20°C sans gicleur	168
B.20	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 40 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	168

B.21	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 5 m/s et 20°C sans gicleur	170
B.22	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 5 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	170
B.23	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 10 m/s et 20°C sans gicleur	170
B.24	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 10 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	170
B.25	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 20 m/s et 20°C sans gicleur	171
B.26	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 20 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	171
B.27	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 30 m/s et 20°C sans gicleur	171
B.28	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 30 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	171
B.29	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 40 m/s et 20°C sans gicleur	172
B.30	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 40 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI	172
B.31	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -5°C sans gicleur	174
B.32	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -5°C avec gicleurs à 40 PSI	174
B.33	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -10°C sans gicleur	175
B.34	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -10°C avec gicleurs à 40 PSI	175
B.35	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -15°C sans gicleur	176
B.36	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -15°C avec gicleurs à 40 PSI	176
B.37	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -20°C sans gicleur	177
B.38	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -20°C avec gicleurs à 40 PSI	177
B.39	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -5°C sans gicleur	178
B.40	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -5°C avec gicleurs à 40 PSI	178
B.41	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -10°C sans gicleur	179
B.42	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -10°C avec gicleurs à 40 PSI	179
B.43	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -15°C sans gicleur	180

B.44	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -15°C avec gicleurs à 40 PSI	180
B.45	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -20°C sans gicleur	181
B.46	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -20°C avec gicleurs à 40 PSI	181
B.47	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -5°C sans gicleur	182
B.48	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -5°C avec gicleurs à 40 PSI	182
B.49	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -10°C sans gicleur	183
B.50	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -10°C avec gicleurs à 40 PSI	183
B.51	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -15°C sans gicleur	184
B.52	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -15°C avec gicleurs à 40 PSI	184
B.53	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 30 m/s et -5°C sans gicleur	185
B.54	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 30 m/s et -5°C avec gicleurs à 40 PSI	185
B.55	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 30 m/s et -10°C sans gicleur	186
B.56	Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 30 m/s et -10°C avec gicleurs à 40 PSI	186

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Différentes valeurs du nombre de Mach et le type d'écoulement associé (Libii, 2011, p.237)	25
1.2	Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds pour la détermination de la puissance à sec d'une sonde King (SAE International, 2015)	56
2.1	Évaluation des incertitudes relatives standards des différentes sources d'erreur lors de l'utilisation de l'anémomètre à fil chaud	85
2.2	Incertitudes de l'anémomètre à fil chaud en fonction de la vitesse de l'écoulement d'air dans la soufflerie	86
2.3	Évaluation de l'incertitude des différentes conditions demandée lors de l'étalonnage de la sonde à cinq trous	88
3.1	Objectifs des performances dans la section d'essai (SAE International, 2015) .	100
3.2	Plan des essais de stabilité temporelle et uniformité spatiale des paramètres aérodynamiques et thermodynamiques	102
3.3	Stabilité temporelle de différentes valeurs de vitesse à la ligne centrale à 20°C avec et sans gicleur	107
3.4	Uniformité spatiale de différentes valeurs de vitesse à la ligne centrale à 20°C avec et sans gicleur	108
3.5	Stabilité temporelle de l'intensité de la turbulence à différentes valeurs de vitesse à la ligne centrale à 20°C avec et sans gicleur	109
3.6	Uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à différentes valeurs de vitesse à la ligne centrale à 20°C avec et sans gicleur	109
3.7	Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à différentes valeurs de vitesse à la ligne centrale à 20°C avec et sans gicleur	111
3.8	Stabilité temporelle de la température pour différentes valeurs de vitesse et de température à la ligne centrale avec et sans gicleur	114
3.9	Uniformité spatiale de la température pour différentes valeurs de vitesse et de température à la ligne centrale avec et sans gicleur	117
3.10	Correction de la température mesurée au centre de la section d'essai	118
3.11	État des performances dans la grande section d'essai de la soufflerie réfrigérée du LIMA	121
4.1	Objectifs des performances dans la section d'essai (SAE International, 2015) .	124
4.2	Plan des essais de givrage pour la grande section	125

4.3	Résultat des mesures de MVD	126
4.4	Comparaison des teneurs en eau liquide (LWC) mesurées à différentes températures avec un débit de 30 mm sur l'échelle	133
4.5	Comparaison des teneurs en eau liquide (LWC) mesurées à différentes températures avec un débit de 60 mm sur l'échelle	133
4.6	Comparaison des teneurs en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide de différents appareils et méthodes à un débit de 30 mm sur l'échelle	137
4.7	Comparaison des teneurs en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide de différents appareils et méthodes à un débit de 60 mm sur l'échelle	137
5.1	État des performances dans la grande section d'essai de la soufflerie réfrigérée du LIMA	140

NOMENCLATURE

A	Aire de section	m^2
C_D	Coefficient de trainée	•
C_L	Coefficient de portance	•
C_p	Capacité thermique à pression constante	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C_v	Capacité thermique à volume constant	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D	Diamètre	m
D_h	Diamètre hydraulique	m

F_B	Force appliquée sur le corps par unité de masse	N/kg
F_D	Force de trainée	N
F_L	Force de portance	N
F_S	Force appliquée sur le corps par unité de volume	N/m ³
Fr	Nombre de Froude	•
K_{dry}	Facteur de correction à sec	•
L	Longueur	m
L_v	Chaleur latente d'évaporation de l'eau	kJ/kg
Ma	Nombre de Mach	•
Nu	Nombre adimensionnel de Nusselt	•
P	Pression	Pa
P_K	Puissance utilisée par la sonde de type King lors d'un essai	W
P_L	Perte de charge	•
P_{dry}	Puissance utilisée par la sonde de type King à sec	W
R	Constante des gaz parfait	J · K ⁻¹ · mol ⁻¹
Re	Nombre de Reynolds	•
St	Paramètre adimensionnel de Stokes	•
T	Température	°C
T_0	Température statique	°C
T_a	Température de l'air	°C
T_e	Température absolue d'évaporation de l'eau	K
U	Développement de la vitesse en fonction de la distance de la paroi	•
U'	Intensité de la turbulence totale	%
U_{moy}	Vitesse moyenne de l'écoulement	m/s
V	Vitesse de l'écoulement libre	m/s
V_{moy}	Vitesse moyenne de l'écoulement	m/s
V_{sc}	Vitesse de l'écoulement avant le convergent	m/s
V_{ts}	Vitesse de l'écoulement dans la section d'essai	m/s
δ	Épaisseur de la couche limite	m
δ^*	Épaisseur de déplacement	m
\dot{m}	Débit massique	Kg/s
γ	Ratio des chaleurs spécifiques	•
μ	Coefficient de viscosité dynamique	Pa · s

ϕ	Paramètre d'impact	•
ρ	Densité	kg/m ³
θ	Épaisseur de la couche limite associée à la quantité de mouvement	m
θ_{inf}	Angle limite inférieur du point de stagnation	°
θ_{sup}	Angle limite supérieur du point de stagnation	°
\vec{V}	Vecteur de vitesse	m/s
\vec{S}	Variation du tenseur de contrainte	•
\vec{g}	Vecteur de l'accélération gravitationnelle	m/s ²
c_w	Chaleur spécifique de l'eau	kJ · kg ⁻¹ K ⁻¹
d_K	Diamètre du fil chaud de la sonde King	m
d_c	Diamètre du cylindre	m
d_d	Diamètre des gouttelettes d'eau	m
e_K	Efficacité/coefficient de captation de la sonde de type King	•
e_b	Efficacité/coefficient de captation du profil aérodynamique	•
e_c	Efficacité/coefficient de captation du cylindre	•
f	facteur de friction de Darcy	•
h_L	Perte de pression	•
k	Conductivité thermique	W · m ⁻¹ · K ⁻¹
l_K	Longueur du fil chaud de la sonde King	m
m	Masse	kg
r_{cf}	Rayon final du cylindre rotatif	m
r_{ci}	Rayon initial du cylindre rotatif	m
u'_{moy}	Intensité de la turbulence moyenne dans la direction de l'axe x	%
v'_{moy}	Intensité de la turbulence moyenne dans la direction de l'axe y	%
w'_{moy}	Intensité de la turbulence moyenne dans la direction de l'axe z	%
x	Distance en x	m
z	Distance en z	m
LWC	Teneur en eau liquide	g/m ³
MVD	Diamètre volumétrique médian	μm
t	Temps	s

REMERCIEMENTS

L'écriture d'un mémoire et l'accomplissement d'une maîtrise peuvent être un travail considérable ainsi qu'un grand accomplissement. Dans mon cas, ce projet n'aurait pas pu être accompli sans la confiance de mon directeur de recherche Christophe Volat. Je voudrais aussi remercier ma codirectrice Caroline Laforte pour ses conseils et son support au cours de ce périple. Sans elle et Marc-Mario Tremblay, je n'aurais probablement pas eu la chance de travailler au LIMA. Je voudrais aussi remercier tous les gens du LIMA qui m'ont aidés de près ou de loin incluant Éric Villeneuve pour la supervision de mon travail pratique et conseils ainsi que Carol Mercier, Martin Truchon et Daniel Mercier pour leur assistance technique, sans lequel, le projet aurait été impossible. Enfin, un grand merci à toute ma famille et mes amis, en particulier ma fiancée Myriam Blais, pour le support moral le long de mes études, qui est impossible à surestimer.

INTRODUCTION

Dans le domaine de l'aéronautique, le givrage atmosphérique est un problème récurrent, principalement en ce qui concerne la sécurité et les performances d'appareils aérodynamiques tels que les avions et les hélicoptères (Gent et al., 2000). En effet, l'accumulation de glace sur des composantes critiques de ceux-ci peut s'avérer extrêmement dangereuse. L'envergure de tels appareils rend difficile et onéreux d'effectuer des essais à grandeur réelle afin de valider leur efficacité et leur sécurité sous des conditions givrantes. Cela démontre la nécessité de pouvoir procéder à des essais à échelle réduite en environnement contrôlé (Barlow et al., 1999). Ainsi, il est important de posséder l'équipement et la technologie pour réaliser ce travail. Pour ce faire, des souffleries réfrigérées pouvant simuler du givrage atmosphérique sont souvent utilisées. Celle-ci permettent d'optimiser le rendement dans le domaine de l'énergie (Homola et al., 2010) et pour assurer la sécurité des passagers des vols commerciaux (Newton, 1978). C'est pourquoi les souffleries sont des outils de première importance dans l'industrie.

Le laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA) possède une soufflerie réfrigérée givrante utilisée pour la recherche qui, dans le cadre d'un projet de réfection, s'est

vue largement modifiée lors de l'été 2016. La soufflante ainsi que le système de réfrigération ont été améliorés et par ce fait, les caractéristiques importantes de l'écoulement et du système de givrage ont été modifiées. Il est donc nécessaire de procéder à une caractérisation afin d'obtenir les performances de la nouvelle soufflerie. Dans cette étude, les caractéristiques thermodynamiques et aérodynamiques de l'écoulement d'air d'une soufflerie réfrigérée à basse vitesse seront examinées, ainsi que la qualité et la caractérisation d'un nuage givrant produit à l'aide de rampes de gicleurs. En particulier, la stabilité spatiale et temporelle des caractéristiques incluant la distribution de vitesse, le pourcentage de turbulence, l'angle de l'écoulement et la distribution de température sont étudiés. De plus, le nuage givrant sera caractérisé en fonction de son uniformité spatiale, de son contenu en eau liquide (LWC) et du diamètre des gouttelettes (MVD). Le tout devra respecter la pratique recommandée ARP5905 de la Society of Automotive Engineers (SAE) (SAE International, 2015) et ultimement, rencontrer les performances limites demandées.

Afin de mener à bien ce projet, ces données sont recueillies suivant la pratique recommandée ARP5905 (SAE International, 2015). Celles-ci incluent des mesures au point central de la section d'essai de la soufflerie en fonction du temps afin d'étudier la stabilité temporelle de l'écoulement, ainsi que sur un plan X-Y afin de mesurer l'uniformité spatiale. Ces travaux sont basés sur les rapports antérieurs produits par Fortin, Perron et Villeneuve (Fortin et Perron, 2007)(Villeneuve et Perron, 2012). Ainsi, des instruments de mesure incluant thermocouples, tubes de Pitot et anémomètres à fil chaud ont été adaptés et fixés à un système de rail équipé de moteur pas à pas. À ceci, s'ajoute une étude de l'angle de l'écoulement utilisant une sonde à cinq trous tel que proposé dans les travaux de Arrington E. et Pastor-Barsi de la NASA (Arrington E. et Pastor-Barsi, 2012). L'ensemble de ces données ont été par la suite analysées et comparées aux limites et exigences définies dans le cadre de la pratique recommandée ARP5905 (SAE International, 2015).

Quant à la caractérisation du nuage givrant, une étude comparative entre les différentes techniques proposées dans les travaux antérieurs et la norme a été accomplie afin de justifier l'utilisation d'un appareil récemment acheté dans le but d'accélérer le processus. Normalement, un profil aérodynamique et un cylindre rotatif sont utilisés. Ce processus peut s'avérer fastidieux et difficile à répéter considérant la multitude de variables impliquées. L'utilisation d'une sonde de type King peut alors rendre la caractérisation plus facile tout en permettant une plus grande précision. Pour ce faire, il faut continuer une étude préliminaire antérieurement produite par le LIMA par Villeneuve (2015) afin de confirmer la fiabilité de l'appareil comparativement aux méthodes anciennement utilisées considérant la température de l'air lors de la caractérisation. En effet, l'utilisation d'un écoulement à température ambiante permet une calibration du nuage plus précise en éliminant les accumulations de glace sur l'appareil de mesure. Selon la théorie présentée de la conception de ce type de sonde, la température ne devrait pas avoir d'effet sur le LWC résultant (King et al., 1985). La grosseur des gouttelettes quant à elle, exprimée selon le diamètre des gouttes d'eau au volume médian (MVD) est mesurée à l'aide de la technique à l'huile de silicone en accord avec la pratique AIR4906 (SAE International, 2013). Un abaque ayant été produit dans le passé faisant la relation entre la pression d'air et le débit d'eau dans les gicleurs avec le MVD est vérifié considérant les modifications apportées au système lors des travaux de l'été 2016.

Les résultats de ce projet de maîtrise devraient mener à l'assurance de la qualité de l'écoulement suite à la rénovation du système de réfrigération et de ventilation de la soufflerie réfrigérée givrante à basse vitesse du laboratoire sur les matériaux antigivre de l'UQAC. Cette étude permettra ainsi d'augmenter la fiabilité et crédibilité des projets futurs et permettra à ceux-ci d'être menés avec la précision requise dans l'industrie.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Les industries de l'aéronautique et de l'automobile ont pris de l'envergure dans le dernier siècle. Avec les avancées dans le domaine est apparue une demande pour une précision de plus en plus élevée afin d'obtenir une gestion de risques plus efficace. Pour subvenir à cette demande croissante et aux exigences de plus en plus complexes de l'industrie, des méthodes avancées d'expérimentations gardent les souffleries d'actualité. Une soufflerie est un appareil servant à reproduire un écoulement fluide afin de simuler l'effet de celui-ci sur un corps. On peut notamment y faire des mesures de contraintes mécaniques, de pressions, de vitesses, de température, de turbulences et de la visualisation de l'écoulement, etc. Il existe une multitude de types de soufflerie. De plus, chacune d'entre elles est unique à sa façon et est construite selon des objectifs d'utilisation précis.

1.1 PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA DYNAMIQUE DES FLUIDES

Pour comprendre les phénomènes relatifs aux souffleries, il est important de déterminer les principes fondamentaux qui régissent les écoulements à l'intérieur de celles-ci. Les

principes les plus importants sont : le principe de conservation de la masse qui stipule que dans un système fermé, la masse doit rester constante, la seconde loi de Newton sur les forces et le mouvement et la loi de la conservation de l'énergie qui exprime que l'énergie ne se perd jamais, mais change plutôt de forme. De plus, il faut tenir compte mathématiquement des propriétés caractérisant les fluides et leurs variations (Barlow et al., 1999). Les équations qui découlent de ces principes sont définies, permettant ainsi d'établir les relations entre la densité, la vitesse, la pression, les contraintes, l'énergie interne et la viscosité. Celles-ci sont dépendantes d'un vecteur position et du temps, vecteur qui doit être détaillé selon un plan de référence choisi. Ce plan de référence doit être défini avec simplicité (Barlow et al., 1999) et déterminé selon une approche Lagrangienne ou Eulérienne.

La description Lagrangienne du mouvement d'un fluide, proposée par le mathématicien italien Joseph Louis Lagrange, suit dans le temps la position des particules composant le fluide. Les lois de Newton sont utilisées afin de prédire le déplacement de ces particules et déterminer la façon dont la quantité de mouvement et l'énergie cinétique sont transférées. Il est beaucoup plus difficile d'utiliser cette approche considérant qu'au niveau microscopique, un fluide contient des milliards de particules et que l'interaction entre celles-ci est continue (Çengel et Cimbala, 2010). La description Eulérienne nommée selon le mathématicien suisse Leonhard Euler, quant à elle, détermine un domaine d'écoulement ou volume de contrôle dans lequel l'écoulement entre et sort. Au lieu de concentrer l'analyse sur les particules en mouvement, des variables de champ sont définies en fonction de la position et du temps. L'évolution temporelle, pouvant être considérée comme évolution locale, s'exprime à l'aide d'une dérivée partielle. Les lois de conservations prennent alors la forme d'un bilan du volume de contrôle (Codron, 2013).

1.1.1 PRINCIPALES ÉQUATIONS

Les principes les plus pertinents dans le cas d'une étude aérodynamique sont, tels que mentionnés à la section précédente, la conservation de la masse, la seconde et la troisième loi de Newton. Les principales équations découlant de ceux-ci, qui régissent l'écoulement d'un fluide newtonien, peuvent être retrouvées dans l'ouvrage «Low speed Wind Tunnel Testing» de Barlow et al. (Barlow et al., 1999) ainsi que «Fluid Mecanics : Fundamentals and Application» de Çengel et Cimbala (Çengel et Cimbala, 2010). L'équation de la conservation de la masse peut être écrite à l'aide de l'équation aux dérivées partielles suivantes :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1.1)$$

Dans l'équation 1.1, ρ est la masse volumique, t le temps et \vec{V} le vecteur de vitesse du fluide. Cette équation permet de dériver les relations reliées à la vitesse et au débit de l'écoulement. Par la suite, il est possible d'utiliser la seconde loi de Newton, équation supplémentaire d'un système permettant la résolution de l'écoulement, appliqué à une masse élémentaire. Celle-ci est présentée sous la forme suivante :

$$\rho \left(\frac{D\vec{V}}{Dt} \right) = \rho \vec{F}_B + \vec{F}_S \quad (1.2)$$

Avec F_B , la force appliquée sur le corps par unité de masse, et F_S , la force appliquée sur la surface par unité de volume. Le membre de gauche de l'équation 1.3, représentant l'accélération matérielle, peut être modifié considérant la description de la dérivée d'une

perspective Lagrangienne, soit la dérivée totale ou matérielle, indiquée par une D majuscule. La deuxième version (équation 1.4) est d'ailleurs intéressante du fait qu'elle permet d'obtenir la célèbre équation de Bernoulli qui sera vue en détail dans la section sur les paramètres adimensionnels (section 1.1.2) (Barlow et al., 1999) (Çengel et Cimbala, 2010).

$$\rho \left(\frac{D\vec{V}}{Dt} \right) = \rho \left(\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} \right) \quad (1.3)$$

où :

$$\rho \left(\frac{D\vec{V}}{Dt} \right) = \rho \left(\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \frac{V^2}{2} - \vec{V} \times (\vec{V} \times \vec{\nabla}) \right) \quad (1.4)$$

Dans la plupart des cas, la force sur le corps est considérée comme étant l'accélération gravitationnelle g . Pour ce qui est de la force sur la surface, elle est normalement écrite en termes d'état de contrainte qui est lié à l'état de déformation. La relation entre les deux peut être calculée sous deux formes, soit selon la loi de Hooke pour les corps élastiques, soit selon la loi sur la friction de Stokes pour les fluides newtoniens. Dans le cas présent, l'application de la loi de Stokes qui est une généralisation tridimensionnelle des hypothèses de Newton sur les écoulements bidimensionnel et parallèle (Barlow et al., 1999) est la plus pertinente. De cette application, il est possible de retrouver l'équation de Navier-Stokes pour des écoulements visqueux et compressibles qui se définit comme suit :

$$\rho \left(\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} \right) = \rho\vec{g} - \vec{\nabla} \left(P + \frac{2}{3}\mu\vec{\nabla} \cdot \vec{V} \right) + 2\vec{\nabla} \cdot (\mu\vec{S}) \quad (1.5)$$

Où μ est le coefficient de viscosité et \vec{S} est la variation du tenseur de contrainte et P la pression. L'équation 1.5 est l'une des plus utilisées dans le domaine de la dynamique

des fluides. Celle-ci peut être développée afin de représenter de façon précise la seconde loi de Newton sur des écoulements d'air et d'eau pour une grande gamme de pression et de température (Barlow et al., 1999).

Il est possible d'utiliser la première loi de la thermodynamique afin de trouver les différentes caractéristiques de l'écoulement. La forme de l'équation de la conservation de l'énergie suivante (équation 1.6) présente un cas où il peut y avoir un transfert de chaleur par conduction, une transformation d'énergie mécanique à thermique réversible et irréversible ainsi que les contributions gravitationnelles.

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left(C_v T + \frac{V^2}{2} \right) + \rho \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \left(C_v T + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \vec{g} \cdot \vec{\nabla} - \vec{\nabla} \cdot P \vec{V} + \vec{\nabla} \cdot \left[2\mu \vec{\nabla} \left(\frac{V^2}{2} \right) + \mu (\vec{\nabla}_x \vec{V})_x \vec{V} - \frac{2}{3} \mu (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) \vec{V} \right] + \vec{\nabla} \cdot k \vec{\nabla} T \quad (1.6)$$

Dans cette équation, C_v est la capacité thermique à volume constant, g est l'accélération gravitationnelle, T est la température et k est la conductivité thermique. Les équations précédentes définissent sept variables scalaires à déterminer. Pour obtenir un système d'équations complet, il est nécessaire de trouver deux autres relations ainsi que les conditions limites. Considérant qu'aux conditions associées à un écoulement à basse vitesse, l'air constituant celui-ci peut être considéré comme un gaz parfait, il est possible d'utiliser l'équation des gaz parfaits qui se définit comme suit :

$$P = \rho RT \quad (1.7)$$

Où R est la constante des gaz parfaits spécifique à l'air. La dernière relation nécessaire (équation 1.8) spécifie la variation de la viscosité en fonction de la température. Cette équation, est une expression de la loi de Sutherland appliquée à l'air dans laquelle μ est la viscosité, T_R est la température en degré Kelvin. Pour la température de référence $T_0 = 273,15\text{K}$, $\mu_0 = 1,716 \times 10^{-5} \text{kg/m} \cdot \text{s}$. Cette relation est souvent approximée par une loi de puissance dans les travaux pratiques (Barlow et al., 1999).

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T_R}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + 110,4}{T_R + 110,4} \quad (1.8)$$

Ainsi, en y ajoutant les conditions frontière uniques à chaque problème aux équations précédentes, il est possible de décrire l'évolution temporelle et spatiale d'un écoulement d'air. Dans le cas présent, il est à considérer que l'écoulement sera composé d'air à basse vitesse soit un maximum de 0,3 fois la vitesse du son ($Ma < 0,3$) permettant de simplifier certaines relations. Ainsi, il est possible de considérer la capacité calorifique ainsi que la conduction thermique comme constantes étant donné que l'air à ces conditions peut être considéré comme un gaz thermiquement parfait (Barlow et al., 1999). La densité de l'air, quant à elle, peut varier considérant que sa masse molaire est affectée par la présence de vapeur d'eau. Ce détail considéré, l'hypothèse d'un écoulement incompressible est attribuable à basse vitesse, ce qui simplifie encore une fois les équations.

1.1.2 PARAMÈTRES ADIMENSIONNELS

Il est possible d'explorer la similitude entre les écoulements en utilisant les équations précédentes dans leur forme adimensionnelle. Celles-ci deviennent des équations dépendant

de ratios indépendants des valeurs d'un problème en particulier. La loi de l'homogénéité dimensionnelle garantit que tous les termes additifs de l'équation ont les mêmes dimensions et donc, dans le cas où des variables et constantes ayant les mêmes dimensions sont divisées entre elles, l'équation devient adimensionnelle. Un exemple d'équation étant à dimension homogène est l'équation de Bernoulli (équation 1.9). Celle-ci provient de la version adimensionnelle de la deuxième loi de Newton appliquée aux écoulements fluides incompressibles et irrotationnels (équation 1.4). Cette équation (équation 1.9) est l'une des plus importantes dans le calcul de paramètre relié à une soufflerie considérant qu'elle est utilisée pour comparer la pression à la vitesse, ce qui est utile entre autres dans la formule de Pitot.

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gz = C \quad (1.9)$$

Où P est la pression, ρ est la masse volumique, V est la vitesse, g est l'accélération gravitationnelle et z est la hauteur. Celle-ci est cependant une approximation et ne peut pas être utilisée partout dans un écoulement. Elle est applicable seulement dans les parties pouvant être considérées comme non visqueuses, soit loin des couches limites et des sillages (Çengel et Cimbala, 2010). Lorsque des équations sont modifiées pour être sans dimension, de nouveaux paramètres, nommés paramètres adimensionnels, apparaissent (Çengel et Cimbala, 2010). Cette méthode est utilisée afin de trouver des paramètres adimensionnels utiles à la conception et l'analyse d'expérimentations, d'obtenir des lois d'échelle pour l'élaboration de modèles réduits ainsi que pour prédire les relations entre certains paramètres (Çengel et Cimbala, 2010). Les paramètres importants dans le cas de la dynamique des fluides sont le Nombre de Froude

(Fr), le nombre de Reynolds (Re) et le nombre de Mach (Ma). Ceux-ci sont présentés comme suit :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1.10)$$

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (1.11)$$

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (1.12)$$

Où V est la vitesse, g est l'accélération gravitationnelle, L est la longueur, ρ est la densité, μ est la viscosité dynamique, ν est la viscosité cinématique et c est la vitesse du son dans l'écoulement. Le nombre de Froude (équation 1.10) présente le ratio de la force d'inertie sur les forces gravitationnelles, considérant la pesanteur. Ce nombre est important lors de la considération des forces gravitationnelles sur l'écoulement. Le nombre de Reynolds (équation 1.11), quant à lui, décrit le ratio des forces d'inertie sur les forces visqueuses et prend donc en compte la viscosité. Ce rapport permet donc de décrire la turbulence considérant qu'il compare l'inertie du fluide à sa viscosité. Le nombre de Mach (équation 1.12), défini par la vitesse de l'écoulement sur la vitesse du son dans le milieu, tient compte de la compressibilité et est utile dans le calcul de la vitesse et du type d'écoulement. En effet, les caractéristiques d'un écoulement subsonique ne seront pas les mêmes qu'un écoulement hypersonique. Il est à noter que le nombre de Reynolds est le paramètre adimensionnel le plus utilisé dans le domaine, servant à décrire le régime de l'écoulement. La figure 1.1 présente le nombre de Reynolds

en fonction du régime variant de laminaire ($Re < 1000$) à turbulent ($Re > 10000$). Celle-ci démontre en parallèle une représentation schématique des deux différents régimes. Afin de pouvoir travailler avec un modèle réduit, il doit y avoir similitude complète, soit géométrique, cinématique et dynamique. Considérant que la similitude géométrique, soit la proportionnalité géométrique ; et cinématique, soit la proportionnalité des forces de la masse et du temps ; sont considérées, ces paramètres adimensionnels permettent de factoriser la similitude dynamique (Çengel et Cimbala, 2010) (Mighri, 2006).

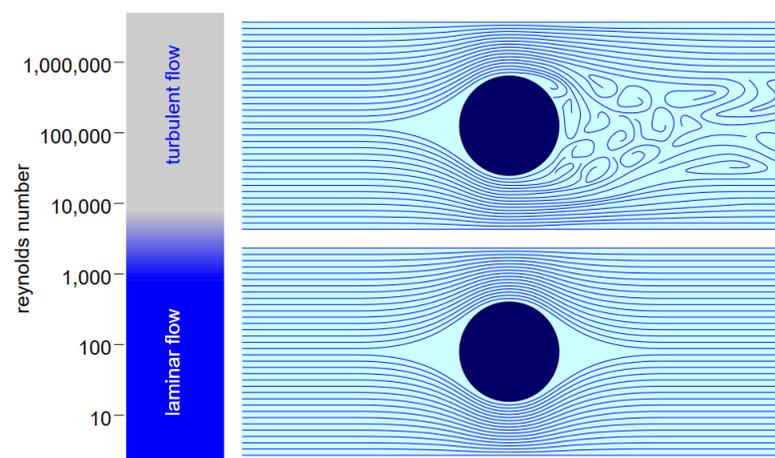


Figure 1.1: Régime de turbulence d'un écoulement fluide et nombre de Reynolds (Elert, 2017)

1.1.3 LES ÉCOULEMENTS INTERNES

Dans le cas particulier d'une soufflerie, il est important d'examiner la théorie concernant les écoulements internes. En effet, l'écoulement à l'intérieur d'une soufflerie est généré par un ventilateur dans des conduites généralement rectangulaires à sections variables. Il est important de considérer la friction entre le fluide et les parois ainsi que l'effet de la viscosité du fluide.

La valeur de la vitesse moyenne donnée dans une section peut être déterminée à l'aide du principe de conservation de la masse. L'équation 1.13 est importante dans la conception des dimensions des différentes sections d'une soufflerie. Dans celle-ci, ρ est la densité du fluide, \dot{m} est le débit massique et A est l'aire de la section.

$$\dot{m} = \rho V_{moy} A \quad (1.13)$$

L'équation 1.13 peut être utilisée pour calculer le changement de vitesse dans les différentes sections d'une soufflerie considérant que le débit massique restera toujours constant dans toutes les sections, peu importe leurs dimensions.

Alors que certains écoulements sont lisses et ordonnés, d'autres peuvent être chaotiques. Un écoulement lisse est appelé laminaire alors que celui-ci qui apparaîtra plus aléatoire est turbulent (Çengel et Cimbala, 2010). Il est possible d'observer, en appliquant une teinte colorée ou de la fumée dans un écoulement fluide, que la ligne produite semble linéaire (laminaire) à basse vitesse puis devient éventuellement chaotique (turbulent). Il est nécessaire de caractériser l'état de l'écoulement ainsi que son intensité de turbulence afin d'utiliser celui-ci à des fins pratiques. Cette expérience (figure 1.2) a d'abord été produite par l'ingénieur britannique Osborne Reynolds qui a vu donner son nom au paramètre adimensionnel utilisé pour déterminer le régime d'un écoulement fluide (section 1.1.2). La transition du régime laminaire à turbulent dépend de la géométrie, la rugosité de la surface, la vitesse de l'écoulement, la température de surface ainsi que du type de fluide. Après étude, Reynolds démontra que celle-ci dépend principalement du ratio des forces d'inertie sur les forces visqueuses, d'où le nombre de Reynolds mentionnée plus haut (équation 1.11) (Çengel et Cimbala, 2010).

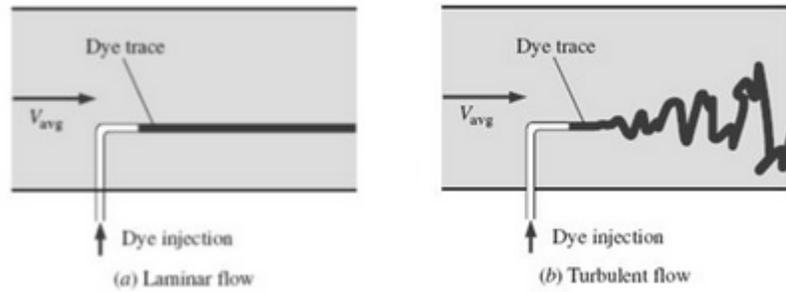


Figure 1.2: Injection d'un colorant dans un écoulement laminaire ainsi que d'un écoulement turbulent (Çengel et Cimbala, 2010, p.339)

Lorsque le nombre de Reynolds est élevé, les forces d'inertie, qui sont proportionnelles à la densité du fluide, sont beaucoup plus grandes que les forces visqueuses. Ainsi, celles-ci ne peuvent empêcher les fluctuations aléatoire et rapide dans le fluide. À l'inverse, lorsque le nombre Reynolds est bas, la force visqueuse inhibe ces fluctuations. Le nombre de Reynolds auquel l'écoulement devient turbulent est nommé le nombre de Reynolds critique. Celui-ci dépend de la géométrie et des conditions de l'écoulement. Il est aussi important de noter que le nombre de Reynolds est basé sur le diamètre hydraulique dans le cas d'une conduite non circulaire. Celui-ci est exprimé à l'équation 1.14 pour une conduite rectangulaire de section a par b , (Çengel et Cimbala, 2010).

$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (1.14)$$

Deux quantités intéressantes dans l'étude d'écoulement interne sont la perte de charge et la perte de pression. La perte de pression (équation 1.15) est proportionnelle à la viscosité

du fluide, le terme dépendant de la vitesse est la pression dynamique et f est le facteur de friction de Darcy. La perte de pression est notée à l'équation 1.15.

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho U_{moy}^2}{2} \quad (1.15)$$

La perte de charge représente la hauteur additionnelle à laquelle le fluide doit être élevé par une pompe afin de compenser pour les forces de friction (Çengel et Cimbala, 2010). La perte de charge est utilisée dans la conception de soufflerie afin de dimensionner le moteur ainsi que le ventilateur associé. Elle est aussi utilisée afin de déterminer la taille des sections, leurs effets ainsi que les effets des éléments présents dans la soufflerie. Il est aussi intéressant de noter qu'une fraction de la friction provient théoriquement de l'interaction entre les particules du fluide causant une hausse en température, mais celle-ci est négligeable (Çengel et Cimbala, 2010). La perte de charge est généralement calculée à l'aide de l'équation 1.16 :

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} \quad (1.16)$$

Où f est le facteur de friction de Darcy, L est la longueur, D est le diamètre, ρ est la densité du fluide et U_{moy} est la vitesse moyenne de l'écoulement (Çengel et Cimbala, 2010). La friction sur la paroi crée une couche limite à la surface qui peut être quantifiée grâce à la condition de non-glissement. Cette condition stipule que la composante du profil de vitesse sera égale à zéro sur la paroi, créant une mince couche où la vitesse varie dans la direction transversale de la section. Cette couche, définie par la lettre grecque delta (δ) est représentée à la figure 1.3. L'épaisseur de la couche limite est celle associée à la partie variable du profil

de vitesse dans un écoulement fluide. L'écoulement dans cette zone est considéré comme visqueux. Celle-ci doit être calculée afin de tenir compte de la variation de la vitesse causée par l'effet de la viscosité près de la paroi.

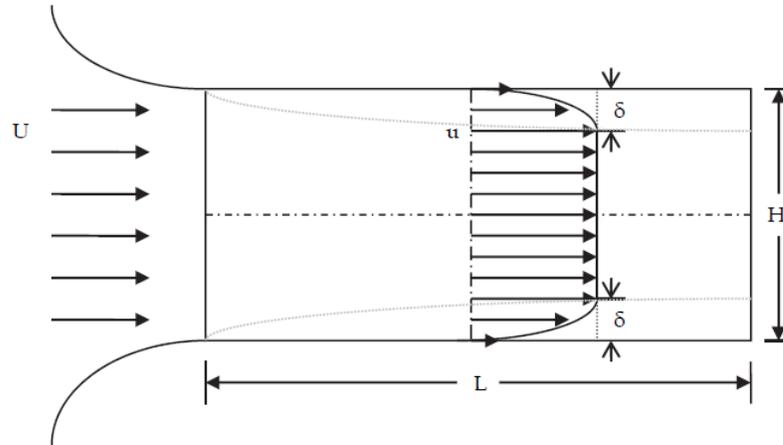


Figure 1.3: Représentation de couches limites (Libii, 2011, p.245)

L'épaisseur de cette couche est approximée à l'aide de la résolution des équations de Navier-Stokes (équation 1.5) et des conditions frontière appropriées variant d'un cas à l'autre. Des approximations ont déjà été produites pour les cas simples, incluant le cas d'une plaque plane et lisse positionnée parallèle à l'écoulement. Ce cas, dont le calcul est présenté aux équations 1.17 à 1.19, est pertinent dans les travaux présents puisqu'il peut être utilisé pour représenter l'écoulement dans la section d'essai de la soufflerie. Une expression exacte est présentée pour un écoulement laminaire à l'équation 1.17). Pour un écoulement turbulent, deux approximations différentes de l'équation exacte, soit l'équation 1.18 et l'équation 1.19 sont utilisées. Elles se servent respectivement une règle de puissance ainsi qu'une règle de puissance accompagnée de données empiriques lors de la résolution de l'équation. Ces deux

expressions sont, contrairement à l'expression en régime laminaire, non exactes, considérant l'incertitude affiliée au régime d'écoulement turbulent (Çengel et Cimbala, 2010).

$$\frac{\delta}{x} = \frac{4,91}{\sqrt{Re_x}} \quad (1.17)$$

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,16}{Re_x^{1/7}} \quad (1.18)$$

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,38}{Re_x^{1/5}} \quad (1.19)$$

1.1.4 LES ÉCOULEMENTS EXTERNES

Un écoulement externe est défini par un écoulement autour d'un solide. Ce type d'écoulement est commun et peut causer plusieurs phénomènes tels que la trainée et la portance. Ces derniers permettent de développer une multitude de machines afin d'exploiter des écoulements fluides tels que le vent. Dans les cas d'analyse externe, le point de référence est normalement fixé sur l'objet à étudier et la vitesse de l'écoulement libre est notée V .

Il arrive dans la vie quotidienne de remarquer une certaine résistance lors de déplacement dans un fluide, que ce soit l'eau ou l'air. Cette force, qui est dans la direction de l'écoulement fluide, est créée lors du mouvement et est appelée trainée. Celle-ci peut être facilement déterminée à l'aide d'un système de ressort mesurant le déplacement d'un objet soumis à un écoulement fluide. La trainée est généralement un effet indésirable comparable à la

friction et pose souvent problème, allant de la consommation d'essence pour certains moyens de locomotion jusqu'à de l'instabilité dans n'importe quelle structure soumise au vent ou à des courants marins. La trainée dépend essentiellement de l'orientation et de la géométrie d'un objet. Une plaque plane, par exemple, aura une très grande force de trainée lorsque sa surface est normale à l'écoulement. En effet, il est possible de remarquer une hausse de pression du côté de la face soumise au fluide alors que l'autre face subit une diminution de pression causant un vide. Cette même plaque orientée tangentiellement à l'écoulement provoquera une trainée presque nulle considérant que la surface de la plaque soumise à l'écoulement est réduite. Cet effet est illustré à la figure 1.4.

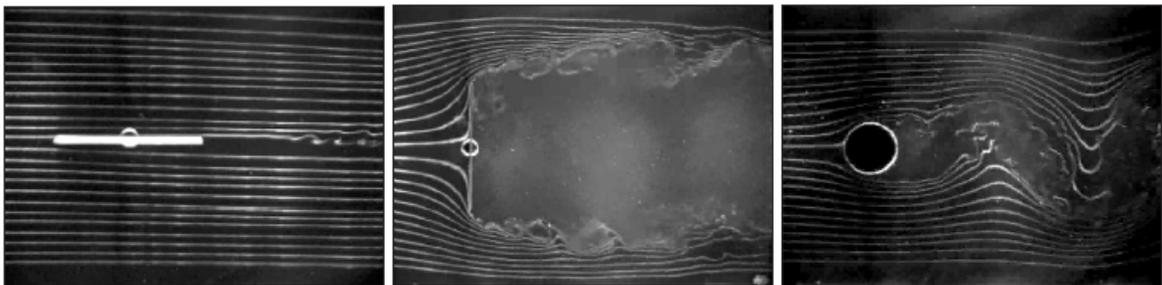


Figure 1.4: Illustration de la trainée d'objets et orientation différentes (Çengel et Cimbala, 2010, p.590)

Donc, la trainée est due à la somme des composantes de la pression et des forces de cisaillement aux parois dans la direction de l'écoulement. De la même façon, les composantes normales de la pression et des forces de cisaillement aux parois produisent ce qui est appelé la portance (Çengel et Cimbala, 2010). En effet, la somme de ces forces normales à la surface poussera l'objet dans la direction en question. Ce phénomène est utilisé, entre autres, par les appareils volants afin de vaincre les forces gravitationnelles et ainsi soulever des tonnes de métal dans les airs. Présentée à la figure 1.5 la schématisation de ces deux forces sur un profil aérodynamique ainsi que les zones de haute et basse pression représentées respectivement par les + et les -.

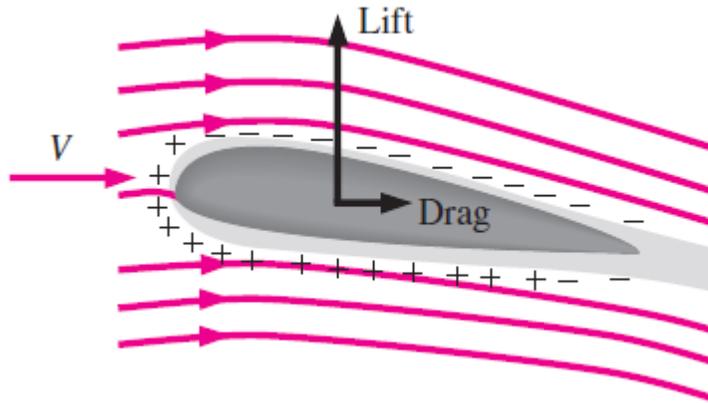


Figure 1.5: Illustration de la force de portance (lift) et trainée (drag) (Çengel et Cimbala, 2010, p.588)

Ces phénomènes sont exprimés à l'aide des coefficients C_D et C_L suivants :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1.20)$$

et

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1.21)$$

Où ρ est la densité, V est la vitesse de l'écoulement libre, A est l'aire de la surface frontale pour la trainée et la surface en plan pour la portance, F_D et F_L sont les forces de trainée et de portance respectivement (Çengel et Cimbala, 2010). Ces coefficients de formes généralisées sont déterminés expérimentalement. Il est ensuite possible de calculer les forces associées à l'aide des équations 1.20 et 1.21.

1.2 LES SOUFLERIES

La plupart des souffleries produites jusqu'à ce jour l'ont été à des fins d'études aéronautiques, autant pour des vitesses plus basses que pour les appareils supersoniques (Barlow et al., 1999). Une soufflerie peut reproduire des écoulements fluides allant de lents à rapide, laminaire à turbulent et également dépendant de la température. Entre autres, certaines d'entre elles ont pour objectif de reproduire un nombre de Reynolds plus élevé. Cependant, comme il est difficile pour des modèles réduits d'atteindre la turbulence désirée, quelques astuces peuvent être utilisées. L'utilisation d'une soufflerie pressurisée est sans doute la plus vieille méthode. D'ailleurs, les premières expérimentations sur le nombre de Reynolds ont été produites dans de telles installations (Barlow et al., 1999). Il est aussi possible de modifier le fluide utilisé en ajoutant par exemple du Fréon 12 comme, le Transonic Dynamic Tunnel appartenant à la NASA, ou bien l'utilisation d'une soufflerie cryogénique utilisant de l'azote comme fluide avec de l'azote liquide injecté durant les essais. Ces infrastructures sont utilisées pour l'expérimentation de la zone de vitesse transsonique ou d'étude à basse température (Barlow et al., 1999). Les souffleries à nombre de Reynolds élevé sont utilisées entre autres dans le développement d'avions de ligne et d'avions militaires. En effet, comme tous les phénomènes ne sont pas compris parfaitement par la communauté, particulièrement les phénomènes 3D, cette méthode expérimentale permet l'économie de temps et d'argent pour une multitude de compagnies à travers le monde (Reckzeh et Hansen, 2006).

Il existe aussi des souffleries verticales. Celles-ci sont pratiquement identiques aux modèles horizontaux, mais construites sur le plan vertical, pouvant ainsi simuler les effets gravitationnels ainsi que les chutes libres. Une soufflerie de ce genre existe au complexe Langley de la NASA. Une des variantes de ce type se dit « Spin Tunnel ». Ceux-ci sont essentiellement des souffleries verticales inversées utilisées dans l'étude de descente chaotique

lors d'écrasement d'appareil comme les avions et les hélicoptères. Il est difficile de classifier les différents types de souffleries considérant qu'une simple variation de sa composante permet l'étude de phénomènes uniques. Par exemple, les souffleries à stabilité avec une section courbe servant à étudier la stabilité en virage ou lorsqu'il est question de souffleries spécialement conçues pour l'étude de moteur d'avion, tel que les installations de l'U.S. Air Force au Tennessee. Plusieurs de ces souffleries sont utilisées pour l'étude de visualisation de l'écoulement à l'aide de fumée. Certains ont de larges sections d'essai permettant d'entrer une automobile, certains sont remplis d'eau et permettent l'étude de sous-marin ou d'hydroliennes, d'autres sont géantes et permettent l'analyse des vents, des bâtiments et des couches limites terrestres à des fins de recherche sur le climat. Des souffleries réfrigérées, semblables à l'Icing Research Tunnel situé au Lewis Research Center, consistent en une simple soufflerie basse vitesse à retour unique, c'est-à-dire un seul circuit fermé, mais avec une épaisse isolation thermique ainsi qu'un système de réfrigération très performant permettant de maintenir des températures allant jusqu'à -40°C (Barlow et al., 1999).

Les souffleries sont donc des outils très utiles dans l'étude de multiples facteurs environnementaux. Elles peuvent être utilisées pour étudier les éoliennes, le vol des oiseaux, la dispersion d'insecte, l'effet aérodynamique d'antenne, de capteurs solaires, de bateaux, d'avions ou bâtiments en tout genre. Il est même possible d'utiliser ces appareils pour l'analyse aérodynamique d'un être humain dans le cadre d'un sport ou d'une compétition (Barlow et al., 1999).

1.2.1 CLASSIFICATION DES SOUFFLERIES

De manière générale, il existe quatre critères importants définissant le type de souffleries (Libii, 2011). Le premier critère consiste en la méthode de circulation de l'air utilisée,

soit circuit ouvert et circuit fermé. De plus, une soufflerie peut utiliser deux types de sections d'essai, soit section ouverte et section fermée (Barlow et al., 1999). Une soufflerie en boucle ouverte (figure 1.6) consiste en une ligne droite incluant l'entrée (a), une zone convergente (b), la section d'essai (c), un diffuseur (d), le ventilateur (e) et enfin la sortie (f). Il est possible d'avoir une section d'essai avec ou sans parois. La soufflerie en circuit fermé (figure 1.7), quant à elle, récupère l'écoulement en le faisant circuler continuellement. La plupart des appareils de ce genre ont un retour unique, mais il est possible d'utiliser un retour annulaire ou double. Celle-ci n'aura presque aucun échange avec l'extérieur, mais peut aussi être conçue avec une section d'essai avec et sans parois, dépendamment des besoins établis par le concepteur.

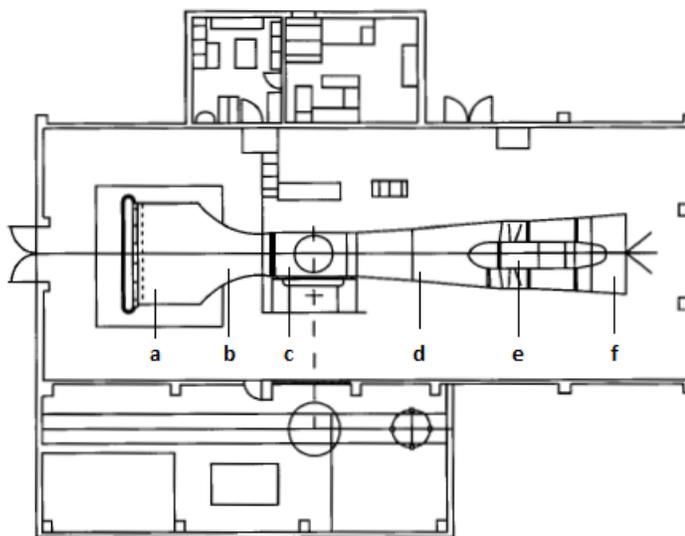


Figure 1.6: Exemple d'une soufflerie en circuit ouvert (Barlow et al., 1999, p.26)

L'avantage de choisir la soufflerie en circuit ouvert réside essentiellement dans son coût de construction qui est moindre ainsi que sa capacité à se purger, permettant ainsi l'utilisation de combustible et de fumée ou toute autre particule permettant la visualisation de l'écoulement. Cependant, il peut être difficile d'obtenir un écoulement de bonne qualité dépendamment de la taille de la pièce dans laquelle la soufflerie est située. Pour ce faire, il peut être nécessaire de filtrer l'écoulement. De plus, ce type de soufflerie requiert plus d'énergie pour obtenir des

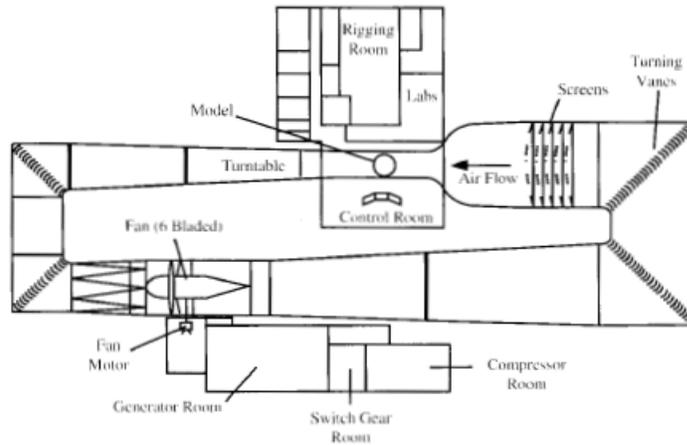


Figure 1.7: Exemple d'une soufflerie en circuit fermé (Barlow et al., 1999, p.26)

conditions données comparativement à un circuit fermé, en plus d'être généralement plus bruyantes, limitant ainsi le temps d'opération. Elles peuvent également causer des problèmes environnementaux tout en requérant des infrastructures supplémentaires. D'un autre côté, ces souffleries sont parfaites pour les milieux éducatifs dus à leur faible coût. Le contrôle de la température est aussi impossible dans de telles installations considérant que l'air utilisé est celui de la pièce.

La soufflerie en circuit fermé, quant à elle, permet une meilleure qualité de l'écoulement considérant que le fluide reste isolé de l'extérieur. En effet, le fluide peut ainsi rester indépendant des conditions externes. De plus, moins d'énergie est requise pour son utilisation, ce qui peut être bénéfique lors d'utilisation fréquente. Ce type de souffleries produit également moins de bruit considérant son isolation. Cependant, elles sont plus coûteuses et moins pratiques pour les essais de visualisation considérant le besoin de vannes de purge (Barlow et al., 1999).

Le deuxième critère représente la vitesse maximale possible permettant de caractériser l'écoulement comme subsonique ou hypersonique. La vitesse d'un fluide dans ce cas se

quantifie par le ratio de sa vitesse et de celle du son dans le même milieu, nommé nombre de Mach en l'honneur du physicien Ernst Mach (Libii, 2011). Le tableau 1.1 présente les différents nombres de Mach et le nom de l'écoulement associé.

Tableau 1.1: Différentes valeurs du nombre de Mach et le type d'écoulement associé (Libii, 2011, p.237)

Nombre de Mach	Type d'écoulement
$Ma < 1$	Subsonique
$Ma = 1$ ou $Ma \approx 1$	Transsonique
$1 < Ma < 3$	Supersonique
$3 < Ma < 5$	Très supersonique
$Ma > 5$	Hypersonique
$Ma \gg 5$	Très hypersonique

Le troisième critère pour la classification est l'utilité de la soufflerie, c'est-à-dire pour la recherche ou pour l'éducation. Une soufflerie utilisée pour la recherche sera généralement plus équipée et plus performante qu'une soufflerie à but éducationnel.

Le quatrième critère, quant à lui, est l'état de l'écoulement, qui sera soit laminaire ou turbulent. Dépendamment des besoins du concepteur, l'un ou l'autre peut être demandé (Libii, 2011).

1.2.2 COMPOSANTES D'UNE SOUFFLERIE

Lors de la conception d'une soufflerie, l'objectif est généralement d'obtenir un écoulement le plus parallèle et stable possible avec un profil de vitesse uniforme ainsi qu'une faible turbulence. De plus, plusieurs considérations doivent être prises afin d'obtenir un nombre de Reynolds dans l'ordre de grandeur désiré.

La composition générale d'une soufflerie à retour unique est présentée à la figure 1.8. Celle-ci inclut une section d'essai (a). Cette section est donc celle où l'état de l'écoulement est le plus important. Celle-ci est suivie d'un diffuseur (b), généralement trois à quatre fois plus long que la section d'essai, ayant un ratio d'aire typiquement entre deux et trois. Les valeurs inférieures sont toujours privilégiées afin de permettre un meilleur passage. Le diffuseur est suivi du premier coin (c), incluant les vannes pour le virage, puis d'une section droite soit constante ou accompagnée d'un second diffuseur (d). Ensuite vient un filet ou une grille empêchant tout objet de se rendre au ventilateur (e) puis le deuxième coin incluant encore une fois des vannes pour le virage (f). Le premier et le deuxième virage sont généralement similaires ou identiques. La prochaine section est une transition d'une géométrie rectangulaire à circulaire (g) suivie du ventilateur (h) puis redevient rectangulaire dans un deuxième diffuseur (i). Ce second diffuseur est conçu selon les mêmes spécifications que le premier, incluant cependant la transition de la géométrie circulaire à la géométrie rectangulaire. Par la suite, l'écoulement passe par un troisième virage incluant des vannes (j), une section qui est généralement constante (k), l'échangeur de chaleur (l) puis le quatrième coin avec les vannes de virage (m). La dernière partie avant la section d'essai inclut typiquement un diffuseur avec un très fort angle d'environ 45° (n) et un ratio d'aire de deux à quatre suivi d'une courte section de repos (o) après laquelle sont placées les pièces de régulation telles qu'un filet ou une grille (p). Le tout se termine par la section de contraction accélérant l'écoulement pour la section d'essai (q) (Barlow et al., 1999).

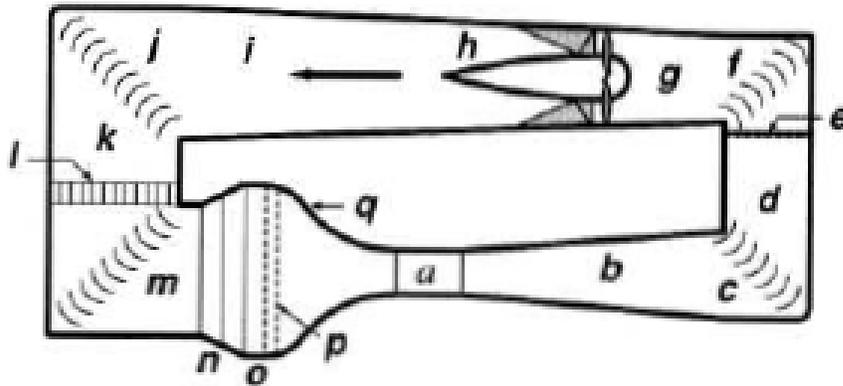


Figure 1.8: Différentes composantes d'une soufflerie en circuit fermé et retour unique (Barlow et al., 1999, p.69)

La section d'essai et autres sections à aire transversale fixe

La section d'essai (a), illustrée à la figure 1.8 en a, est une des parties critiques de la soufflerie et malgré la possibilité de l'avoir de toutes les formes possibles, aucune d'entre elles n'est remarquablement avantageuse par rapport aux autres. Il est simplement important de se souvenir que la couche limite augmente avec la distance parcourue par l'écoulement. Dépendamment de la grosseur de la section, il peut être nécessaire de prendre des précautions telles qu'un léger angle afin de garder la pression statique constante. Ceci peut avoir un effet de trainée sur les profilés utilisés (Barlow et al., 1999).

Les diffuseurs

Les diffuseurs, illustrés en b, d, i et n à la figure 1.8, sont principalement rectangulaires et séparés par la section du ventilateur. Il est recommandé de respecter certains ratios et de calculer d'avance la perte d'énergie puisqu'elle est beaucoup plus importante dans cette zone que dans les zones constantes. Les diffuseurs vont souvent être équipés de trappes d'accès

près du moteur pour permettre l'entretien ou l'ajustement de celui-ci. Il est aussi recommandé, dans le cas d'une soufflerie dans laquelle il y a du givrage, d'y inclure des drains pour retirer le surplus d'eau accumulée dans le système (Barlow et al., 1999).

Le convergent

Le convergent ou zone de contraction, illustré en q à la figure 1.8, sert essentiellement à augmenter la vitesse de l'écoulement et se situe juste avant la section d'essai. Le changement d'aire produira une augmentation de la vitesse de l'écoulement afin de respecter le principe de conservation de la masse. Le facteur de vitesse peut aller jusqu'à 20, mais se situe généralement entre 6 et 10. La figure 1.9 présente un schéma de cette section où V_{sc} est la vitesse avant le convergent et V_{ts} est la vitesse dans la section d'essai (Barlow et al., 1999).

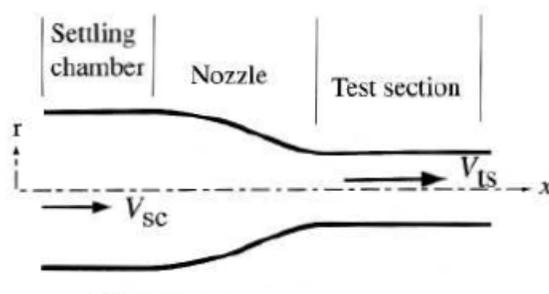


Figure 1.9: Schéma d'un convergent (Nozzle)(Barlow et al., 1999, p.96)

Les coins

Les coins (c , f , j et m), illustrés à la figure 1.8, incluent des vannes pour conserver le plus d'énergie cinétique possible et tenter de garder l'écoulement uniforme malgré le changement de direction. Ceux-ci sont des profilés très abrupts et calculés pour avoir un virage optimal dépendamment des conditions et de la section où elles sont présentes. Lors de la

conception de la soufflerie, il est aussi important de calculer les pertes d'énergie lors du virage principalement dû à la friction (Barlow et al., 1999).

Le ventilateur

Le ventilateur (h) de la figure 1.8 illustré à la figure 1.10 permet de produire l'écoulement en accélérant la masse d'air. Il est normalement suivi d'un redresseur permettant la diminution des tourbillons dans l'écoulement. Le ventilateur a pour but de combattre les pertes de pression totales créées dans l'ensemble du circuit de la soufflerie. Le ventilateur doit être situé en aval du deuxième coin considérant qu'il est le plus efficace lors d'un écoulement stable et qu'il doit être le plus loin possible de la section d'essai pour réduire le bruit (Barlow et al., 1999).

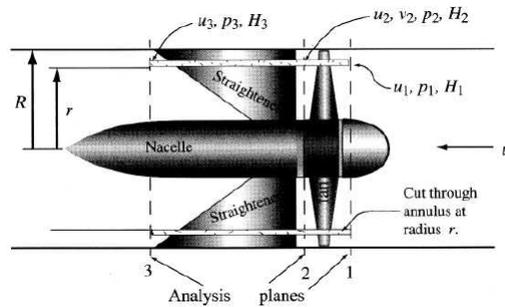


Figure 1.10: Ventilateur et zone de redressement (Barlow et al., 1999, p.102)

L'échangeur

L'échangeur de chaleur (I), de la figure 1.8, est la composante spécialement utilisée pour garder l'écoulement à une température donnée. Celui-ci est relié à un système de réfrigération assez puissant et efficace pour absorber l'énergie thermique de l'écoulement afin de le refroidir. Cette composante est critique pour les souffleries réfrigérées considérant les basses températures à atteindre. Cependant, il peut être utile pour stabiliser la température de

l'écoulement à des valeurs plus hautes en combattant le transfert de chaleur dû à la friction dans l'écoulement et les pertes de chaleur dans le ventilateur.

Pièces de régulation

Il est ensuite nécessaire de prendre en compte les pièces de régulations, e et p à la figure 1.8. Celles-ci ne sont pas encore incluses dans la soufflerie du LIMA et devront être ajoutées si le besoin apparaît. Ces pièces consistent en une multitude de filets ou de grilles redressant l'écoulement et minimisant la turbulence dans la section. Comme l'écoulement doit être le plus uniforme possible, ces composantes sont présentes juste avant la section d'essai. La figure 1.11 présente des exemples de grilles. Cet ajout guide l'écoulement et le force à devenir parallèle au coût d'une perte énergétique sous forme de friction. Le ratio de longueur par rapport à la profondeur de la cellule est généralement de 6 à 8 et la porosité d'environ 0,8. Cette méthode est très efficace pour redresser l'écoulement, mais ne permet pas d'adoucir les non-uniformités de l'écoulement. Celles-ci sont mieux corrigées par des filets. Cependant, un filet ajoute une perte énergétique plus grande à l'écoulement, en plus de multiples autres problèmes incluant l'accumulation de poussières, particules et glace dans le cas particulier d'une soufflerie réfrigérée (Barlow et al., 1999).

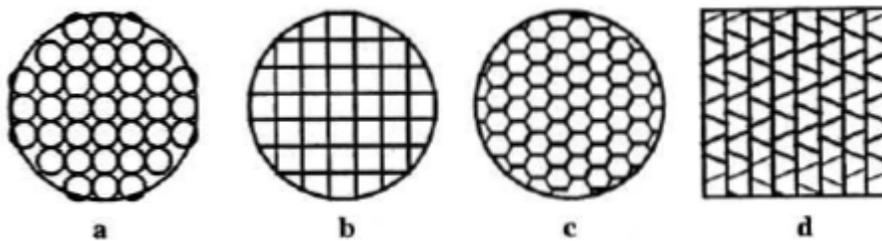


Figure 1.11: Exemple de grilles de différentes géométries (Barlow et al., 1999, p.90)

1.3 PARAMÈTRES AÉRODYNAMIQUES, THERMIQUES ET INSTRUMENTATION

Afin de caractériser l'écoulement, des méthodes de mesures doivent être utilisées. De manière générale, il est possible de déterminer les valeurs importantes en utilisant simplement la pression ainsi que la température de l'écoulement. C'est pourquoi l'utilisation de sondes de pression et de thermocouple est incontournable. Pour ce qui est de la capacité givrante de la soufflerie, d'autres options doivent être considérées.

1.3.1 TEMPÉRATURE

Deux températures sont utilisées lors de la caractérisation d'un écoulement fluide soit la température totale qui est mesurée à l'aide d'un thermocouple et la température statique qui est calculée en utilisant la température totale, la pression totale, la pression statique ainsi que le nombre de Mach (SAE International, 2015). Ces températures sont données par l'équation 1.22. La température ciblée et contrôlée doit être mesurée en amont de l'écoulement juste avant la section d'essai (SAE International, 2015).

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2C_p} \quad \text{ou} \quad \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2 \quad (1.22)$$

Où T_0 est la température totale, T est la température statique au point d'intérêt, V est la vitesse, C_p est la chaleur spécifique à pression constante, γ est le ratio des chaleurs spécifiques et Ma le nombre de Mach.

1.3.2 VITESSE

En ce qui concerne la vitesse dans la soufflerie, il est recommandé de mesurer la pression avec un tube de Pitot à la position où la vitesse est étudiée. La vitesse pertinente est essentiellement celle dans la section d'essai, car l'équation de la conservation de la masse prédit qu'un changement d'aire de section à débit constant change la vitesse. Il est cependant impossible d'utiliser cet outil durant les essais considérant qu'il doit être physiquement présent. Celui-ci a un impact direct sur l'écoulement en plus de ses possibilités de givrage rendant la mesure impossible. C'est pourquoi des sondes de pression sont également utilisées avant et après la section convergente pour mesurer les pressions statiques. La différence de pression entre la section d'essai et le convergent permet de calculer la vitesse en utilisant l'effet Venturi. L'effet Venturi, du physicien italien Giovanni Battista Venturi, est expliqué à l'aide du théorème de Bernoulli. En effet, comme il y a changement de l'aire de la section, pour un débit constant, il y a, selon la conservation de la masse, accélération de l'écoulement qui se traduit alors en hausse d'énergie cinétique. Celui-ci devant respecter la conservation de l'énergie, l'énergie associée à la déformation élastique du fluide est donc diminuée, ce qui produit une dépression lors de l'étranglement (Çengel et Cimbala, 2010). Cette dépression est mesurée à l'aide d'un trou dans la paroi, tel que démontré à la figure 1.12, et permet le calcul de la vitesse mesurée dans la section d'essai. Cette figure illustre les vitesses V_1 et V_2 ainsi que leur pression respective P_1 et P_2 et l'aire des différentes sections A_1 , A_2 et A_3 . La pression est mesurée à l'aide de la différence de hauteur h . L'équation de Bernoulli ainsi que de la conservation de la masse pour le rapport d'aire de section est utilisée (voir équation 1.9 et 1.13). Celle-ci doit cependant être ajustée à l'aide d'une courbe de calibration afin de mesurer la vitesse à la ligne centrale. Cette courbe est obtenue en positionnant un tube de Pitot au centre et en notant la relation entre les deux vitesses mesurées lors de l'accélération de l'écoulement (SAE International, 2015)).

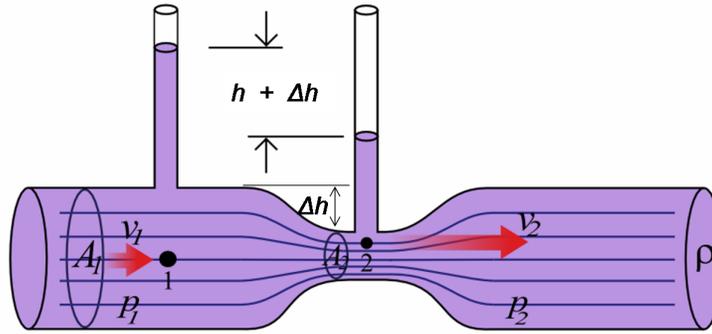


Figure 1.12: Démonstration de l'effet Venturi (HappyApple, 2006)

La méthode précédente est utilisée pour mesurer la vitesse à des fins de contrôle du système, mais ne permet pas la mesure en tout point de la section. C'est dans cette optique que le tube de Pitot est utilisé. Celui-ci permet une mesure précise de la pression statique ainsi que de la pression totale en un point donné. Par la suite, il est possible de calculer la vitesse à l'aide de l'équation de Bernoulli (voir équation 1.23) en ce point à l'aide des données mesurées (Çengel et Cimbala, 2010). Dans cette équation, p_{TS} est la pression mesurée dans la section d'essai, p_{RS} est la pression mesurée dans la section des rampes, ρ_{air} est la densité de l'air, U_{TS} est la vitesse dans la section d'essai, A_{TS} est l'aire de la section d'essai et A_{RS} est l'aire de la section des rampes.

$$U_{TS} = \sqrt{2 \left(1 - \frac{A_{TS}^2}{A_{RS}^2} \right)^{-1} \frac{p_{RS} - p_{TS}}{\rho_{air}}} \quad (1.23)$$

La figure 1.13 présente le principe de fonctionnement d'un tube de Pitot. La différence entre la pression de stagnation P_1 et la pression statique P_2 est mesurée.

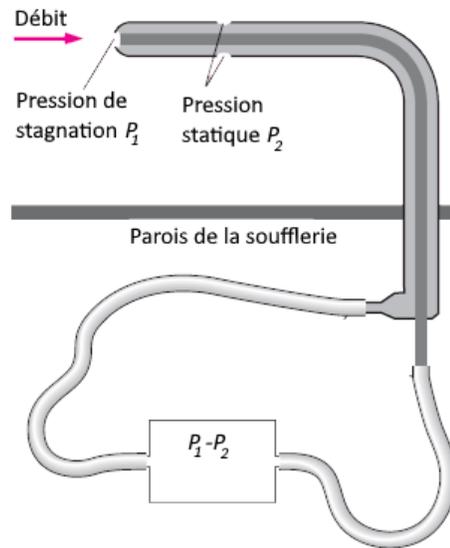


Figure 1.13: Fonctionnement d'un tube de Pitot (Çengel et Cimbala, 2010, p.382)

1.3.3 TURBULENCE

L'intensité de la turbulence est définie par le ratio de l'écart type de la variation de vitesse du vent par la vitesse moyenne du vent. Celle-ci représente la fluctuation de vitesse du vent et sert à quantifier expérimentalement la turbulence (Kimura, 2016). L'intensité de la turbulence se mesure avec un anémomètre à fil chaud (figure 1.14) afin de mesurer les variations de vitesse en un point donné. Cet appareil fonctionne selon le principe de convection de la chaleur autour d'un fil chaud produit par un écoulement en mouvement. En utilisant des fils très fins, il est possible de calculer précisément les fluctuations de vitesse de l'écoulement à des fréquences élevées. Les avantages de cette méthode de mesure résident dans la mesure de sortie. En effet, une tension analogique, c'est-à-dire qui varie de façon continue dans le temps, permet l'assurance qu'aucune valeur n'est perdue ainsi qu'une très haute résolution temporelle (Jørgensen, 2002).

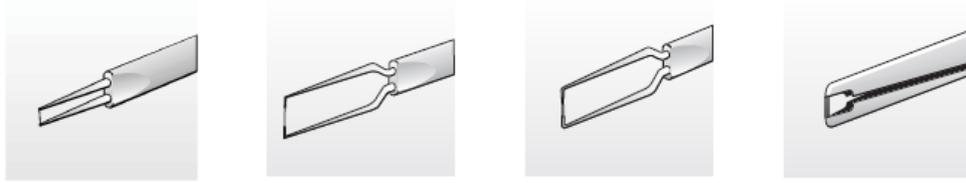


Figure 1.14: Exemple d'anémomètre à fil chaud (Jørgensen, 2002, p.8)

Une fois l'anémomètre étalonné pour donner les valeurs de la vitesse dans la soufflerie avec exactitude, il est possible de calculer la vitesse moyenne sur un échantillon de temps prédéfini lors de la planification des essais selon la formule suivante (SAE International, 2015) :

$$U_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (1.24)$$

La fluctuation de vitesse dans cet intervalle est alors calculée avec l'équation 1.25, incluant la valeur du facteur de conversion $K = 100$ pour obtenir un pourcentage (SAE International, 2015).

$$u'_{moy} = \frac{K}{U_{moy}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - U_{moy})^2} \quad (1.25)$$

Dans le cas où plusieurs fils sont utilisés pour mesurer l'intensité de la turbulence dans les autres directions cartésiennes, il est possible d'obtenir la fluctuation de vitesse totale à l'aide de l'équation suivante (SAE International, 2015) :

$$U' = \sqrt{\frac{u_{moy}^2 + v_{moy}^2 + w_{moy}^2}{3}} \quad (1.26)$$

1.3.4 ANGLE DE L'ÉCOULEMENT

L'angle de l'écoulement peut être déterminé à l'aide des pressions locales mesurées avec une sonde à cinq trous ou bien avec un anémomètre à fil chaud à trois axes (SAE International, 2015). La sonde à cinq trous possède cinq tubes regroupés dont le premier est face à l'écoulement et mesure la pression totale. Les quatre autres mesurent la pression statique à différents angles, ce qui permet le calcul de l'angle de l'écoulement. La figure 1.15 illustre une coupe de la section. Si l'angle a de chacun d'entre eux est égal à zéro, l'appareil peut essentiellement servir de tube de Pitot. Par contre, celui-ci n'étant pas égal à zéro, la pression P_1 est enregistrée différemment de la pression P_2 . Cette différence de pression est due à la pression dynamique causée par le fluide en mouvement et est une fonction de l'angle de l'écoulement tel que (Hall, 2015) :

$$P_1 + P_2 = f(a) \quad (1.27)$$

Il est possible, suite à un étalonnage réalisé à l'aide d'un appareil spécialement conçu à cet effet (figure 1.15), de déterminer cette relation (équation 1.27), et donc de fournir un

outil pour déterminer l'angle de l'écoulement en un point donné. L'appareil d'étalonnage de la figure 1.15 produit un écoulement d'air ayant une vitesse stable et connue. La sonde est ensuite placée à divers angles prédéterminés devant l'écoulement et les différences de pressions sont mesurées. Ces pressions sont ensuite mises en relation avec la vitesse et l'angle qui est déjà connu. Lors d'une coupe verticale, l'angle de l'écoulement est en relation avec l'angle d'attaque alors que lors d'une coupe horizontale, l'angle de l'écoulement est une fonction du lacet, soit, le mouvement de rotation horizontal autour de l'axe vertical (Hall, 2015).

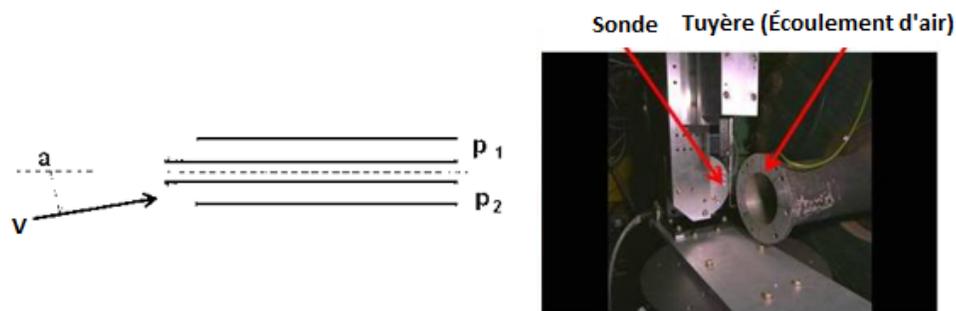


Figure 1.15: Coupe de la section d'une sonde à 5-trous (gauche) et appareil d'étalonnage (droite) (Hall, 2015)

1.4 LA GLACE ATMOSPHÉRIQUE

L'eau sous forme liquide ou solide couvre environ 71% de la surface de la Terre. De cette eau, 96.5% provient des océans et mers, 1.7% est souterraine et 1.7% provient des glaciers et de la calotte glacière. Le reste est présent dans l'air sous forme gazeuse (Gleick, 1993). Celle-ci faisant partie intégrante de ce monde, il est difficile d'échapper à l'effet de l'eau et de la glace.

La formation et l'accumulation de glace est une source majeure de problème, surtout dans les industries aérospatiales et navales. Celle-ci peut également causer des problèmes lors de son accumulation sur des structures comme les ponts, les lignes électriques, les bateaux, les plateformes pétrolières, les avions ainsi que les hélicoptères. Ces problèmes varient en gravité, allant jusqu'à causer de nombreuses pertes matérielles et humaines. C'est pourquoi la glace fait partie des matériaux les plus étudiés par les chercheurs du monde entier (Petrenko et Whitworth, 2006).

Le givre atmosphérique consiste en un phénomène météorologique qui implique des gouttelettes d'eau en surfusion et suspendue dans l'air déposées sur une surface froide quelconque. En effet, l'eau peut être à l'état liquide sous 0°C à pression atmosphérique si celle-ci ne rencontre pas de noyau de nucléation. Lors du contact, l'eau passera à l'état solide sous forme de cristaux. Ce phénomène apparaît sous la forme d'un revêtement opaque et granuleux autour des surfaces solides (figure 1.16). Le givre se produit lors d'une bruine ou d'une pluie soit dans les nuages ou au sol (Kuroiwa, 1965).

1.4.1 STRUCTURE CRISTALLINE DE LA GLACE

À pression atmosphérique, l'eau se retrouve sous forme liquide à température ambiante. Lorsque celle-ci est sous son point de congélation, soit 0°C, celle-ci gèle et forme de la glace. En l'absence de cristaux de glace ou de défaut, l'eau liquide peut rester dans cet état jusqu'à des températures allant jusqu'à -48°C (Moore et Molinero, 2011). Cependant, il est extrêmement rare d'observer le phénomène sous -20°C considérant qu'à ces températures, les nuages sont composés de particules de glace (Moore et Molinero, 2011). Quoiqu'instable, cet état relativement commun est appelé la surfusion. La moindre perturbation fera néanmoins solidifier l'eau subitement (Michel, 1978).



Figure 1.16: Exemple de givre blanc, type de glace atmosphérique (Littmann, 2016)

Il existe plus de 19 structures cristallines pour la glace dont les trois principales sont : hexagonales, cubique et non cristalline. Sous différentes conditions, plusieurs autres variétés allotropiques ont déjà été observées. La figure 1.17 présente le diagramme de phase de l'eau présentant les différentes structures cristallines en fonction de la température et de la pression (Michel, 1978).

La majorité des structures cristallines de la glace nécessite des conditions extrêmes telles qu'une température très basse ou une pression très élevée pour être observée comparativement aux métaux ou autres solides. La seule structure de glace formée naturellement aux conditions atmosphériques normales est la structure cristalline hexagonale. Cette variété allotropique est nommée glace I_h et possède une structure stable à conditions ambiantes dues aux liaisons hydrogène. Contrairement à la majorité des matériaux, l'eau augmente en volume lors de son changement de liquide à solide, changeant ainsi sa densité (Aberkane, 2012).

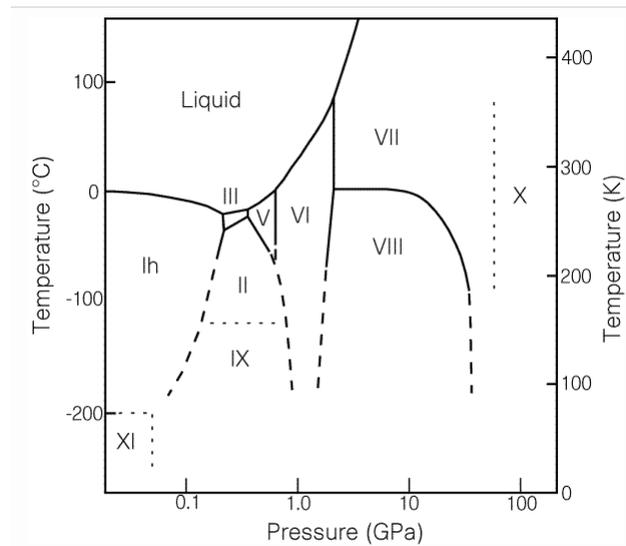


Figure 1.17: Diagramme de phase de l'eau (Lobban et al., 1998)

1.4.2 SOURCE DE LA GLACE ATMOSPHÉRIQUE

La glace atmosphérique est un terme générique appliqué au dépôt solide obtenu par l'accumulation de particules d'eau en surfusion présente dans l'atmosphère au contact d'une surface quelconque. Ces dépôts sont obtenus généralement de deux façons, soit lors de précipitations ou lors du passage de la surface à travers un nuage givrant. Peu importe le type d'accumulation de glace, celle-ci peut causer d'importants dégâts aux infrastructures incluant les lignes électriques, les stations météorologiques, les avions, les éoliennes, etc. La glace atmosphérique est un phénomène exclusif aux régions circumpolaires ou en haute altitude telles que les zones montagneuses de l'Europe centrale, de l'Asie et de l'Amérique du Nord (Fikke et al., 2008).

Le givrage obtenu par précipitation froide peut normalement produire du verglas, de la neige humide ou de la neige sèche. Le résultat dépend de la variation de la température en fonction de l'altitude. De la pluie verglaçante sera produite lorsqu'une distribution de

température spécifique est attribuée à l'altitude. Les paramètres sont la température de surface ($T_{surface}$), la température maximale ainsi que sa hauteur (T_{max} et Z_{max}), la profondeur de la zone de fonte et la profondeur de la zone au-dessous de zéro ($H_{melting}$ et $H_{subfreezing}$), telle que présentée à la figure 1.18. Essentiellement, une inversion de température se produit dans les couches inférieures. Cette inversion produit une zone chaude en altitude et une zone froide près du sol, ce qui est contraire à l'état normal d'un tel système. Lors de précipitations et lorsque les couches d'air sont assez épaisses, celles-ci permettent à ce qui serait normalement de la neige de fondre complètement en altitude pour retomber dans la zone froide. Les gouttes d'eau deviennent donc en surfusion et gèlent lorsqu'elles touchent un obstacle quelconque produisant du verglas ou du givre (Fikke et al., 2008).

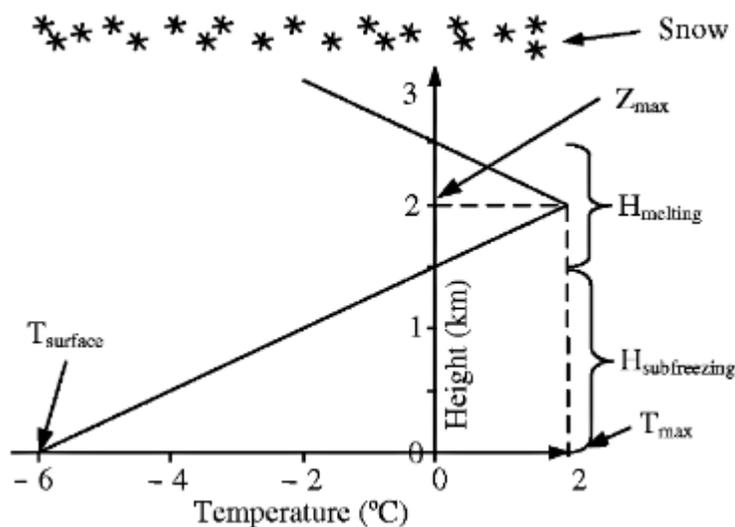


Figure 1.18: Exemple de distribution verticale de température menant à une pluie verglaçante (Fikke et al., 2008, p.5)

Dépendamment des paramètres tels que la profondeur et l'élévation de la couche froide, la température de surface, l'épaisseur de la couche de fonte et la température maximale, etc., le type de précipitation peut être soit de la pluie ou de la bruine verglaçante, de la grêle, de la neige humide refondue ou simplement de la neige (Fikke et al., 2008).

Ces conditions peuvent être atteintes lors de différents procédés météorologiques ou topographiques. En effet, les conditions précédentes doivent être maintenues assez longtemps pour permettre une accumulation. Ceci est possible si, par exemple, une masse d'air froide reste emprisonnée dans une zone quelconque alors qu'un courant plus chaud passe par-dessus. Dans ce cas, les conditions peuvent être maintenues tant que la vitesse de déplacement de l'air est faible. Il est aussi possible de maintenir les conditions nécessaires lorsqu'un front froid alimente constamment le système météorologique, permettant ainsi de longues périodes pouvant durer jusqu'à plusieurs jours (Fikke et al., 2008).

Pour ce qui est des précipitations de neige, il est possible de faire face à un type sec ou un type humide. Une neige sèche s'accumulera avec une vitesse de vent normalement inférieur à 2 m/s et cause rarement des problèmes de par sa faible densité. La problématique apparaît lors de précipitation de neige humide, soit lorsque la température au sol est très proche de 0°C. Cette neige commence à fondre et se mélange donc avec de l'eau liquide, ce qui la rend adhésive et dense. Encore une fois, ces différentes précipitations varient typiquement en fonction des paramètres cités plus haut et peuvent apparaître dans n'importe quel endroit où les températures de surface peuvent descendre sous 0°C (Fikke et al., 2008).

Un nuage givrant, quant à lui, se présente comme un nuage de gouttelettes d'eau en surfusion. Les paramètres régissant l'accumulation de glace en nuage givrant sont la teneur en eau (LWC), la grosseur du nuage et des gouttes, la température et la vitesse du vent perpendiculaire à l'objet givré. Ce type de givrage se produit généralement au-dessus de la base des nuages et lors d'une température supérieure à 0°C. Des nuages givrants se retrouvent donc en haute altitude et dans les zones montagneuses exposées. Le passage dans un nuage givrant produit l'effet d'une bruine, un givre de surface dont l'apparence et les caractéristiques,

comme pour le cas de précipitation, varie en fonction des plusieurs paramètres tels que la température et la vitesse du vent (Fikke et al., 2008).

1.4.3 TYPE DE GLACE ATMOSPHERIQUE

Comme mentionné dans la section précédente, les caractéristiques de la glace varient en fonction de paramètre comme la température, la vitesse du vent et la taille des gouttes. Il est possible d'obtenir ces différents types d'accumulation lors de précipitation ou du passage dans un nuage givrant. Kuroiwa (Kuroiwa, 1965) mentionne trois types importants de précipitation, soit le verglas (glaze), le givre lourd (hard rime) et le givre léger (soft rime). La figure 1.19 présente les conditions météorologiques nécessaires à ces processus trouvées expérimentalement.

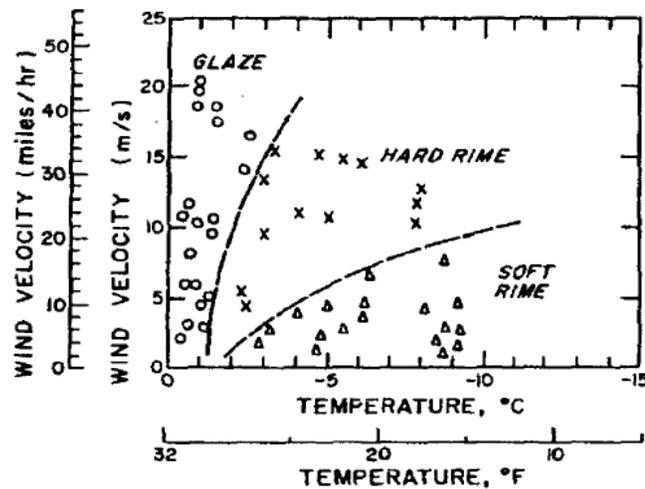


Figure 1.19: Type de glace atmosphérique en fonction des conditions météorologiques (température et vitesse) (Kuroiwa, 1965)

Le verglas est essentiellement un dépôt compact lisse ayant une apparence le plus souvent transparente. Celui-ci est composé de gouttelettes d'eau en surfusion allant de 0,2 mm à 5 mm de diamètre en provenance d'une précipitation quelconque. Il y a très peu de bulles

d'air emprisonnées, ce qui lui donne son apparence translucide. La densité d'un verglas est généralement autour de $0,9 \text{ g/cm}^3$. Le verglas apparaît généralement à des températures plus chaudes et autour de 0°C (Kuroiwa, 1965).

Le givre lourd est un dépôt parfois lisse, parfois craquelé et même granulé qui se forme à des températures sous 0°C . Son apparence varie en fonction des paramètres tels que la température et la vitesse du vent lors l'accumulation et est typiquement transparente tirant vers le blanc opaque. Sa densité varie entre $0,7 \text{ g/cm}^3$ et $0,9 \text{ g/cm}^3$ et possède une forte adhérence. Du givre lourd est généralement obtenu à des vitesses de vent plus élevées (Kuroiwa, 1965).

Le givre léger est un dépôt de glace provenant d'une précipitation ou d'une bruine en surfusion. Celui-ci est spécialement blanc, granuleux et possède une densité inférieure, de l'ordre de $0,6 \text{ g/cm}^3$. Le givre léger apparaît à des vitesses de vent plus basses et à des températures inférieures à 0°C (Kuroiwa, 1965).

1.4.4 EFFET SUR DES PROFILS AÉRODYNAMIQUES

Une panoplie de problèmes est due à la présence de glace atmosphérique, rendant la compréhension de ce phénomène un enjeu important. Par exemple, dans l'industrie de l'énergie éolienne, une variété importante de problèmes sont rencontrés, allant de perte de puissance et réduction du rendement à la destruction de certains appareils suite à des débalancements dus à l'accumulation de glace (Homola et al., 2010).

L'accumulation de glace est aussi un facteur important à considérer dans l'industrie aérospatiale. Les appareils du type giravion peuvent subir de lourdes pertes de performance par l'accumulation de glace sur leurs pales. En effet, celle-ci produit une modification de la

géométrie, changeant des paramètres importants tels que la portance, la trainée et le moment dus au tangage. La dégradation de la portance et l'augmentation de la trainée demanderont une puissance supérieure à la normale de la part du rotor principal pouvant endommager celui-ci ainsi que le système de transmission et causer des problèmes au niveau du contrôle et de la performance de l'appareil. Les pales peuvent aussi être touchées et se dégrader plus rapidement que prévu, causant aussi des contraintes structurelles supplémentaires (Gent et al., 2000).

Pour ce qui est des avions, la glace cause le même type de problématique. L'augmentation de la force de trainée ainsi que la diminution de la portance causée par un changement de géométrie peuvent créer des complications. Il est à noter que la glace peut aussi avoir un effet néfaste sur les composantes importantes, telles que certains appareils de mesures vitaux à la navigation, les nombreux conduits d'entrée d'air, nacelles et partie mobiles, etc. Pendant le décollage, une accumulation de glace augmentera le roulis d'un appareil, réduira sa marge de décrochage et sa vitesse de montée pouvant induire des problèmes au niveau du contrôle, rendant ainsi l'opération dangereuse. Pendant le vol, l'accumulation de glace réduit la vitesse de croisière, réduit l'altitude maximale, augmente la consommation de carburant et peut même aller jusqu'au bris d'un ou plusieurs moteurs menant à une situation potentiellement catastrophique. La figure 1.20 illustre l'effet typique de l'accumulation de glace sur la portance et la trainée d'un profil aérodynamique. On y remarque la perte de portance ainsi que l'augmentation de la trainée en fonction de la quantité de glace.

1.5 SIMULATION EN SOUFFLERIE

Il existe plusieurs méthodes expérimentales permettant de simuler des conditions météorologiques de givrage incluant les souffleries réfrigérées, les installations givrantes pour

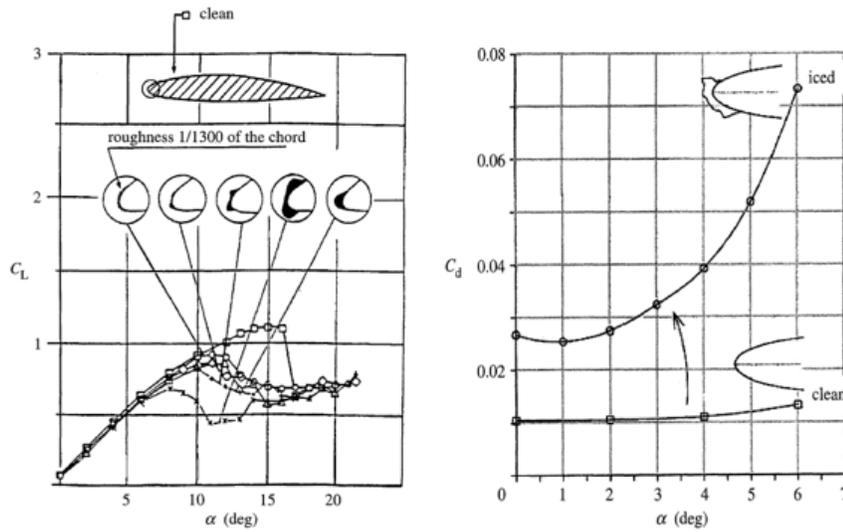
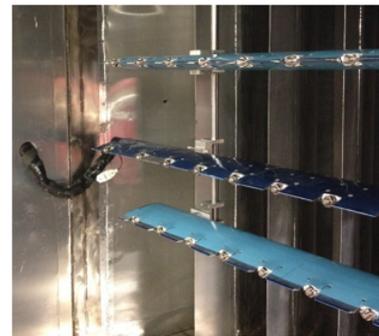


Figure 1.20: Effet sur le coefficient de portance C_L (gauche) et effet sur le coefficient de trainée C_D (droite) (Gent et al., 2000)

essais relatifs aux moteurs, les équipements de pulvérisation et les avions-citernes (Gates Learjet Corp Wichita et al., 1991). Les différences entre ceux-ci résident essentiellement dans les caractéristiques comme l'aérodynamisme, l'envergure, la capacité, etc. Cependant, toutes ces infrastructures ont un point commun : ils génèrent un nuage givrant par injection d'eau dans un écoulement d'air froid via un système de gicleurs où l'eau et l'air utilisés sont pressurisés (figure 1.21) (Gates Learjet Corp Wichita et al., 1991).



(a)



(b)

Figure 1.21: Rampe de gicleur du NASA Glenn Research Center (Center, 2012) (a) et rampe de gicleur du Laboratoire International des Matériaux Antigivre de l'UQAC (b)

L'utilisation de souffleries réfrigérées givrantes pour fin de simulation est sans doute l'option la moins coûteuse tout en étant relativement complète. Contrairement à l'utilisation directe d'avion ou tout autre appareil, il est possible d'utiliser celles-ci à n'importe quel temps de l'année et pour n'importe quelle condition météorologique. De plus, il est beaucoup plus facile d'isoler les différents paramètres, prendre des photos et isoler des sections à l'étude (Gates Learjet Corp Wichita et al., 1991).

Malheureusement, l'utilisation d'une soufflerie réfrigérée givrante rend difficiles les essais à grande échelle, considérant la taille limitée de la section d'essai. C'est pourquoi les essais sont normalement accomplis avec, soit des portions de l'appareil, soit en utilisant des modèles réduits (Gates Learjet Corp Wichita et al., 1991)).

Les gouttelettes doivent, afin de correspondre aux conditions de givrage, ne pas s'évaporer, mais plutôt voyager assez longtemps pour atteindre la température de l'air ambiant. Les souffleries réfrigérées sont donc préconisées dans l'industrie puisqu'il est plus facile de s'assurer que les gicleurs soient en amont de l'objet étudié et que l'écoulement d'air soit assez humide. Malgré qu'il soit très difficile d'obtenir un écoulement uniforme et à faible turbulence, surtout en y incluant des jets d'eau vaporisés, il est beaucoup plus aisé d'obtenir une certaine uniformité spatiale et temporelle dans une soufflerie réfrigérée qu'avec n'importe quelle autre méthode incluant les essais en vol (Gates Learjet Corp Wichita et al., 1991). Un enjeu important au niveau de l'expérimentation reste la reproductibilité des essais. En effet, il est encore ardu à l'heure actuelle d'obtenir des résultats similaires entre différentes installations, considérant les différences notables de l'écoulement d'une soufflerie à l'autre. Il existe des collaborations ayant pour but d'uniformiser la calibration des souffleries réfrigérées givrantes dans le monde sous la forme d'une pratique recommandée (ARP5905) élaborée au fil du temps lors de la mise en commun d'information (SAE International, 2015).

1.6 PARAMÈTRES DE GIVRAGE EN LABORATOIRE ET INSTRUMENTATION

Plusieurs paramètres influencent les conditions de givrage en vol incluant des paramètres tels que la température, la grosseur des gouttes (MVD) et la teneur en eau (LWC) ainsi que des paramètres atmosphériques tels que l'altitude et la vitesse. Dans la nature, l'eau présente dans l'atmosphère se condense pour former un nuage. Le fait que le diamètre de ces gouttes est très faible permet à celles-ci de rester en surfusion de -20°C jusqu'à, très rarement, -35°C . Il a même été observé en laboratoire des gouttelettes de quelques micromètres restant en surfusion à des températures allant jusqu'à -40°C , mais ces conditions ne sont jamais atteintes dans la nature (Gent et al., 2000). De plus, toute goutte d'eau entrant en contact avec un cristal ou germe de glace entraîne sa solidification. De ce fait, la rareté d'un nuage d'eau en surfusion est largement réduite lors de la diminution de la température de l'air ambiant puisqu'il est plus fréquent de rencontrer de tels cristaux à ces températures (Gent et al., 2000)). Également, la pluie verglaçante est possible à des températures plus élevées et causée par des gouttelettes plus larges (plus de $400\ \mu\text{m}$). La diminution de température tend à favoriser une bruine verglaçante considérant des gouttelettes plus petites (typiquement de 50 à $400\ \mu\text{m}$) (Gent et al., 2000).

1.6.1 TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE

Le paramètre le plus important régissant la nature des accumulations de glace provenant de nuages en surfusion est la température extérieure ou « outside air temperature » (OAT). En théorie, la température statique de l'air est très aisément mesurée à l'aide de thermocouple et permet de définir en partie le type et la gravité de l'accumulation, mais en pratique, la température de la surface joue un rôle aussi important (Gent et al., 2000). En effet, c'est la température de la surface qui va déterminer s'il y aura accumulation de glace. Bien entendu,

la température de l'air a un impact direct sur la température de la surface et il est impossible de réchauffer l'entièreté de l'aire extérieure d'un appareil. En tant que telle, la température extérieure a une incidence sur le refroidissement par convection et donc par l'entremise de la dissipation de la chaleur latente produite par les gouttes en surfusion touchant la surface. Ainsi, une température plus faible entraîne inévitablement une augmentation de la tendance à geler au contact malgré l'apport en chaleur, soit provenant d'une puissance électrique ou de friction (Gent et al., 2000).

Afin de mesurer la température ambiante, un thermocouple est utilisé. Celui-ci mesure la force électromotrice induite entre deux fils de métaux différents connectés à un métal de référence à température connue. Cette force électromotrice est directement proportionnelle à la température appliquée au fil dans un intervalle prédéfini de température. Après étalonnage, il est possible d'obtenir une mesure en direct de la température (OMEGA, 2000). La température cible à contrôler doit être mesurée en amont de l'écoulement juste avant la section d'essai (SAE International, 2015).

1.6.2 TENEUR EN EAU LIQUIDE (LWC)

La teneur en eau liquide (LWC), exprimée en unité de masse d'eau par unité de volume d'air (g/m^3), est le paramètre définissant la quantité d'eau liquide, ou en surfusion, présente dans l'écoulement d'air.

De manière générale, la masse d'eau sur un corps augmente en fonction du LWC augmentant du même coup linéairement le potentiel d'accumulation de glace. Cependant, il est important de tenir compte de l'efficacité de la collection de la surface. En effet, si une très grande quantité d'eau contenant des gouttelettes de diamètre suffisamment petit pour rendre

un impact difficile ou impossible, alors l'accumulation de glace sera faible. Il est donc possible de dire qu'il existe une combinaison optimale du diamètre des gouttes et du LWC menant à un taux d'impact maximum pour un corps quelconque (Gent et al., 2000).

Afin de mesurer la teneur en eau liquide, plusieurs techniques sont disponibles en accord avec la pratique recommandée ARP5905 (SAE International, 2015). La première consiste à utiliser un petit profil aérodynamique aussi appelé lame de givrage (figure 1.22) pour mesurer l'accumulation de glace dans la direction de l'écoulement, et ce, à trois endroits différents sur la largeur. Il est aussi recommandé de protéger la lame lors de la stabilisation de l'écoulement afin de réduire l'erreur et de procéder aux essais à -18°C . Il est aussi important de prendre en note le temps d'exposition à des fins de calculs (SAE International, 2015). L'équation 1.28 permet de calculer ensuite le LWC.

$$LWC_b = K \frac{\rho_{ice} \tau_{ice}}{e_b V_{TS} t} \quad (1.28)$$

Où ρ_{ice} est la densité, τ_{ice} est l'épaisseur moyenne de la glace, e_b est l'efficacité de captation de la lame, V_{TS} est la vitesse de l'écoulement libre dans la section test, t est le temps d'exposition et K est le facteur de conversion des unités.

L'autre option est d'utiliser un cylindre en rotation pour capter, pendant un intervalle de temps prédéfinis, l'eau produite par le nuage givrant. La masse de l'accumulation de glace

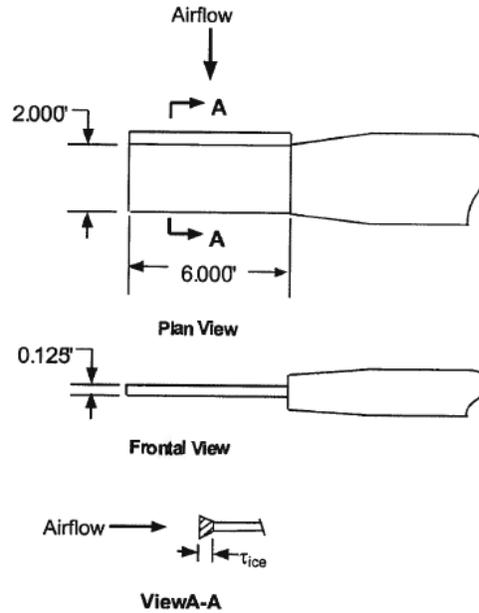


Figure 1.22: Lame de givrage (SAE International, 2015)

produite par le nuage ainsi que le nouveau rayon du cylindre sont ensuite mesurés pour le calcul du LWC en utilisant l'équation 1.29 (SAE International, 2015).

$$LWC_b = K \frac{\rho_{ice}(r_{cf} - r_{ci})}{e_c V_{TS} t} \quad (1.29)$$

Où ρ_{ice} est la densité, r_{cf} et r_{ci} sont respectivement le rayon final et initial moyen du cylindre, e_c est l'efficacité de collection, V_{TS} est la vitesse de l'écoulement libre dans la section test, t est le temps d'exposition et K est le facteur de conversion des unités. Malgré l'utilisation de la mesure du rayon, il est possible d'utiliser la masse plutôt que la mesure du rayon final considérant que ce paramètre est plus commode à mesurer. À cet effet, l'équation 1.30 permet de faire l'équivalence dans l'équation 1.29, où K est le facteur de conversion d'unité, m_{ice} est

la masse mesurée de l'accumulation de glace, soit la masse finale moins la masse initiale et l_c est la longueur du cylindre sur laquelle il y a accumulation (SAE International, 2015).

$$r_{cf} = K \left(\frac{m_{ice}}{\pi \rho_{ice} l_c} - r_{ci}^2 \right)^{0,5} \quad (1.30)$$

L'efficacité de captation de la lame ($e(b)$) incluse dans le calcul du LWC pour les deux méthodes précédentes se calcule essentiellement de la même façon. Ce paramètre est une fonction de la vitesse, de la géométrie, du diamètre des gouttes et de la viscosité dynamique de l'air. La figure 1.23 ainsi que l'équation 1.31 définissent comment le calculer. L'efficacité de captation en fonction du diamètre de gouttelettes d_d est donc une fonction de la surface S et des angles limites θ du point de stagnation (Fortin, 2010).

$$e(b) = \int_{S_{inf}}^{S_{sup}} \beta(d_d) ds = \bar{\beta} \left(\frac{\theta_{sup} - \theta_{inf}}{2} \right) \quad \text{où} \quad \beta = \frac{dy}{ds} \quad (1.31)$$

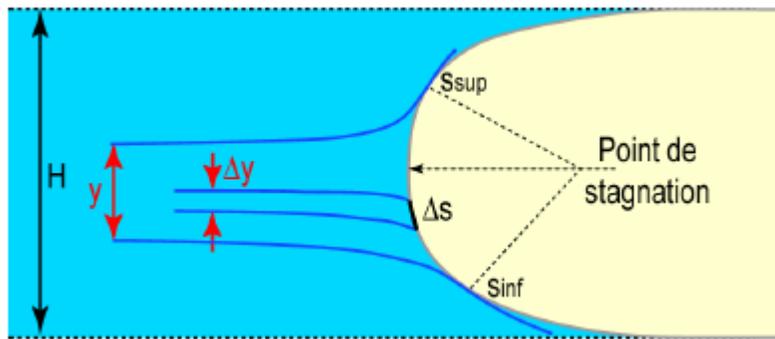


Figure 1.23: Schéma illustrant les différentes variables lors du calcul du coefficient de captation (équation 1.31 (Fortin, 2010))

Il est possible, selon la pratique ARP5905 (SAE International, 2015), de simplifier la méthode du cylindre rotatif (équation 1.32) en calculant un paramètre d'inertie adimensionnel

St (Stokes) où K est le facteur de conversion d'unité, ρ_w est la densité de l'eau, d_d est le diamètre des gouttes, V_{TS} est la vitesse dans la section test, μ_a est la viscosité dynamique de l'air et d_c le diamètre du cylindre.

$$St = K \frac{\rho_w d_d V_{ts}}{9 \mu_a d_c} \quad (1.32)$$

Il est possible de déterminer ensuite le coefficient de captation (e_c), le nombre de Reynolds (Re_c) du cylindre est calculé en utilisant l'équation 1.11. L'équation 1.33 est ensuite utilisée.

$$e_c = \frac{St}{(St - H_e)} \quad (1.33)$$

avec

$$H_e = \frac{\pi}{2} + 0,121 Re_c^{0,6} + 0,754 \times 10^{-4} Re_c^{1,38} \quad (1.34)$$

Dans le cas où le paramètre St (équation 1.32) est inférieur à 3, les équations 1.35 et 1.36 doivent être utilisés.

$$St_0 = \frac{(St - 0,125)}{1 + 0,1206 Re_{d_d}^{0,59}} \quad (1.35)$$

et

$$e_c = 0,457 (\log_{10} 8 St_0)^{1,634} \quad (1.36)$$

Il est possible de remarquer à la figure 1.24, que l'efficacité de collection s'approche de 1 en présence de grosses gouttelettes et à plus haute vitesse.

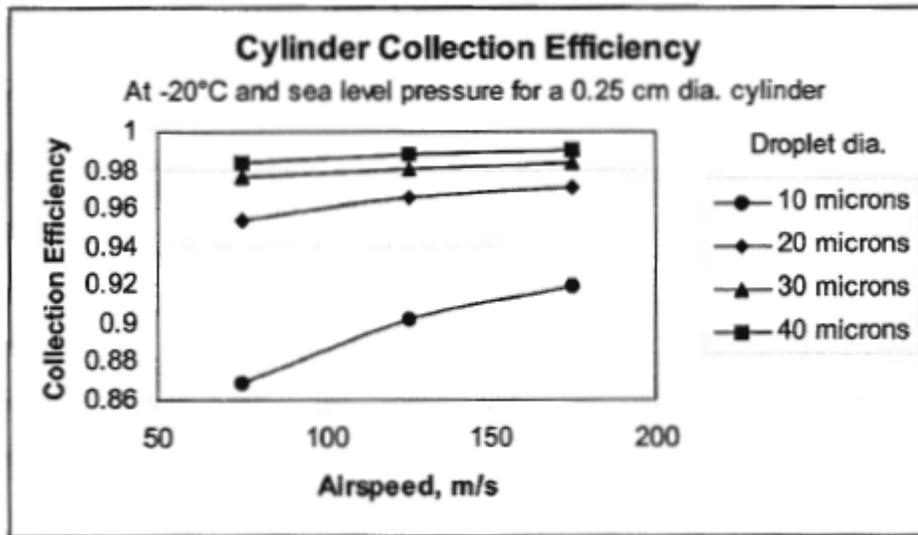


Figure 1.24: Efficacité de captation de la lame d'un cylindre rotatif utilisant l'équation 1.33 (SAE International, 2015, p.47)

Lorsque la glace s'accumule, le diamètre du cylindre change. Ce simple détail peut faire apparaître une erreur allant jusqu'à 2%. Il est possible de réduire celle-ci en recalculant le diamètre comme étant moyen selon l'équation suivante : (SAE International, 2015).

$$d_c = \frac{(2r_{ci} + 2r_{cf})}{2} = r_{ci} + r_{cf} \quad (1.37)$$

De plus, le diamètre des gouttes étant variable et impossible à uniformiser, l'utilisation de MVD ou diamètre médian des gouttes est approprié.

Il est aussi possible d'utiliser ce qui est communément appelé une sonde King ou « King probe ». Celle-ci est un instrument de mesure incluant un fil chauffant. Il mesure le

voltage, proportionnel à la puissance requise pour garder ledit fil à température constante. Cette puissance est influencée par la somme des effets de convection due à l'écoulement d'air dans la soufflerie ainsi que de l'évaporation des gouttes d'eau touchant le fil. Il est ensuite possible de calculer le LWC à l'aide de l'équation suivante :

$$LWC_K = K \frac{(P_K - P_{dry})}{[(T_e - T_0)c_w + L_v]d_K L_K V_{ts} e_K} \quad (1.38)$$

Où P_K est la puissance appliquée à la sonde, T_e est la température absolue d'évaporation de l'eau, T_S est la température statique de l'air, c_w est la chaleur spécifique de l'eau, L_v est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, d_K est le diamètre du fil, L_K est la longueur du fil, V_{ts} est la vitesse dans la section test, e_K est l'efficacité de captation du fil, P_{dry} est la puissance à sec et K le facteur de conversion d'unité (SAE International, 2015)

La puissance à sec est donnée à l'aide de l'équation suivante :

$$P_{dry} = \pi K K_{dry} l_K k_a (T_K - T_S) Nu \quad (1.39)$$

Où K_{dry} est le facteur de correction à sec, k_a est la conductivité de l'air sec, T_K est la température absolue de la sonde, Nu est le nombre de Nusselt et K le facteur de correction des unités (SAE International, 2015).

Le nombre de Nusselt est donné à l'aide des valeurs suivantes (tableau 1.2) où Re_K est le nombre de Reynolds du fil de la sonde King.

Tableau 1.2: Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds pour la détermination de la puissance à sec d'une sonde King (SAE International, 2015)

Nombre de Nusselt	Nombre de Reynolds
$Nu = 1$	$Re_K < 0,4$
$Nu = 0,882Re_K^{0,33}$	$0,4 \leq Re_K < 4$
$Nu = 0,813Re_K^{0,385}$	$4 \leq Re_K < 40$
$Nu = 0,609Re_K^{0,466}$	$40 \leq Re_K < 4000$
$Nu = 0,172Re_K^{0,618}$	$4000 \leq Re_K < 40000$
$Nu = 0,0237Re_K^{0,805}$	$40000 \leq Re_K$

Le coefficient de captation est ensuite calculé dépendamment de la valeur du paramètre d'impact ϕ défini comme suit :

$$\phi = \frac{Re_{d_d}^2}{St} \quad (1.40)$$

Où St est le nombre de Stokes (équation ??) et Re_{d_d} est le nombre de Reynolds du fil, le tout calculé comme pour le cylindre rotatif.

Si le paramètre d'impact ϕ est supérieur à 100, l'efficacité de collection se calcule selon l'équation suivante :

$$e_K = K_1 - 0,028 - K_3(K_2 - 0,0454) \quad (1.41)$$

où :

$$K_1 = 1,066St^{-0,00616} e^{-1,103St^{-0,688}} \quad (1.42)$$

$$K_2 = 3,641St^{-0,498} e^{-1,497St^{-0,694}} \quad (1.43)$$

$$K_3 = 0,00637(\phi - 100)^{0,361} \quad (1.44)$$

Si par contre, le paramètre ϕ est plus petit que 100, la même procédure que celle du cylindre rotatif est utilisée, mais en changeant le terme du diamètre du cylindre d_c par le diamètre du fil chauffant d_K (SAE International, 2015).

Enfin, l'uniformité spatiale du nuage givrant doit être mesurée selon la pratique recommandée ARP 5905 (SAE International, 2015). À cet effet, un grillage métallique est utilisé. Les dimensions de celui-ci dépendent de la soufflerie. L'espacement entre les branches est généralement entre 5 et 8 cm dont l'épaisseur de chacune d'entre elles est de 5 mm. Le grillage est placé dans la section d'essai pendant un certain temps prédéfini soumis aux conditions de givrage désirées. L'épaisseur de l'accumulation de glace est ensuite mesurée sur chaque branche pour la comparer à l'épaisseur moyenne au centre. La figure 1.25 présente un grillage typique et un exemple des points (V_1 , V_2 , V_3 , H_1 , H_2 et H_3) où l'épaisseur doit être mesurée. Cette épaisseur est ensuite comparée à la moyenne au centre pour produire un ratio.

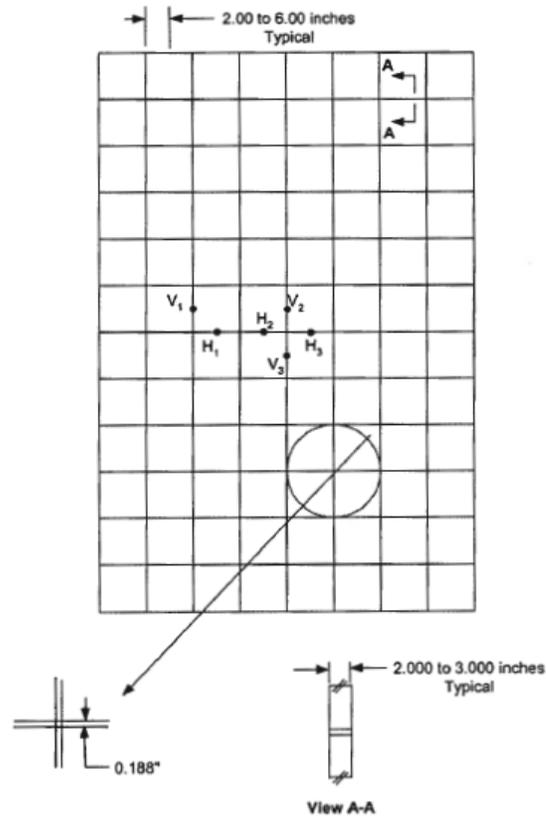


Figure 1.25: Grillage typique pour l'uniformité spatiale d'un nuage givrant (SAE International, 2015, p.26)

L'équation utilisée pour déterminer l'épaisseur de glace se décrit comme suit :

$$\tau_{ice R} = \frac{\tau_{(x,y)} - \tau_{grid}}{\tau_C - \tau_{grid}} \propto \frac{LWC_{(x,y)}}{LWC_C} \quad (1.45)$$

Où $\tau_{(x,y)}$ est l'épaisseur mesurée aux points, τ_{grid} est l'épaisseur de la broche et :

$$\tau_C = \frac{\sum(V_2 + V_3 + H_2 + H_3)}{4} \quad (1.46)$$

Les données sont ensuite converties en LWC et l'uniformité spatiale est donnée par un graphique de contour, comme présenté à la figure 1.26.

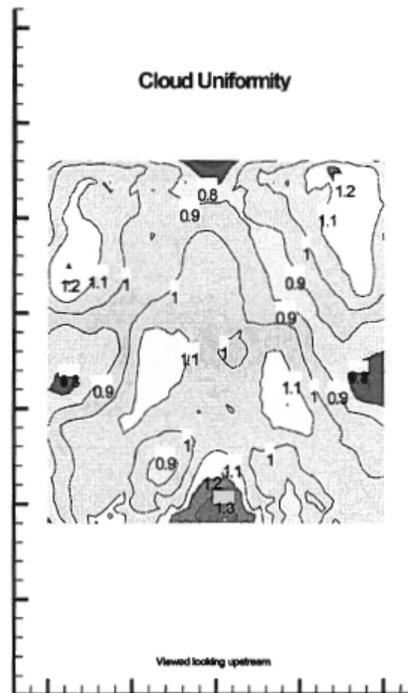


Figure 1.26: Exemple d'un graphique en contour représentant l'uniformité spatiale d'un nuage givrant (SAE International, 2015, p.36)

1.6.3 GROSSEUR DES GOUTTELETTES (MVD)

Il est important de noter que la masse de l'eau est proportionnelle au cube du diamètre des gouttelettes alors que l'influence de l'écoulement sur une gouttelette est proportionnelle au carré du diamètre des gouttelettes, et ce, en ignorant les effets du nombre de Reynolds sur le coefficient de traînée (Gent et al., 2000). En conséquence, les gouttelettes ayant un diamètre supérieur vont être moins affectées par les forces aérodynamiques et vont tendre à suivre une trajectoire linéaire due à l'effet de l'inertie. En comparaison, les gouttelettes à masse plus faible et donc au diamètre plus faible vont typiquement suivre les lignes de courants et ne toucheront pas nécessairement la surface. Ainsi, la possibilité qu'une gouttelette quelconque

touche la surface donnée est déterminée par le ratio de l'inertie sur les forces aérodynamiques (Gent et al., 2000).

Il faut tout d'abord, dans le but de connaître les statistiques sur la grosseur des gouttelettes, connaître la distribution de grosseur de ces dernières ou le nombre de gouttelettes en fonction de leur diamètre. Cette fonction, normalement continue, est approximée par les instruments de mesure pour correspondre à une distribution discrétisée respectant les limites de l'instrument. Une fois cette distribution obtenue, il est possible de trouver des valeurs statistiques pertinentes à l'étude (SAE International, 2013).

Le paramètre le plus utilisé dans la recherche sur le givrage est le MVD ou « median volume diameter ». Le MVD est par définition le diamètre des gouttelettes dans lequel la moitié du volume d'eau est contenu. L'équation définissant ce paramètre pour une fonction continue est l'équation 1.47. L'équation de gauche représente le volume de la première moitié du volume total d'eau. L'équation de droite représente le volume de la deuxième moitié du volume total d'eau. Ainsi en résolvant pour la valeur *MVD* on obtient le diamètre au volume médian des gouttelettes.

$$\int_0^{MVD} \frac{4}{3} \pi \left[\frac{D}{2} \right]^3 n(D) dD = \int_{MVD}^{\infty} \frac{4}{3} \pi \left[\frac{D}{2} \right]^3 n(D) dD \quad (1.47)$$

Où *n* est la quantité et *D* le diamètre (Gent et al., 2000) (SAE International, 2013).

Il existe plusieurs appareils et méthodes permettant de mesurer la grosseur des gouttelettes d'eau dans un nuage. La plupart sont optiques et fonctionnent à l'aide de laser et de capteurs. Cependant, il existe une méthode plus simple pouvant être utilisée, impliquant une

lame et de l'huile de silicone. Les gouttelettes sont captées dans un mince film d'huile de silicone sur une lame typiquement machinée dans du plexiglas. La lame est ensuite placée sous un microscope et photographiée. Le nombre de gouttelettes ainsi que leur diamètre sont ensuite mesurés à l'aide d'un ordinateur. La lame (figure 1.27) est normalement large de 2,5 mm et longue de 38 mm afin de maximiser la captation. Celle-ci possède aussi une poignée permettant le transport vers le microscope plus aisément. L'huile utilisée doit avoir une viscosité d'environ 5×10^3 à 1×10^4 cSt et est choisie principalement pour sa grande disponibilité. Cette mesure assume que les gouttelettes ne perdent aucune masse lors de l'impact et que l'échantillon est représentatif du nuage entier (SAE International, 2013).

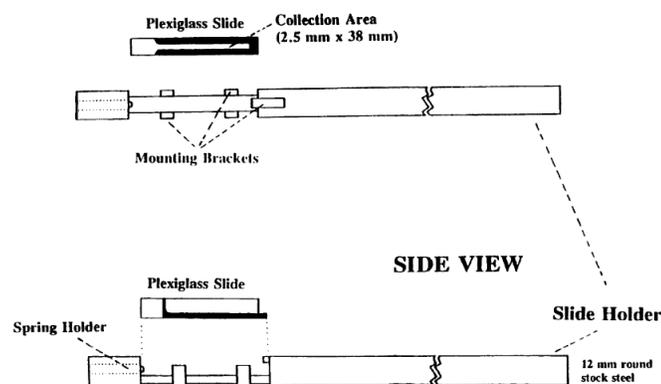


Figure 1.27: Dimension d'une lame et sa poignée (SAE International, 2013, p.39)

1.6.4 VITESSE DE L'ÉCOULEMENT D'AIR

La vitesse de l'écoulement a une influence sur la quantité d'eau captée. En effet, pour des vitesses plus grandes, il est possible de s'attendre à rencontrer un plus grand volume d'air dans un même intervalle de temps et donc une plus grande masse d'eau. L'intensité du givrage est donc une fonction de l'efficacité de captation, le LWC et la vitesse de l'appareil en question (Gent et al., 2000).

1.7 CARACTÉRISATION D'UNE SOUFFLERIE

Suite à une hausse de la demande de réglementation des conditions d'essai sous condition atmosphérique froide, l'U.S. Federal Aviation Administration a établi un plan d'action en 1997 afin de sensibiliser et entraîner les organismes, opérateurs et manufacturier du monde aéronautique. Une des tâches de ce plan incluait la création de documents rassemblant les informations quant à la caractérisation, aux critères généralement acceptés et aux procédures concernant les souffleries réfrigérées. Cette pratique recommandée, publiée par la SAE International (SAE International, 2015), décrit les pratiques nécessaires ainsi que les limites acceptées par la communauté. La caractérisation aérothermique d'un appareil aussi sensible qu'une soufflerie est primordiale, permettant ainsi aux chercheurs et concepteurs de connaître les conditions d'opération de la section d'essai incluant pression, vitesse et turbulence.

Trois types de caractérisation sont détaillés dans la pratique recommandée (SAE International, 2015). Le premier est une caractérisation complète, incluant des données sur la qualité de l'écoulement et du givrage dans la section d'essai. Ce type de caractérisation devrait être accompli au cinq ans ou à chaque modification majeure des infrastructures. Celle-ci permet l'obtention de données nécessaires au développement des courbes ainsi que des relations incluant toutes les caractéristiques aérothermiques importantes.

Le deuxième type est une caractérisation provisoire accomplie un an après la caractérisation complète ainsi qu'au cours de la vie d'opération du système. Celle-ci permet l'assurance de la qualité de l'écoulement.

Le troisième type correspond à une caractérisation périodique dite de vérification. Elle doit être accomplie deux ou trois fois par an ou lors du début de projet important afin de

vérifier l'état de l'écoulement et garder des données permettant l'analyse statistique au cours du temps. Chaque caractérisation doit être numérotée et conservée à des fins de comparaisons. Les procédures doivent aussi être spécifiées en plus de la définition de la gamme d'opérations des infrastructures.

Une caractérisation complète nécessite, selon la pratique recommandée (SAE International, 2015), une distribution de la vitesse au centre de la section d'essai ainsi qu'une mesure de l'uniformité de la vitesse sur le plan transversal de celle-ci. Les valeurs doivent être prises sur 75% de la section ou sur la partie utilisée. De plus, une distribution de température doit être récupérée aux mêmes endroits, soit sur la ligne centrale et sur le plan transversal où il est demandé d'ajouter une distribution de la variation de la vitesse permettant de quantifier l'intensité de la turbulence. Il est ensuite recommandé d'inclure la courbe de correction de la mesure de la vitesse à la ligne centrale ainsi qu'une mesure de l'angle de l'écoulement dans la section d'essai. Bien entendu, à ceci, s'ajoute la caractérisation de la capacité givrante qui inclue la mesure de la teneur en eau, l'uniformité du nuage d'eau ainsi que la grosseur des gouttelettes. Les valeurs d'essais choisis lors de la caractérisation sont déterminées en fonction des limites d'opération de la soufflerie ainsi que des plages de vitesse et de température utilisées dans le cadre des activités du laboratoire.

CHAPITRE 2

MÉTHODES ET INSTRUMENTATION

Le laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA) possède une gamme d'installations importantes incluant plusieurs chambres réfrigérées ainsi que deux souffleries réfrigérées, dont une givrante, permettant la recherche dans le domaine du givrage en général et de l'aéronautique. La soufflerie givrante s'est vu améliorée lors de l'année 2016, dans le cadre d'un projet subventionné par le FCI (Fondation Canadienne pour l'Innovation), augmentant sa capacité de réfrigération, ainsi que son système de ventilation ainsi que le système de givrage. Afin de respecter les standards proposés par l'industrie, une nouvelle caractérisation de l'écoulement d'air et de sa capacité givrante s'est avérée nécessaire. C'est donc dans cette optique que des essais de caractérisation et l'étalonnage des différents paramètres tels que la vitesse, la turbulence, l'angle de l'écoulement, la température, la teneur en eau liquide (LWC) ainsi que la grosseur des gouttelettes (MVD) formant le nuage givrant ont été accomplis. Ce chapitre inclut une description des installations, des montages, des appareils ainsi que la planification des essais conforme à la pratique recommandée ARP5905 (SAE International, 2013).

2.1 SOUFFLERIE RÉFRIGÉRÉE GIVRANTE À BASSE VITESSE DU LIMA

La soufflerie réfrigérée givrante du LIMA, présentée à la figure 2.1, est une soufflerie en circuit fermé à basse vitesse, c'est-à-dire à vitesse d'opération inférieure à un nombre de Mach de 0,4. Celle-ci est conçue pour opérer à des températures sous zéro au niveau de la mer. La capacité de réfrigération permet d'atteindre une gamme allant de 25°C à -30°C et ce, à une gamme de vitesse variant de 5 m/s à 100 m/s au niveau de la mer. En effet, la petite section de 0,5 m de large par 0,6 m de haut permet un écoulement d'air maximum de 110 m/s alors que la grande section, de 0,91 m de large par 0,76 m de haut permet un écoulement d'air d'un maximum de 50 m/s.



Figure 2.1: Soufflerie réfrigérée du LIMA

Présentés à la figure 2.2, les composants de la soufflerie sont : la section d'essai (1) , les vannes de coins (2), les portes d'accès (3 et 4), les joints d'expansion thermique (5), les drains (6), le ventilateur (7), la section convergente 9,4 :1 (8), les gicleurs (9) ainsi que les panneaux de contrôle (10 et 11). Sur cette même figure, une version simplifiée du système de

réfrigération incluant l'échangeur de chaleur (a), les valves d'expansion (b), les condensateurs (c) ainsi que les compresseurs (d) sont également illustrés.

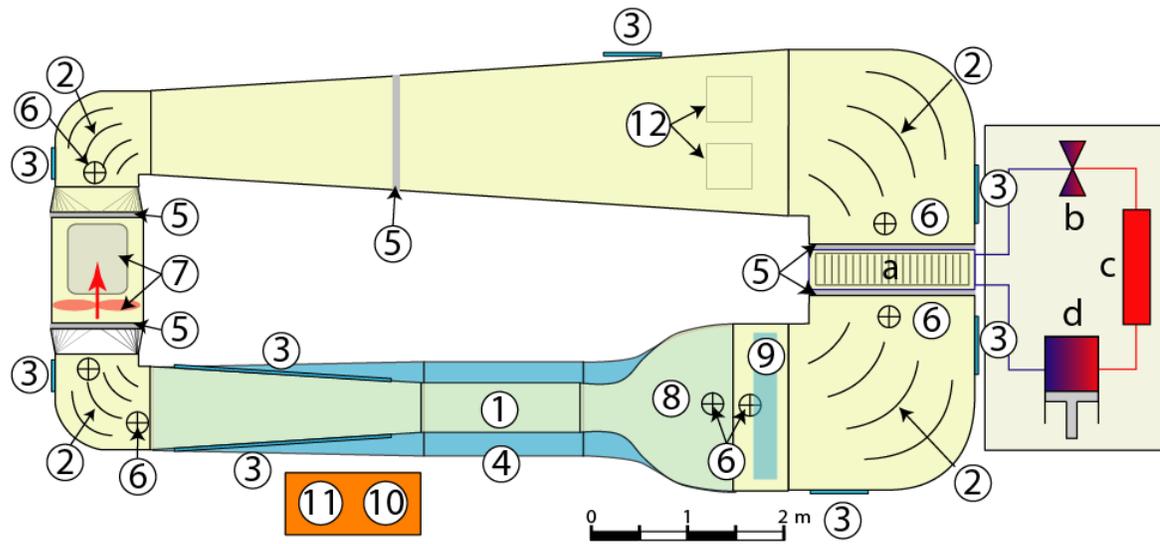


Figure 2.2: Plan de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA

2.1.1 SYSTÈME DE VENTILATION

Afin de produire un écoulement d'air, une soufflerie requiert avant tout un système de ventilation. La soufflerie réfrigérée givrante du LIMA possède un ventilateur (figure 2.3) de 1,22 m de diamètre en acier connecté à un moteur Nordic Electric NEP447T-4 de 200 HP (1800 RPM).



Figure 2.3: Ventilateur de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA

La différence de pression est mesurée entre la section du convergent (situé en 9 à la figure 2.2) et la section d'essai (situé en 1 à la figure 2.2). Celle-ci permet le calcul (voir section C.1) et l'acquisition de la vitesse en utilisant le principe de Bernoulli, tel que décrit à la section 1.3.2. Un programme de contrôle relié au système d'acquisition, décrit en plus ample détail à la section 2.2.1, envoie une consigne en fréquence au système d'entraînement du ventilateur afin d'obtenir la vitesse demandée. Une interface conviviale a été conçue par le

LIMA spécifiquement pour l'acquisition des caractéristiques et le contrôle de la vitesse de la soufflerie (figure 2.4).

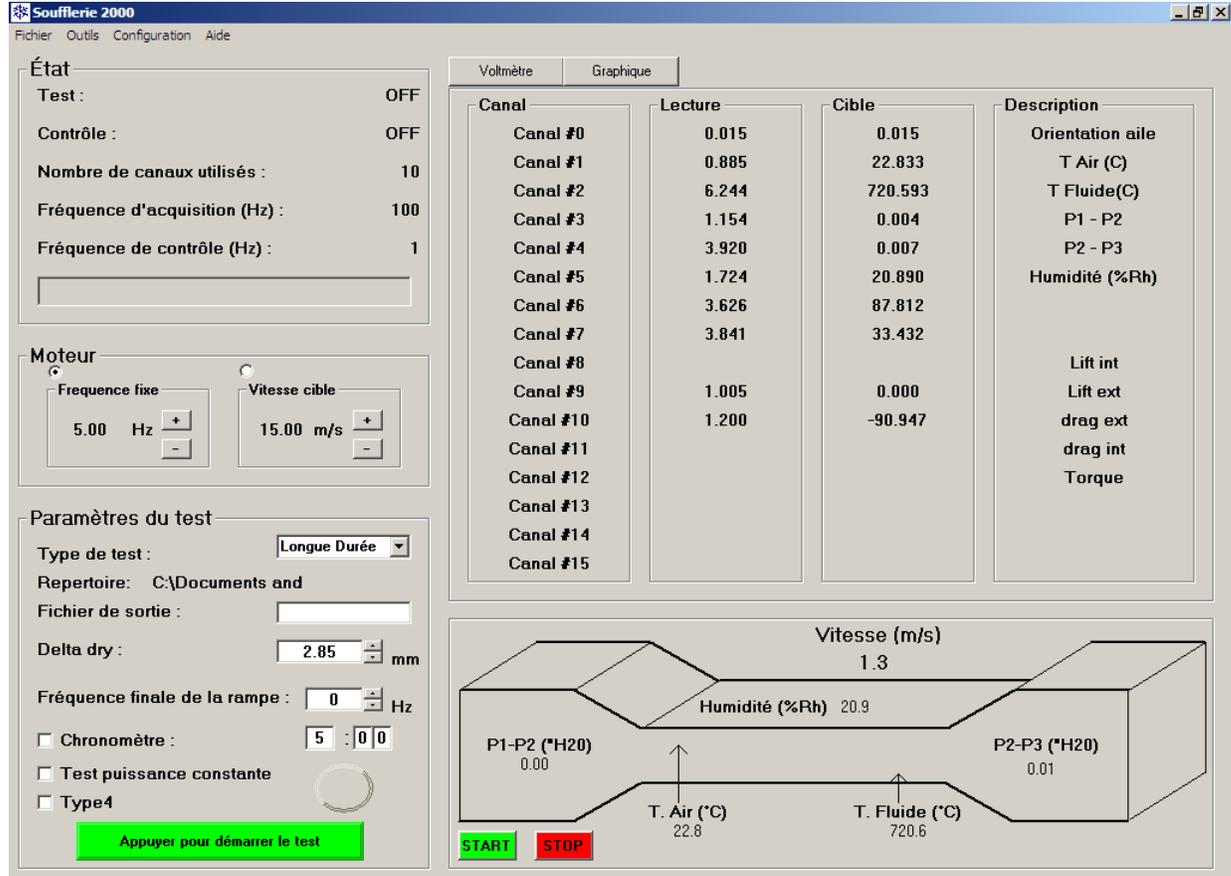


Figure 2.4: Interface de l'utilisateur du contrôle de la soufflerie réfrigérée du LIMA

2.1.2 SYSTÈME DE RÉFRIGÉRATION

Afin de maintenir l'air de la soufflerie à des températures froides, un système de réfrigération est utilisé (voir a, b, c et d à la figure 2.2). L'air passe par un échangeur de chaleur de 1,78 m par 2,17 m, dont les 230 m de serpentin en cuivre contiennent 113 ailettes d'aluminium par mètre (34/ft). Celui-ci possède une conductivité thermique de 558 mkg/s^3 (580 BTU/hr/ft). Le tout refroidit l'air, à l'aide de quatre compresseurs de 30 HP chacun ayant une capacité de 65,98 MBH à -55°C et d'une pompe à éthylène glycol. La température

dans la section d'essai (voir 1 à la figure 2.2) est mesurée à l'aide d'un thermocouple de type T, CF-000-T-4-60-1, 1/16" de diamètres d'OMEGA. Celle-ci est contrôlée à l'aide d'un contrôleur OMRON E5AK envoyant un signal d'ouverture ou de fermeture à une soupape à trois voies, régulant le débit du liquide réfrigérant dans l'échangeur de chaleur tout en recevant la température mesurée. L'erreur entre la valeur réelle et la valeur consignée est calculée et le contrôleur corrige le signal en fonction de celle-ci. La température est enregistrée à l'aide du système d'acquisition décrit en plus amples détails à la section 2.2.1. Le boîtier de contrôle est présenté à la figure 2.5.



Figure 2.5: Boîtier de contrôle de la température de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA

2.1.3 SYSTÈME DE GIVRAGE

La soufflerie réfrigérée du LIMA étant essentiellement utilisée dans le cadre d'essais de givrage, le système de buses et de gicleurs est donc une partie majeure de l'installation.

Lors du projet d'amélioration du système, deux rampes supplémentaires ont été installées au-dessus et au-dessous de la rampe originale. L'assemblage d'une rampe, illustré à la figure 2.6, inclut 9 têtes de gicleur pour celle du centre et 8 pour celle du haut et celle du bas, le tout attaché à une sortie d'air et une sortie d'eau activée séparément. Les rampes peuvent osciller de haut en bas au besoin pour couvrir la section, malgré que l'installation de deux nouvelles rampes supplémentaires rend cette fonction obsolète.

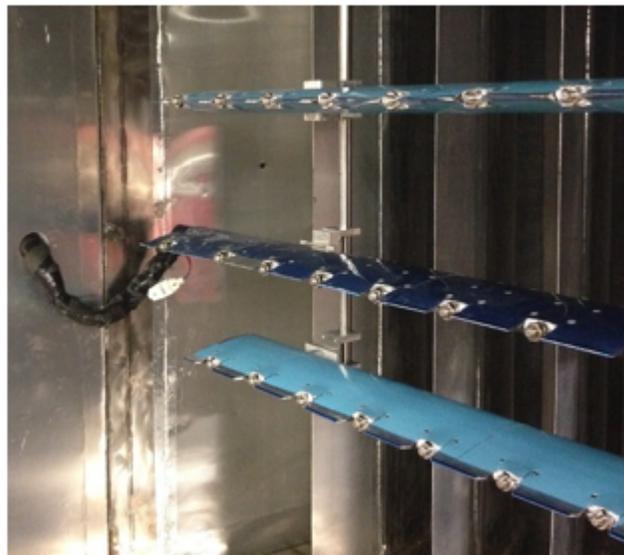


Figure 2.6: Rampe de gicleurs de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA

Les rampes sont connectées à un tableau de commande (figure 2.7) comprenant pour chacune des rampes un débitmètre sur la ligne d'air, un débitmètre par buse sur la ligne d'eau, un régulateur de pression et des manomètres sur chacune des lignes. La ligne d'air est réglée à 80 psi alors que l'eau provient d'un réservoir réfrigéré à 4°C mis sous pression à 80 psi. Le débit est contrôlé à l'aide de débitmètres à bille flottante de modèle FL-1496, produit par OMEGA. Ceux-ci possèdent un ratio de 1 mm : 0,564 mL/min.

L'eau utilisée lors de l'opération du système de givrage est filtrée et nettoyée afin d'obtenir de l'eau déminéralisée et distillée. Les rampes sont positionnées 4,4 m en amont



Figure 2.7: Panneau de commande des rampes de gicleurs de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA

de la section d'essai (voir 9 à la figure 2.2) et sont alignées de façon à couvrir celle-ci le plus uniformément possible. La relation calculant la hauteur de la zone de couverture des gicleurs est la suivante :

$$CZH_{essai} = CZH_{rampe} \frac{H_{essai}}{H_{rampe}} \quad (2.1)$$

Où CZH_{essai} est la hauteur de la zone de couverture du nuage dans la section d'essai, CZH_{rampe} est la hauteur de la zone de couverture du nuage dans la section des rampes, H_{essai}

est la hauteur de la section d'essai et H_{rampe} est la hauteur de la section des rampes (Villeneuve et Perron, 2012).

Afin de produire le nuage givrant, les buses atomiseurs d'air utilisés sont composées de gicleurs pneumatiques illustrés à la figure 2.8. Un gicleur est composé d'une paire d'anneaux défecteurs incluant un anneau de type 2050 pour le fluide et un anneau circulaire de type 67417 pour l'air. Ceux-ci sont utilisés afin de produire un étroit nuage de forme conique. Selon la configuration de la figure 2.8, le nuage est uniforme à 30,5 cm de distance de l'embout à un angle de 14° .

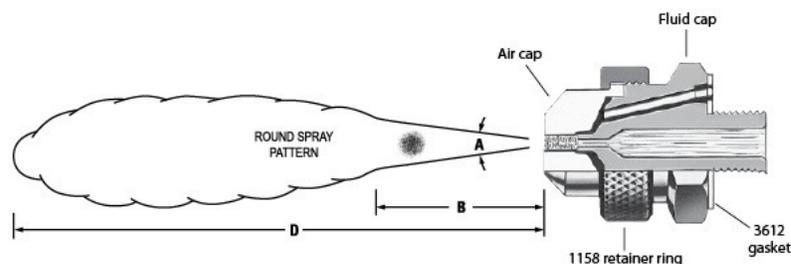


Figure 2.8: Gicleur atomiseur d'air (Villeneuve et Perron, 2012)

La hauteur couverte par le nuage givrant dans la section d'essai de la soufflerie réfrigérée, et ce, pour une seule buse, est illustrée à la figure 2.9 et correspond à 0,24 m. La proportion de teneur en eau liquide (LWC) du nuage est présentée à l'aide d'une valeur comprise entre 0 et 1, visible à l'aide de la légende de couleur.

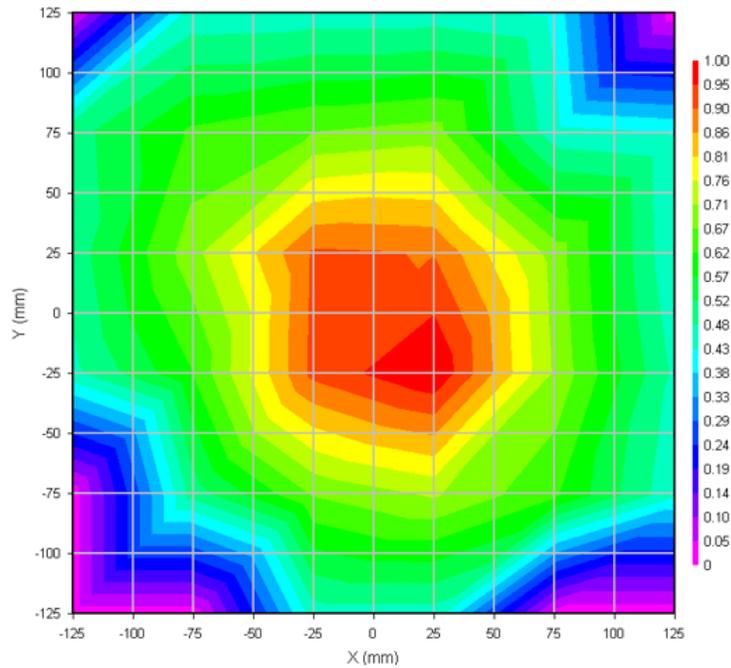


Figure 2.9: Distribution d'eau d'un gicleur dans la section d'essai de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA (Villeneuve et Perron, 2012)

Le diamètre des gouttelettes, quant à lui, est dépendant partiellement du débit d'eau, mais principalement de la pression d'air dans les buses. La figure 2.10 illustre l'enveloppe théorique du MVD, ou diamètre volumétrique médian, des gicleurs utilisés. Le débit est mesuré en mm à l'aide d'un débitmètre à bille flottante ayant un ratio de 1 mm :1,453 mL/min.

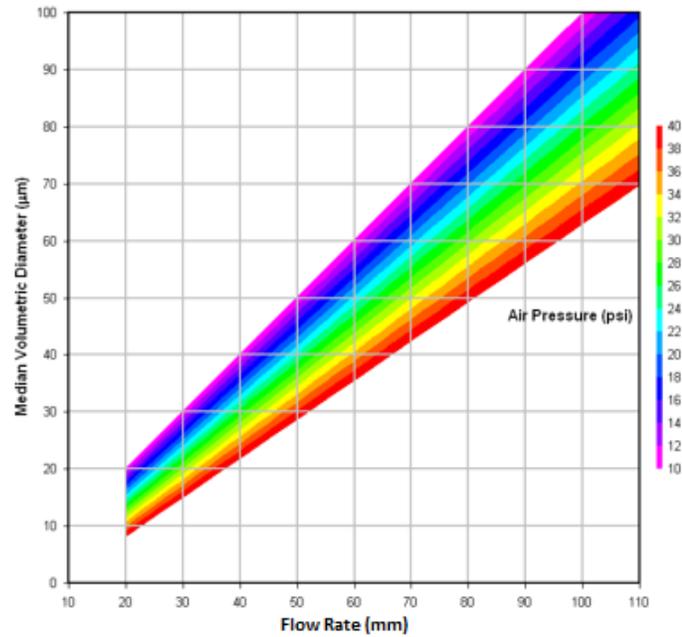


Figure 2.10: Enveloppe théorique du diamètre volumétrique médian (Villeneuve et Perron, 2012)

L'enveloppe théorique de la de teneur en eau liquide est calculé à l'aide de l'équation 2.2.

$$LWC_{theo} = \frac{\rho_{eau}FR_{gicteur}N_{gicteur}}{W_{essai}NCZH_{essai}U_{essai}} \quad (2.2)$$

Où LWC_{theo} est la teneur en haut liquide théorique en kg/m^3 , ρ_{eau} est la densité de l'eau en kg/m^3 , $FR_{gicteur}$ est le débit d'eau dans un gicteur en L/min, W_{essai} est la largeur de la section d'essai en m, $NCZH_{essai}$ est la zone de couverture du nuage dans la section d'essai en m et U_{essai} est la vitesse en m/s dans la section d'essai.

La figure 2.11 illustre l'enveloppe théorique de la teneur en eau liquide pour une rampe au centre. Il est à noter que ce graphique permet de donner une idée de départ quant aux valeurs

de pression et de débit à utiliser pour obtenir une valeur de LWC prédéterminée. Bien entendu, celle-ci dépend beaucoup de la qualité et des caractéristiques de l'écoulement ainsi que du nombre de gicleur ou de rampe en fonction. Auparavant, le tout dépendait aussi de la fréquence d'oscillation de la rampe, mais l'utilisation de trois rampes permet d'ignorer cette spécificité. Il est tout de même important de le mentionner considérant qu'il est toujours possible de se servir du système d'oscillation. Le débit est mesuré en mm à l'aide d'un débitmètre à bille flottante ayant un ratio de 1 mm : 1,453 mL/min.

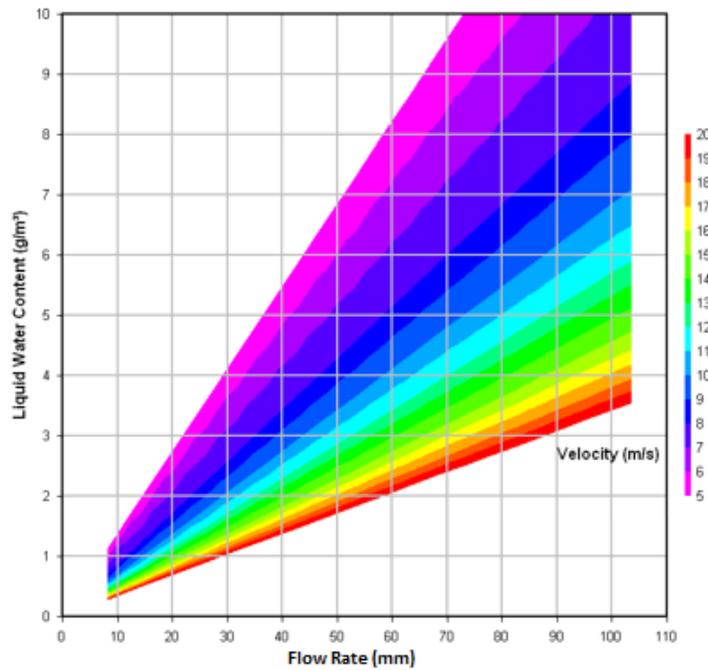


Figure 2.11: Enveloppe théorique de la teneur en eau liquide (Villeneuve et Perron, 2012)

2.2 CARACTÉRISATION DE L'ÉCOULEMENT D'AIR

La soufflerie réfrigérée givrante est un outil utilisé dans le cadre de recherches importantes permettant l'avancement de la science dans le domaine de l'aérospatiale et du givrage. Afin d'obtenir des résultats cohérents, répétitifs et surtout reproductibles, l'écoulement d'air doit être le plus stable et uniforme possible. Pour ce faire, la mesure de plusieurs variables incluant la vitesse, la température et la turbulence est accomplie dans la section d'essai. La section présente une description du système d'acquisition utilisé ainsi que la méthode d'acquisition, en plus d'une description des différents appareils de mesure utilisés.

2.2.1 ACQUISITION DES DONNÉES

Le système d'acquisition de données a été conçu et adapté à plusieurs instruments de mesure. Le tout est utilisé afin de déterminer la stabilité temporelle et l'uniformité spatiale de chacune des caractéristiques de l'écoulement.

Système d'acquisition

Le système d'acquisition est utilisé pour enregistrer chaque essai. Celui-ci est composé d'une carte d'acquisition de National Instrument de modèle PCI-MI016-XE-10. Cette carte d'une vitesse de 100KB/s incluant 16 canaux, est connectée à un ordinateur Lenovo Thinkcenter avec un processeur Intel Core 2 Duo E6550 2,33GHz, 2GB de RAM et Windows XP service pack 3. Le logiciel utilisé pour l'acquisition est en partie le même que pour le contrôle de la vitesse et est présenté à la section 2.1.1. Celui-ci était le programme utilisé avant les travaux de réfection de la soufflerie et est utilisé pour enregistrer la vitesse ainsi que la température contrôlée. Une version modifiée de ce logiciel est utilisée pour la caractérisation

et l'utilisation de l'anémomètre à fil chaud décrit à la section 2.2.2. Toutes les autres données sont enregistrées à l'aide du programme codé en LabView contrôlant aussi un bras automatisé couvrant le plan transversal de la section d'essai tel que décrit en plus amples détails à la section 2.2.1. Ce programme, dont l'interface d'utilisateur est présentée à la figure 2.12, a aussi été conçu au LIMA spécialement pour les travaux présentés dans ce document.

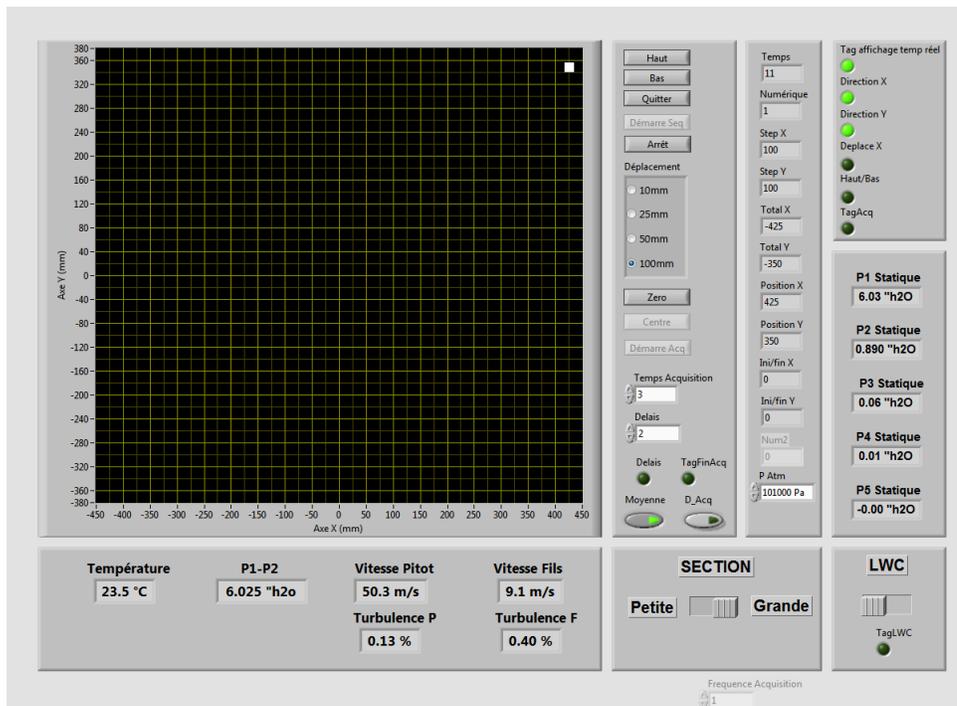


Figure 2.12: Interface de l'utilisateur du programme LabView servant à enregistrer les données brutes ainsi que le contrôle du bras sur ses axes

Stabilité temporelle et uniformité spatiale

Afin de caractériser l'état de l'écoulement d'air dans la soufflerie, il est important de considérer deux méthodes, soit la stabilité temporelle et l'uniformité spatiale. La stabilité temporelle est définie par la variation d'un paramètre quelconque dans le temps et se mesure normalement au centre de la section d'essai. Selon la pratique ARP5905 (SAE International, 2015), la durée minimale de prise de mesure pour un échantillon valable est de 30 secondes.

Il est cependant possible de prendre n'importe quelle valeur supérieure considérant qu'un plus grand échantillon ne pourra qu'améliorer la fiabilité des résultats. Il a donc été décidé de prendre un échantillon de 4 minutes, ou 240 secondes, lors des essais de stabilité temporelle, et ce, afin d'obtenir le plus grand échantillon possible sans perdre trop de temps.

L'uniformité spatiale, quant à elle, est définie par l'uniformité sur l'aire transversale de la section d'essai de la stabilité temporelle des paramètres en chaque point. Tel qu'exigé par la pratique ARP5905 (SAE International, 2015), 75% de la section est couverte afin d'éliminer l'effet des parois (voir figure 2.13). Pour ce faire, un bras de positionnement, présenté à la figure 2.14, est utilisé. Celui-ci peut se déplacer selon deux axes à l'aide d'une courroie d'entraînement ainsi que d'une vis sans fin reliée à deux moteurs pas-à-pas.

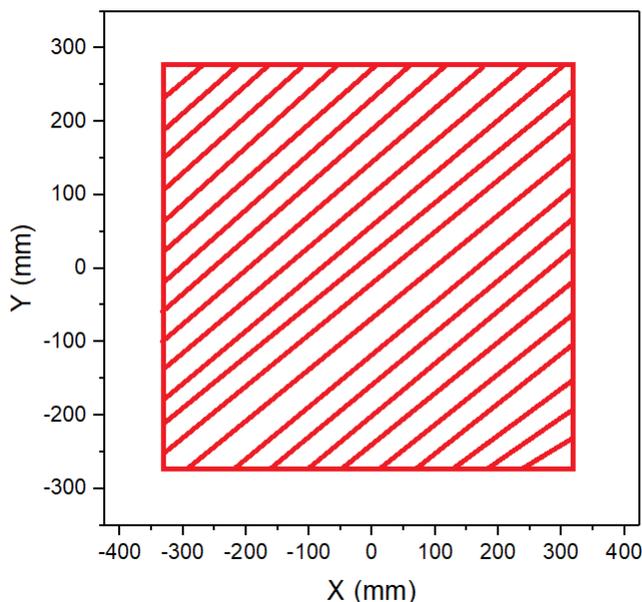


Figure 2.13: Zone de la section considérée lors de l'analyse des résultats

Un programme, dont l'interface est présentée à la figure 2.12, est utilisé pour balayer une grille de points, pouvant être espacé de 100 mm, 50 mm ou 10 mm, selon le plan transversal



Figure 2.14: Montage du bras de positionnement

de la section d'essai. Une fois l'appareil de mesure positionné, le programme d'acquisition attend 3 secondes avant de lancer 30 secondes d'enregistrement, calculant une moyenne pour chaque seconde d'acquisition. Le fichier final est ensuite utilisé à des fins d'analyse. Considérant le temps minimum de 30 secondes d'acquisition et de la taille de la section d'essai à tester, soit 0,91 m par 0,76 m, une résolution de 100 mm entre chaque point a été choisie, donnant un nombre total de 77 points par essais.

2.2.2 APPAREILS DE MESURES

Lors de la caractérisation de l'écoulement de la soufflerie, il est important de mesurer plusieurs caractéristiques incluant la vitesse, l'intensité de la turbulence ainsi que la tempéra-

ture. Ces mesures sont prises à l'aide de capteurs standards. Ces capteurs, reliés au système d'acquisition, sont décrits dans cette section.

Tube de Pitot

La vitesse de l'écoulement d'air est une des caractéristiques les plus importantes lors de l'utilisation d'une soufflerie. Celle-ci est calculée à l'aide de la différence de pression mesurée avec un tube de Pitot conventionnel.

Le tube de Pitot est connecté au système d'acquisition de donnée (section 2.2.1) par un transducteur à pression, soit un microcontact PX163-005BD5V de OMGEGA. Ce transducteur a une incertitude maximale de $\pm 1,0\%$ tel que demandé par la pratique recommandée SAE ARP5905 (SAE International, 2013). Celui-ci mesure la différence de pression totale et statique afin de calculer et afficher la vitesse mesurée à la position du tube dans la section d'essai (voir section 1.3.2)

Anémomètre à fil chaud

Tout comme mentionné à la section 1.3.3, la turbulence est l'effet de la viscosité et de la vitesse de l'écoulement, mesurée dans le cas présent à l'aide d'un anémomètre à fil chaud de modèle 1201-20 de la compagnie TSI (figure 2.15). Il est composé d'un fil cylindrique de quartz d'un diamètre de 50,8 μm et d'une longueur de 1,02 mm enduit d'une mince couche de platine. La sensibilité de la résistance électrique du fil est de $0,0024 \Omega ^\circ\text{C}^{-1}$. La fréquence de réponse du capteur est de 250 000 Hz.

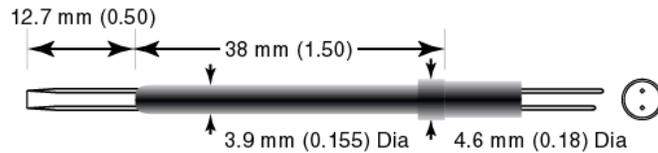


Figure 2.15: Anémomètre à fil chaud TSI 1201-20 (Villeneuve et Perron, 2012)

Le capteur est connecté à un anémomètre à température constante (CTA) IFA-300 de TSI (figure 2.16). Celui-ci équilibre automatiquement un pont de Wheatstone, qui peut mesurer de très faibles variations de résistance électrique. Cela permet à la température du fil chaud de rester constante. L'appareil à une réponse fréquentielle de 300 000 Hz.

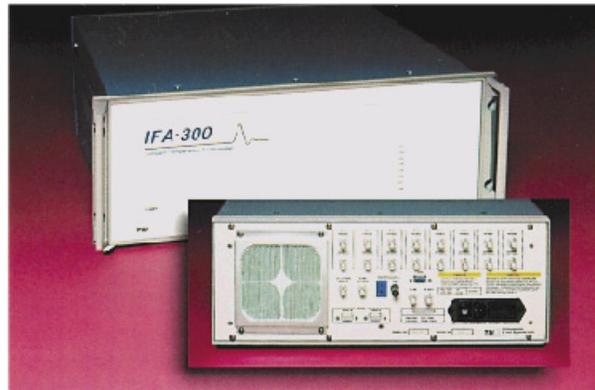


Figure 2.16: Anémomètre à température constante (CTA) IFA-300 (Villeneuve et Perron, 2012)

Les équations utilisées lors du calcul de l'intensité de la turbulence à l'aide des données fournies par l'anémomètre sont présentées en détail à la section 1.3.3. Pour l'ensemble des mesures de turbulence, le taux d'acquisition de la sonde est fixé à 10 000 Hz. De plus, un filtre passe-bas de 5000 Hz est appliqué afin de filtrer le bruit généré par le moteur d'entraînement du système de ventilation. Les vortex créés par la turbulence peuvent varier entre 1 et 100 000 Hz cependant, selon l'expérience de Fortin et Perron (2007), les vortex mesurés sont de l'ordre de 2 000 Hz. Il est donc raisonnable de dire que les vortex les plus énergétiques seront sous 5 000 Hz et que ceux à plus haute fréquence ne contribuent pas de façon significative. Pour ces raisons, le filtre passe-bas n'a pas d'effet majeur sur les résultats.

Afin de déterminer l'incertitude de la mesure de l'anémomètre à fil chaud, Jørgensen explique qu'il faut inclure l'incertitude générée par les paramètres suivant : l'anémomètre (dérive du signal, bruit, répétabilité et réponse en fréquence), l'étalonnage de l'équipement, la linéarisation des données, la résolution de la carte d'acquisition, la position de la sonde, la variation de température, la variation de pression ambiante et la composition de l'air (humidité).

Le tableau 2.1 présente le bilan de toutes les incertitudes, leur calcul ainsi que leur facteur de couverture recommandé par Jørgensen afin d'obtenir un intervalle de confiance de 95%.

Concernant l'anémomètre, le seul facteur pouvant être considéré comme significatif lors du calcul d'incertitude est le bruit à haute fréquence. Celui-ci étant complètement coupé par le filtre passe-bas mentionné précédemment, il est possible de ne pas l'inclure dans la mesure.

L'étalonnage de la sonde quant à elle est une source majeure d'incertitude. L'incertitude générée est de nature stochastique, c'est-à-dire qui obéit aux lois de probabilité et statistique, et suit une distribution normale. Pour un étalonnage à l'aide d'un tube de Pitot, l'écart standard relatif à une vitesse supérieure à $2m/s$ est de $\pm 2\%$.

Une autre source d'incertitude provient de l'algorithme d'ajustement de courbe lors de la linéarisation par le logiciel. Cette incertitude est tout comme la précédente de nature stochastique et suit une distribution normale.

L'incertitude liée à la résolution de la carte d'acquisition quant à elle dépend du calibre de signal d'entrée E_{AD} , de la résolution n en bits, de la vitesse V et du facteur de sensivité $\frac{\delta V}{\delta E}$ (Jørgensen, 2002).

Quelques causes d'incertitudes expérimentales existent pour l'anémomètre à fil chaud. La position de la sonde est l'une d'entre elles et l'incertitude typique peut être considérée selon Jørgensen comme étant de 1° . Cette incertitude est de nature stochastique et suit une distribution carrée.

La variation de la température pendant l'étalonnage et pendant les expérimentations produit des erreurs systématiques. Cela est dû au changement de la température du fil chaud par rapport à l'air ambiant. Cette incertitude est de nature stochastique et suit une distribution rectangulaire. Dans l'équation du tableau 2.1, T_w est la température de la sonde et T_0 est la température ambiante. La variation de la température a aussi un impact sur la densité de l'air et produit une incertitude supplémentaire. Considérant que les deux incertitudes sont interreliées, elles doivent être additionnées arithmétiquement avant d'être additionnées géométriquement avec les autres incertitudes (Jørgensen, 2002).

La pression ambiante a un impact sur la densité de l'air et donc sur la vitesse mesurée. Celle-ci crée une incertitude de nature stochastique ayant une distribution rectangulaire (Jørgensen, 2002).

Enfin, la composition de l'air, plus spécifiquement l'humidité, produit une incertitude de nature stochastique suivant une distribution rectangulaire. L'influence sur le transfert de chaleur est négligeable considérant que $\frac{\delta V}{\delta P_{wv}} \approx 0,01 \cdot V$ pour chaque $1kPa$ de variation de la pression de vapeur d'eau P_{wv} (Jørgensen, 2002).

Tableau 2.1: Évaluation des incertitudes relatives standards des différentes sources d'erreur lors de l'utilisation de l'anémomètre à fil chaud

Source de l'incertitude	Donnée entrante	Valeur	Variance relative	Facteur de couverture
	Δx_i	Δx_i	$\frac{1}{U} \cdot \Delta y_i$	k
Étalonnage	2%	ΔU_{Cal}	$2 \cdot STDV(100 \cdot \Delta U_{Cal})$	2
Linéarisation	0,5%	ΔU_{Lin}	$2 \cdot STDV(100 \cdot \Delta U_{Lin})$	2
Résolution	10V 12bit	$\frac{E_{AD}}{n}$	$\frac{1}{V} \cdot \frac{E_{AD}}{2^n} \cdot \frac{\delta V}{\delta E}$	$\sqrt{3}$
Position	1°	θ	$1 - \cos(\theta)$	$\sqrt{3}$
Variation température	1°C	ΔT	$\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta T}{(T_w - T_0)} \cdot \left(\frac{A}{B} \cdot V^{-0,5} + 1\right)$	$\sqrt{3}$
Variation densité (température)	1°C	ΔT	$\frac{\Delta T}{273}$	$\sqrt{3}$
Pression ambiante	10kPa	ΔP	$\frac{P_0}{P_0 + \Delta P}$	$\sqrt{3}$
Humidité	1kPa	ΔP_{wv}	$\frac{1}{V} \cdot \frac{\delta V}{\delta P_{wv}} \cdot \Delta P_{wv}$	$\sqrt{3}$

Le contenu du tableau 2.1 est ensuite utilisé afin de calculer l'incertitude relative étendue U . L'équation 2.3 est utilisée.

$$U(U_{echantillon}) = 2 \cdot \sqrt{\sum \left(\frac{1}{k} \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i \right)^2} \quad (2.3)$$

Le tableau 2.2 montre les résultats de l'équation 2.3 en fonction de la vitesse de l'air dans la soufflerie. L'incertitude absolue a ensuite été calculée.

Tableau 2.2: Incertitudes de l'anémomètre à fil chaud en fonction de la vitesse de l'écoulement d'air dans la soufflerie

Vitesse (<i>m/s</i>)	Incertitude relative étendue (%)	Incertitude absolue (<i>m/s</i>)
5	5	±0,13
10	4	±0,20
20	4	±0,40
30	4	±0,60
40	4	±0,80

L'incertitude relative reste donc similaire d'une vitesse à l'autre tout en permettant un plus grand écart absolu à haute vitesse.

Thermocouple

La température de l'écoulement d'air ainsi que sa stabilité temporelle et son uniformité spatiale autant au niveau du contrôle que de la caractérisation est mesurée à l'aide de thermocouples de type T, CF-000-T-4-60-1, 1/16" de diamètres d'OMEGA (figure 2.17). Comme spécifié dans la pratique recommandée SAE ARP5905, les thermocouples ont une précision de 1,5% sous 0°C, ce qui correspond à une incertitude maximale de ±0,45°C (SAE International, 2013).

Comme tout thermocouple, ceux-ci mesurent la température totale de l'écoulement. Le calcul de la température statique est donné à la section 1.3.1 et est automatiquement calculé par le système d'acquisition présenté à la section 2.2.1.

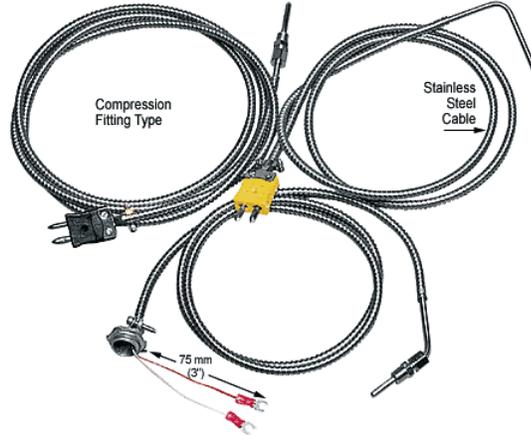


Figure 2.17: Thermocouples CF-000-T-4-60-1 d'OMEGA (Villeneuve et Perron, 2012)

Sonde à cinq trous

Afin de mesurer l'angle d'attaque de l'écoulement, une sonde à cinq trous L-5HP-ehrn45 (figure 2.18), conceptualisée sur mesure, est utilisée. Cette sonde a été produite et étalonnée par la compagnie Vectoflow GmbH, spécialement pour les vitesses demandées soit : $Ma = 0,018$ ($6m/s$), $Ma = 0,06$ ($20m/s$), $Ma = 0,12$ ($41m/s$) et $Ma = 0,29$ ($99m/s$). La sonde est calibrée dans une soufflerie en boucle ouverte dont l'écoulement a été minutieusement mesuré et calibré. Cette sonde permet de mesurer les différences de pression dans les quatre directions du plan transversal à la section d'essai, tel qu'illustré à la figure 2.19. Le tableau 2.3 présente l'erreur maximale lors de l'étalonnage. Celle-ci est $0,78^\circ$ pour une mesure à $Ma = 0,018$, $0,22^\circ$ pour une mesure à $Ma = 0,06$, $0,18^\circ$ pour une mesure à $Ma = 0,12$ et $0,09^\circ$ pour une mesure à $Ma = 0,29$. La pratique recommandée demande une incertitude maximale de $\pm 0,25^\circ$ (SAE International, 2015). Malgré que la sonde respecte un angle maximal de $0,5^\circ$ pour trois des quatre conditions, celui obtenu pour la mesure à $Ma = 0,018$ est trop haut. Due à la nature de l'étalonnage, la vitesse ainsi que les limites de l'appareil, la mesure sera prise tout de même. Cependant, il est important de garder en tête que les valeurs calculées de vitesse et d'angle, à basse vitesse, seront moins précises.

Tableau 2.3: Évaluation de l'incertitude des différentes conditions demandée lors de l'étalonnage de la sonde à cinq trous

Nombre de Mach	Erreur maximale du tangage (°)	Erreur maximale du lacet (°)	Erreur maximale de la vitesse (m/s)
0,018	0,78	0,66	0,1
0,06	0,21	0,14	0,1
0,12	0,18	0,03	0,1
0,29	0,09	0,07	0,1

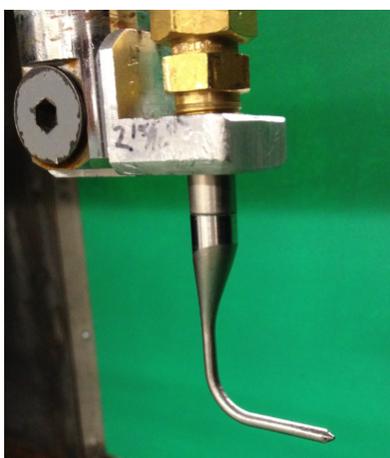


Figure 2.18: Sonde à cinq trous produite sur mesure

La sonde à cinq trous est rattachée au système d'acquisition de données décrit à la section 2.2.1 à l'aide de cinq transmetteurs de différentiel de pression PX277-30D5V d'OMEGA. Les différences de pression mesurées sont utilisées, comme démontré à la section 1.3.4, afin de produire un vecteur représentant l'angle d'attaque de l'air sur la sonde dans les deux directions du plan transversal au point mesuré. Dans le cas présent, un code LabView a été écrit et ajouté au programme d'acquisition décrit à la section 2.2.1, pour travailler conjointement avec un logiciel spécialisé conçu par la compagnie qui a produit la sonde afin de calculer, à l'aide de leurs fichiers d'étalonnage fournis, les valeurs de vitesse et d'angle à partir des pressions enregistrées lors de l'essai. Le logiciel calcule à partir des fichiers d'étalonnage

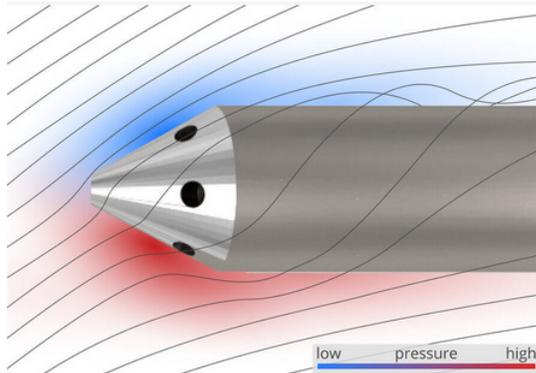


Figure 2.19: Démonstration graphique du fonctionnement de la sonde à cinq trous (Vectroflow GmbH, 2017a)

une courbe de régression représentant la relation selon les deux axes des pressions et des vitesses. Les composantes de la vitesse forment un vecteur permettant la détermination de l'angle de l'écoulement.

La sonde est utilisée selon des plans de référence précis. Le logiciel de calcul donne les angles selon le système de coordonnées de la figure 2.20 où le point d'origine est au bout de la sonde. Les composantes de la vitesse sont représentées par les lettres u , v et w selon les axes x , y et z respectivement. La variable α représente l'angle de tangage (rotation autour de l'axe y) et β représente l'angle de lacet (rotation autour de l'axe z). D'autres angles utiles au cours de l'analyse qui sont données par le logiciel sont l'angle du cône (entre l'axe x et le vecteur de vitesse V) et l'angle de roulis (rotation autour de l'axe x) donnés respectivement par θ et ϕ .

2.3 MESURE DU SYSTÈME DE GIVRAGE

Afin de produire un nuage givrant, la soufflerie réfrigérée est équipée du nuage givrant présenté à la section 2.1.2. La section suivante présente les instruments de mesure ainsi que

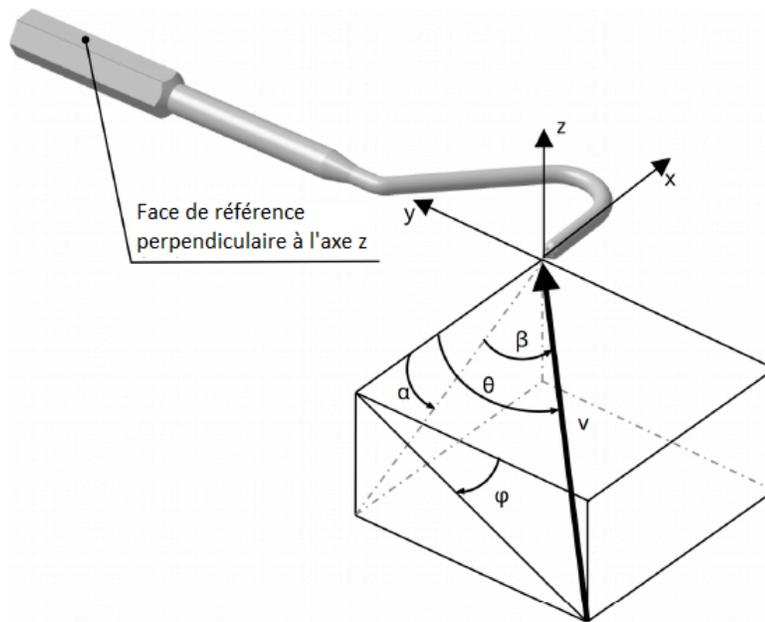


Figure 2.20: Système de coordonnées et position des plans de références standards (Vectoflow GmbH, 2017b)

les techniques utilisés dans le cadre de la caractérisation du nuage givrant incluant la teneur en eau liquide (LWC) ainsi que la taille des gouttes (MVD).

2.3.1 APPAREILS DE MESURE DE TENEUR EN EAU LIQUIDE

Le facteur le plus important dans la création d'un nuage givrant est la teneur en eau liquide ou «Liquid Water Content» (LWC). La pratique recommandée ARP5905 (SAE International, 2015) propose plusieurs méthodes alternatives permettant la mesure de ce paramètre. Cette section portera sur les différentes méthodes utilisées dans le cadre du projet incluant le cylindre rotatif, le profil aérodynamique ainsi que la sonde King.

Cylindre rotatif

La méthode du cylindre rotatif est normalement utilisée lors de la mesure du LWC dans les plus petites sections d'essai comme celle utilisée dans la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA. Le cylindre d'aluminium utilisé, présenté à la figure 2.21, possède un diamètre de 26,5 mm et est positionné à la hauteur de la rampe centrale dans la section d'essai. Celui-ci tourne à une vitesse de 1 RPM permettant à la glace de s'accumuler sur le pourtour de sa surface. La teneur en eau liquide est calculée comme démontré à la section 1.6.2 (voir la section C.2.1 à la page 188 pour une description détaillée), plus précisément avec l'équation 1.29.

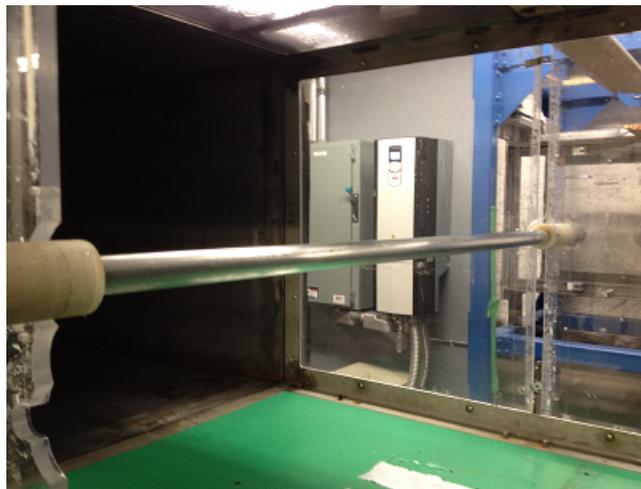


Figure 2.21: Montage utilisé lors de la mesure du LWC à l'aide d'un cylindre rotatif

Profil aérodynamique

La méthode du profil aérodynamique est simple. Un profil NACA0012 présenté à la figure 2.22 est installé dans la section d'essai à la hauteur de la rampe centrale à un angle d'attaque de 0° . Le profil fait 10 cm (4 po) de profondeur et 41 cm (16 po) de largeur. La teneur en eau liquide est calculée comme démontré à la section 1.6.2 (voir la section C.2.2 pour une description détaillée).

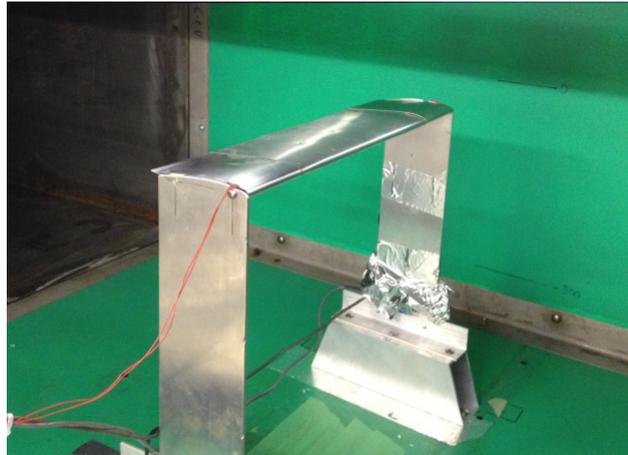


Figure 2.22: Montage utilisé lors de la mesure du LWC à l'aide du profil aérodynamique

L'épaisseur de la glace est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse à tous les 25,4 mm (1 po). Le coefficient d'efficacité de captation au point de stagnation du profil en question a été calculé lors de travaux antérieurs en utilisant l'équation 1.31 et est présenté à la figure 2.23.

Appareil LWC-200

L'appareil LWC-200 (figure 2.24) est une implémentation d'un instrument communément appelé sonde King par son inventeur, Warren King. Cet appareil est utilisé afin de mesurer la teneur en eau liquide d'un nuage givrant autant sur un avion que dans la recherche associée. Le LWC-200 opère selon les principes décrits à la section 1.6.2. En résumé, la teneur en eau liquide, ou LWC, peut être calculé à partir de la chaleur relâchée lorsque les gouttes d'eau du nuage sont vaporisées au contact de l'appareil. La sonde observe l'augmentation de la puissance requise pour maintenir le fil chaud à une température constante de 125°C. Cette puissance peut être associée à la perte de chaleur par convection produite par l'écoulement d'air ainsi que la vaporisation de l'eau qui entre en contact avec le fil chaud (Droplet Measurement Technologies, 2013).

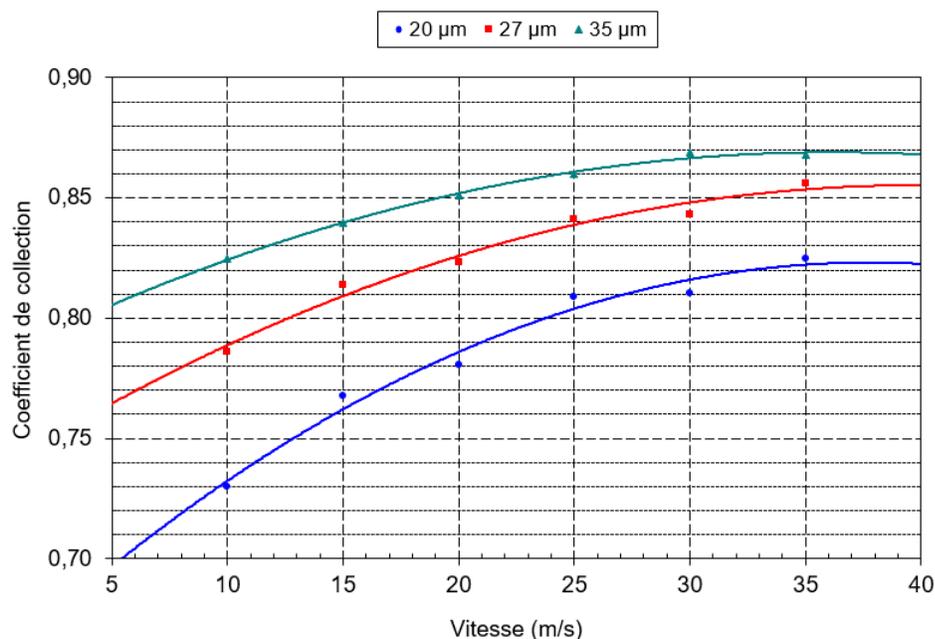


Figure 2.23: Coefficient d'efficacité de captation du profil utilisé en fonction de la vitesse et du MVD

Le fil chaud ou fil de détection est présenté à la figure 2.25. Cette partie de l'appareil doit faire face à l'écoulement d'air. Pour son utilisation lors de conditions givrantes, la sonde LWC-200 est équipée de bandes chauffantes à l'intérieur de sa boîte d'aluminium, empêchant l'accumulation de glace sur l'appareil pouvant fausser les résultats. Le LWC est ensuite calculé à l'aide des données recueillies par le système d'acquisition en suivant les équations de la section 1.6.2. Une description détaillée du calcul est disponible en annexe à la section C.2.3.

L'appareil LWC-200 est utilisé conjointement avec un bras de positionnement contrôlé par le système d'acquisition décrit à la section 2.2.1. Le bras, présenté à la figure 2.26, possède une vis sans fin, deux rails ainsi que deux moteurs pas-à-pas permettant la navigation selon le plan transversal. Il diffère du système utilisé par l'ensemble des autres instruments que par la position du bras, soit sur le côté de la section d'essai à la place du haut. La raison pour l'utilisation de ce bras est simple : il permet l'utilisation du LWC-200, qui est impossible



Figure 2.24: Tête de la sonde LWC-200 (gauche) ainsi que son unité de traitement de signal (droite) (Droplet Measurement Technologies, 2013)

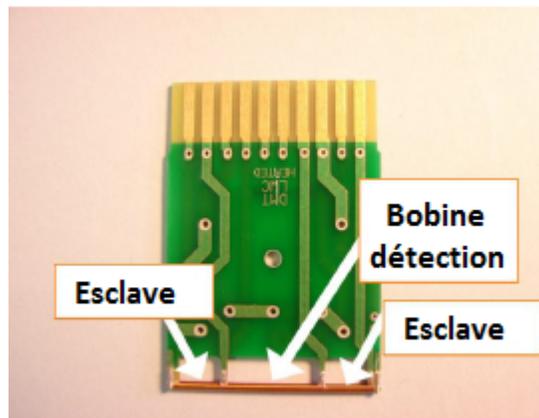


Figure 2.25: Fil chaud (Droplet Measurement Technologies, 2013)

à rattacher au système habituel dû à ses dimensions. De plus, le plus large tube permet à l'ensemble des fils nécessaires au fonctionnement de l'appareil de se rendre à celui-ci.

2.3.2 *DIAMÈTRE DES GOUTTES*

Le but principal du système de givrage est de produire un nuage givrant ayant des propriétés le plus stables possible. La taille des gouttelettes obtenue par atomisation d'eau par de l'air sous pression est le deuxième facteur le plus important dans l'accomplissement de cette tâche. Cette valeur, appelée MVD ou diamètre volumétrique médian, est utilisée afin de

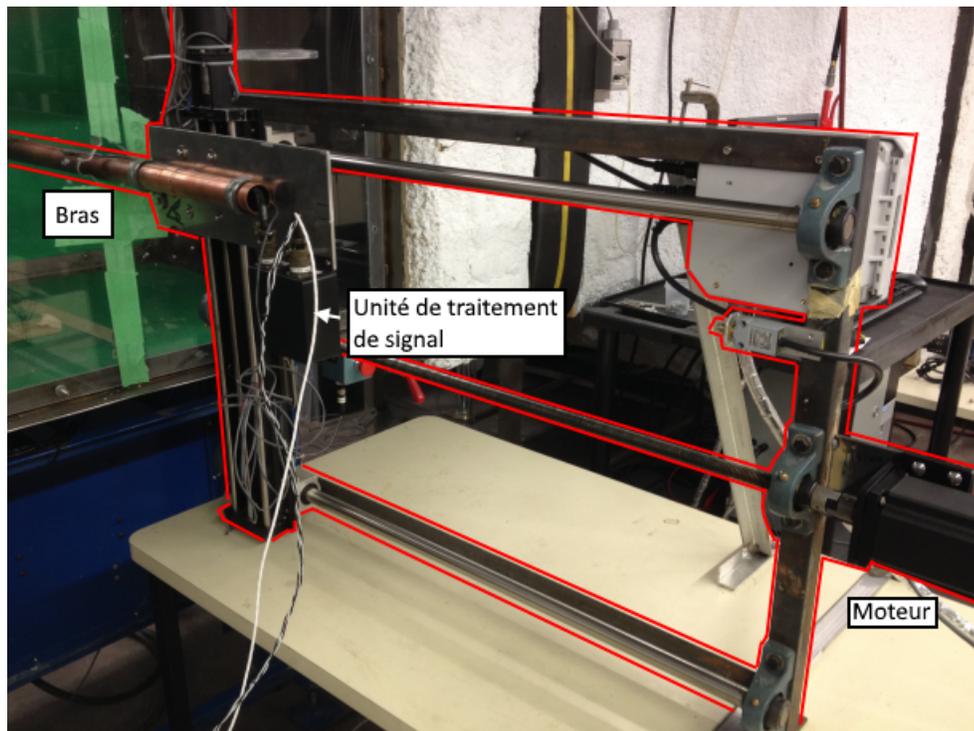


Figure 2.26: Bras utilisé lors de l'utilisation du LWC-200

calculer la teneur en eau liquide et définit en partie le type de givre obtenu dans la section d'essai.

Méthode de mesure

Le diamètre volumétrique médian des gouttes d'eau contenues dans le nuage produit par le système de givrage est principalement fonction de la pression d'air ainsi que le débit d'eau dans les gicleurs. Celui-ci est mesuré selon la méthode de la lamelle couverte d'huile de silicone. Cette méthode consiste à couvrir d'une mince couche d'huile de silicone sur une lamelle de verre qui est subséquemment exposée au nuage d'eau dans la soufflerie, opérant à une vitesse de 15 m/s et une température de 20°C. La lamelle de 3 po de long et 1/4 po de large est insérée dans la soufflerie à l'aide d'une tige d'aluminium. Celle-ci est exposée

pendant un court laps de temps qui dépend de la densité du nuage. Les gouttelettes restent emprisonnées dans le film d'huile ce qui permet de les mesurer (figure 2.27). Cette pratique est en accord avec le document SAE AIR4906 (SAE International, 2013).



Figure 2.27: Exemple de captation de gouttelette vu au microscope (Villeneuve et Perron, 2012)

Les lamelles sont ensuite observées et photographiées sous un microscope digital labo DG20 de 1,3 mega pixel (figure 2.28). Ces photos sont ensuite analysées à l'aide d'un logiciel d'analyse d'image dgsoft proMED v5.06 pour mesurer le diamètre de chacune des gouttelettes captées.



Figure 2.28: Microscope et ordinateur utilisés lors de la mesure des gouttes

le logiciel permet de mesurer manuellement le diamètre des gouttelettes sur l'image tout en les comptant. Les données recueillies sont ensuite analysées afin d'obtenir une distribution avec des intervalles de 6 μm . Le MVD, calculé selon les équations de la section 1.6.3, est le diamètre à la fréquence cumulative de 50%, tel que démontré à la figure 2.29.

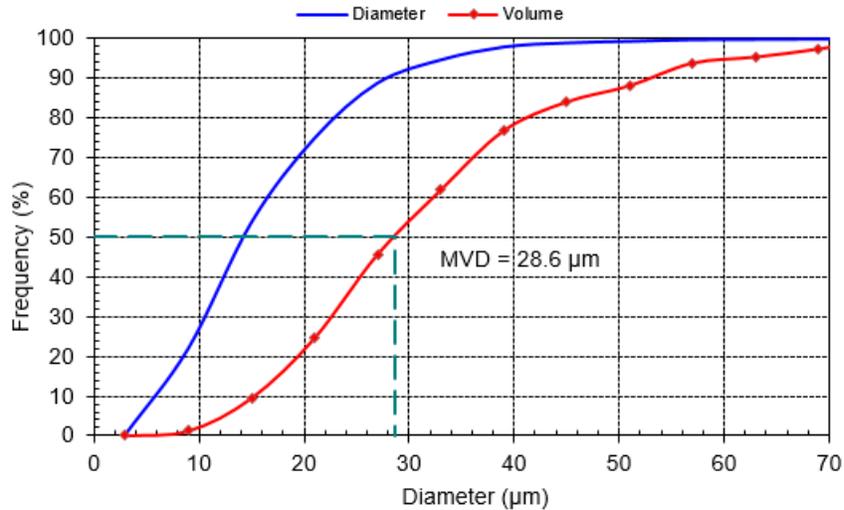


Figure 2.29: Diamètre des gouttelettes en fonction de la fréquence cumulative (Villeneuve et Perron, 2012)

Table de relation du diamètre des gouttes

Un graphique représentant les valeurs expérimentales de MVD obtenu sous différentes conditions a déjà été produit dans les travaux antérieurs du LIMA (Fortin et Perron, 2007). Il est possible de réutiliser ce graphique (figure 2.30) considérant que les gicleurs ainsi que les valeurs de pression n'ont pas changé et que le MVD est indépendant du nombre de gicleurs.

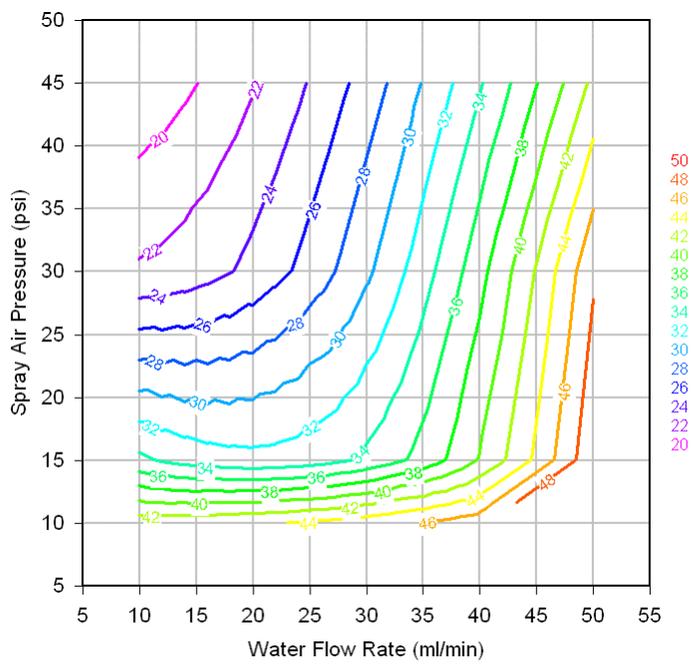


Figure 2.30: Valeurs de MVD mesurées selon la pression d'air et le débit d'eau dans les gicleurs (Fortin et Perron, 2007)

CHAPITRE 3

ESSAIS DE CARACTÉRISATION AÉRODYNAMIQUE ET THERMODYNAMIQUE

La première partie de ce projet inclut une caractérisation complète de l'écoulement d'air dans la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA en accord avec la pratique recommandée ARP5905 (SAE International, 2015).

3.1 PLANIFICATION DES ESSAIS

L'instrumentation détaillée à la section 2.2 a été utilisée dans le cadre de la caractérisation aérodynamique et thermodynamique de l'écoulement de la soufflerie réfrigérée givrante du LIMA. Celle-ci inclut :

- Une distribution de la vitesse ;
- Une distribution de la température ;
- Une distribution de l'intensité de la turbulence ;
- Une courbe de correction de la vitesse à la ligne centrale ;
- Une distribution de l'angle de l'écoulement.

Le tableau 3.1 présente les objectifs des performances dans la section d'essai devant être rencontrés par chacun des paramètres à évaluer. Celui-ci est séparé en deux sections : les essais aérodynamiques et les essais de turbulence. Pour ce qui est de la température, la deuxième ligne a été utilisée considérant que la température minimale à évaluer est au-dessus de -30°C . Quant aux deux variations de la turbulence, les mêmes essais sont accomplis avec la pression d'air des gicleurs au maximum et à zéro, d'où le $P_a - on$ et $P_a - off$. L'altitude n'est pas pertinente pour les travaux accomplis considérant que la soufflerie n'est pas pressurisée.

Tableau 3.1: Objectifs des performances dans la section d'essai (SAE International, 2015)

	Incertitude maximale de la mesure	Stabilité temporelle à la ligne centrale	Uniformité spatiale	Valeur limite
Paramètres aérodynamiques				
Vitesse de l'air	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 1\%$	N/A
Température statique sous -30°C	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	N/A
Température statique de -30°C à 5°C	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	N/A
Angle de l'écoulement	$\pm 0,25^{\circ}$	N/A	$\pm 2^{\circ}$	$\pm 3^{\circ}$
Turbulence de l'écoulement				
$P_a - off$	$\pm 0,25\%$	$\pm 2,00\%$	$< 2,00\%$	2,00%
$P_a - on$	$\pm 0,25\%$	$\pm 2,00\%$	$< 2,00\%$	5,00%
Pression d'altitude	$\pm 50\text{m}$	$\pm 50\text{m}$	N/A	N/A

3.1.1 MISE EN SERVICE

Une série d'essais de mise en service a d'abord été accomplie afin de connaître les limites du système et permettre certaines décisions quant aux paramètres évalués. Celle-ci inclut :

- Une vérification de la vitesse de l'écoulement d'air minimale et maximale ;
- Une série de mesure de vitesse de l'écoulement d'air contrôlé en fonction de la mesure au centre afin de définir une courbe de correction, tel que défini à la section 1.3.2 ;
- Une vérification des limites thermiques du système de réfrigération à basse et à haute vitesse ;
- Une vérification préliminaire de la forme du nuage givrant permettant de positionner adéquatement les rampes de gicleurs dans la soufflerie.

Les essais de mise en service devront suivre le protocole détaillé en annexe à la section A.1.

3.1.2 ESSAIS AÉRODYNAMIQUES ET THERMODYNAMIQUES

Tel que présenté au tableau 3.2, les essais aérodynamiques ont été accomplis pour cinq vitesses différentes avec la pression d'air des gicleurs à zéro et au maximum, le tout à 20°C. Les essais thermodynamiques, quant à eux, ont été accomplis à quatre températures différentes, aux cinq vitesses proposées dans la caractérisation des paramètres aérodynamiques et avec la pression d'air des gicleurs à zéro et au maximum. La pression d'air est appliquée à tous les gicleurs des 3 rampes. De plus, il est important de noter que les essais de températures doivent

être accomplis seulement si la vitesse le permet, c'est-à-dire si le système de réfrigération est en mesure de garder constante indéfiniment une température cible à une vitesse quelconque.

Tableau 3.2: Plan des essais de stabilité temporelle et uniformité spatiale des paramètres aérodynamiques et thermodynamiques

Paramètre	Vitesse de l'air (m/s)	Température de l'air (°C)	Pression d'air des rampes (psi)
Vitesse	5/10/20/30/40	20	0/40
Turbulence	5/10/20/30/40	20	0/40
Angle	5/10/20/30/40	20	0/40
Température	5/10/20/30/40	-5/-10/-15/-20	0/40

Le protocole expérimental détaillé pour les différents essais de caractérisation est disponible en annexe à la section A.2.1.

3.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

3.2.1 MISE EN SERVICE

À la suite des travaux accomplis sur la soufflerie, les limites du système étaient inconnues, mais nécessaires à la formulation d'un plan de travail. Lors de ces essais préliminaires, les limites du système ont été définies expérimentalement. La vitesse maximale est facilement trouvée en ajustant la fréquence du moteur à son maximum. De cette façon, il a été possible de définir la vitesse maximale, soit lorsque la fréquence du moteur est de 60 Hz, à 50 m/s pour la grande section. La température, quant à elle, nécessite un peu plus de travail. Le système de réfrigération a été ajusté à la température minimale, soit -50°C, suivi de l'enregistrement de la vitesse sur quelques heures, et ce, à différentes valeurs. Cette méthode a permis de déterminer la valeur de température en régime permanent pour plusieurs valeurs de vitesse se trouvant à

la figure 3.1. Les essais ont été accomplis à 20, 30, 35 et 50 m/s. La zone foncée (rouge) est la zone définie comme adéquate.

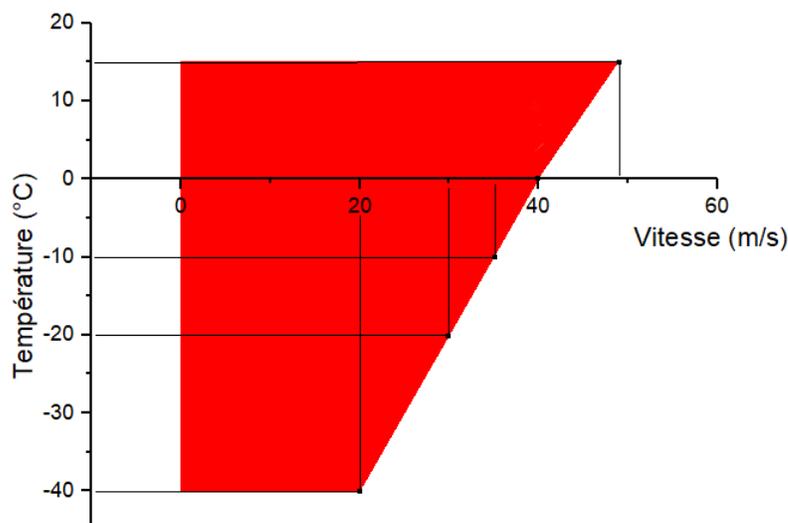


Figure 3.1: Températures limites en régime permanent mesurées expérimentalement lors des essais de mise en service

Suite à plusieurs discussions avec les gens concernés sur les conditions d'utilisation de la soufflerie lors de travaux généraux, une zone d'essais a été définie et est présentée en pâle (jaune) à la figure 3.2. La section de la partie pâle (jaune) sortant des limites pourra être utilisée si nécessaire, mais demandera un protocole différent avec une limite de temps associée, considérant que toutes valeurs en dehors ne pourront pas être maintenues indéfiniment, seulement temporairement.

Considérant que la mesure de vitesse enregistrée lors d'essai normal est prise à l'aide de capteur de pression sur les parois de la soufflerie et l'impossibilité d'avoir un tube de Pitot constamment au centre, une courbe de correction est demandée dans la pratique ARP5905 (SAE International, 2015). Un total de 60 points pour des vitesses variant de 5 m/s jusqu'à

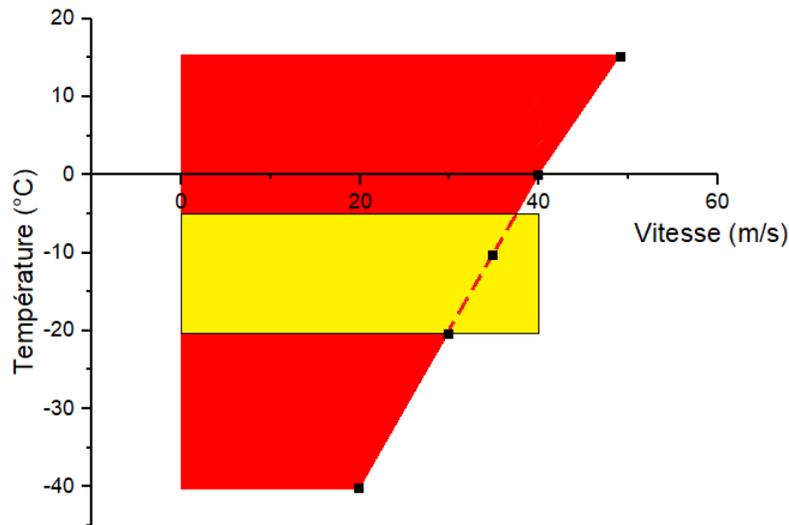


Figure 3.2: Zone d'essai définie pour les travaux de caractérisation

45 m/s a été enregistré afin d'obtenir les résultats de la figure 3.3. La courbe de régression polynomiale de degré 3 (équation 3.1) est obtenue à l'aide de la méthode des moindres carrés.

$$f(x) = 0,97 - 9,36x^2 + 8,40x^3 \quad (3.1)$$

À partir des résultats de la figure 3.3, il est possible de remarquer que la correction nécessaire à des vitesses supérieures à 25 m/s est négligeable et que la correction avant 25 m/s est en majorité inférieure à l'erreur maximale permise de la mesure. Les essais aéronautiques étant à vitesse plus élevée et considérant la nature de l'écoulement à basse vitesse ainsi que la précision de l'appareil de contrôle, il est difficile d'améliorer le rapport de la mesure centrale à la mesure sur la paroi sans produire une erreur significativement supérieure à celle présente à haute vitesse.

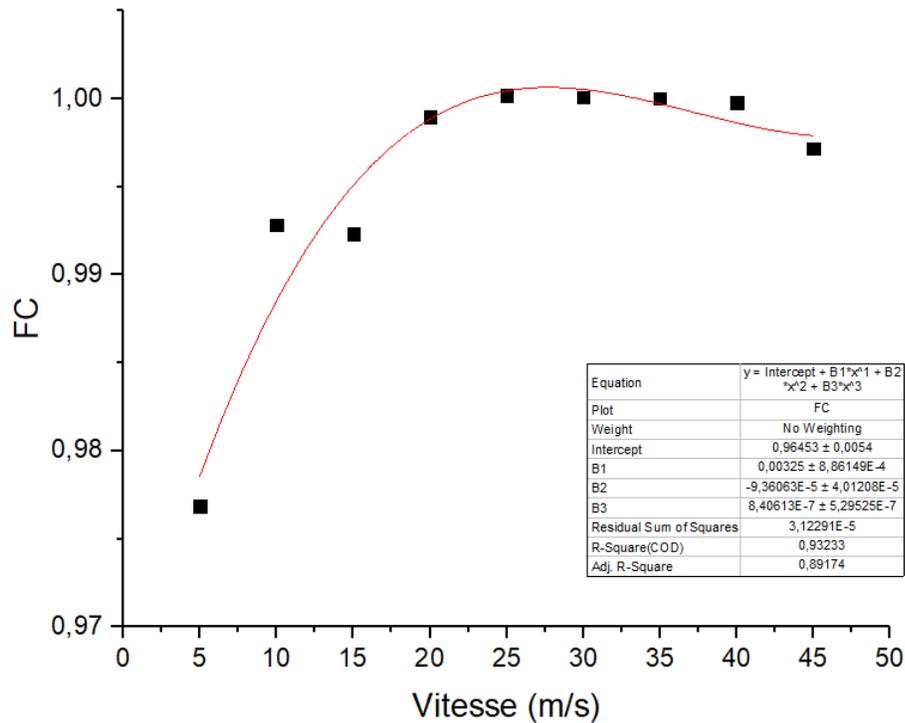


Figure 3.3: Facteur de correction (FC) en fonction de la vitesse

Enfin, avant de commencer les essais de caractérisation, un dernier paramètre reste à être vérifié, soit la position des rampes de gicleurs dans la section du convergent. Les rampes de gicleurs ont été placées de manière à permettre à l'eau d'atteindre le point de surfusion lors de son déplacement vers la section d'essai. La rampe centrale a été centrée avec la section d'essai et les deux autres rampes ont été positionnées de manière à couvrir le plus de surface possible tout en produisant un nuage givrant uniforme (voir figure 3.4). La méthode de la grille a été utilisée à cet effet. Cette méthode consiste à placer un grillage dans la section d'essai et le soumettre au nuage givrant pendant un certain laps de temps et à différentes vitesses. Par la suite, l'épaisseur de glace est mesurée sur chaque branche permettant de produire un profil du nuage givrant dans la section. Le tout est réalisé selon la pratique recommandée ARP5905 (SAE International, 2015). Les essais ont été accomplis à 5 m/s, 20 m/s et 35 m/s à

une température de -18°C , assez froide pour être sous la limite de Schuman-Ludlam soit, la température critique à laquelle l'entièreté de l'eau accumulée gèle au contact de la surface exposée (Fortin et Perron, 2007).

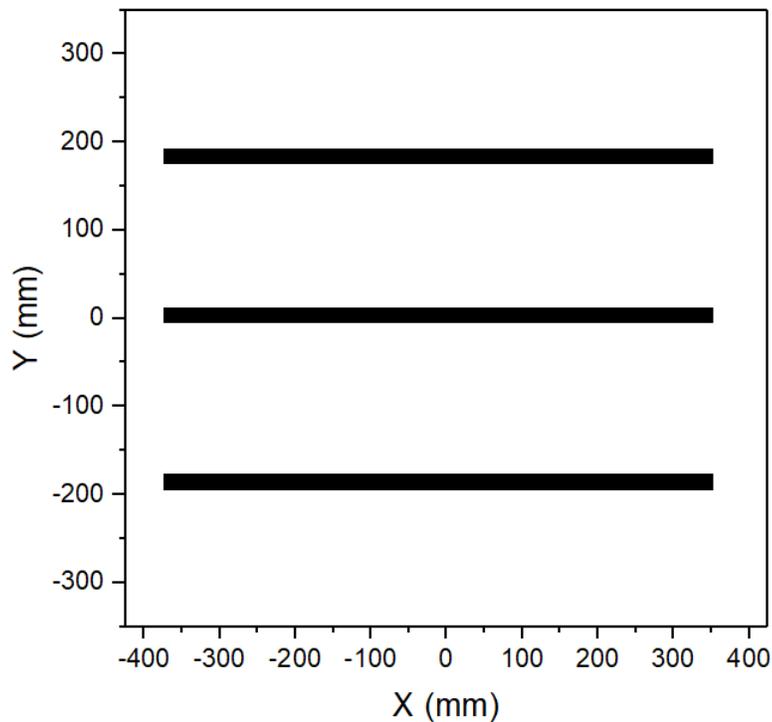


Figure 3.4: Position des rampes de gicleurs vue de la section d'essai

3.2.2 CARACTÉRISATION AÉRODYNAMIQUE

Suite aux essais mentionnés à la section 3.1.2, les résultats ont été compilés dans des tableaux afin de les analyser et de les comparer aux valeurs cibles. La section suivante présente ces résultats dans lesquels les valeurs mesurées dans la soufflerie (IWT) y sont mentionnées ainsi que les paramètres contrôlés tels que la température des compresseurs (T_{comp}). Les résultats détaillés sont disponibles en annexe à la section B.1.

Vitesse

La mesure de la vitesse à la ligne centrale de la section d'essai présentée au tableau 3.3, présentant la stabilité temporelle de la vitesse de l'écoulement à différentes valeurs de vitesse, peut être considérée comme stable. La vitesse cible étant à $\pm 2\%$ et la valeur maximale à $\pm 1\%$. On observe une meilleure stabilité aux vitesses les plus élevées, ce qui est attendu considérant que les écarts sont relatifs à la valeur de la vitesse.

Quant à l'uniformité spatiale (tableau 3.4), une variation importante à 5 m/s avec les gicleurs activés est observée. Il est normal d'avoir une plus grande variation à basse vitesse considérant que les écarts sont relatifs à la valeur de la vitesse et qu'une faible variation paraît plus importante à 5 m/s qu'à 40 m/s. Concernant les gicleurs, ceux-ci créent de la turbulence dans l'écoulement de façon irrégulière sur la section transversale. De plus, les valeurs sont trop élevées et il est difficile à cette étape d'en donner la raison exacte.

Tableau 3.3: Stabilité temporelle de différentes valeurs de vitesse à la ligne centrale à 20°C avec et sans gicleur

Stabilité temporelle de la vitesse de l'écoulement										
Test	Vitesse		Pression	Température			Stabilité Temporelle			
	IWT (m/s)		Gicleur (PSI)	IWT (°C)		T _{comp} (°C)	V _{min} (m/s)	V _{max} (m/s)	Mesuré	Cible
1	4,86	±0,02	0	18,7	±0,2	20	4,81	4,91	±1%	±2%
13	10,28	±0,01	0	18,7	±0,2	17	10,28	10,31	±0%	
15	20,02	±0,03	0	20,0	±0,1	15	19,89	20,08	±0%	
17	30,03	±0,06	0	20,0	±0,1	12	29,88	30,17	±0%	
11	39,82	±0,04	0	19,8	±0,1	0	39,65	39,92	±0%	
19	5,49	±0,02	40	19,8	±0,1	17	5,36	5,46	±1%	
21	9,99	±0,02	40	22,0	±0,0	17	9,99	10,04	±0%	
23	20,07	±0,03	40	20,8	±0,2	17	20,07	20,13	±0%	
25	29,91	±0,06	40	20,1	±0,1	12	29,75	30,04	±0%	
27	40,04	±0,04	40	19,5	±0,0	0	39,93	40,14	±0%	

Tableau 3.4: Uniformité spatiale de différentes valeurs de vitesse à la ligne centrale à 20°C avec et sans gicleur

Uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement										
Test	Vitesse		Pression	Température			Uniformité Spatiale			
	IWT (m/s)		Gicleur (PSI)	IWT (°C)		T _{comp} (°C)	V _{min} (m/s)	V _{max} (m/s)	Mesuré	Cible
10	5,25	±0,05	0	19,98	±0,30	16	5,11	5,38	±3%	±2%
14	10,22	±0,08	0	19,70	±0,38	17	10,05	10,37	±2%	
16	19,96	±0,18	0	20,00	±0,13	15	19,55	20,32	±2%	
18	29,94	±0,29	0	19,91	±0,09	12	29,33	30,51	±2%	
12	39,72	±0,38	0	19,68	±0,37	0	38,96	40,49	±2%	
20	5,22	±0,20	40	19,82	±0,32	17	4,78	5,50	±7%	
22	9,79	±0,15	40	21,73	±0,97	17	9,48	10,03	±3%	
24	19,96	±0,20	40	20,59	±0,38	17	19,49	20,37	±2%	
26	29,94	±0,30	40	20,39	±0,13	12	29,27	30,54	±2%	
28	39,92	±0,39	40	19,52	±0,18	0	39,93	40,73	±1%	

Turbulence

La mesure de la stabilité temporelle de la turbulence à la ligne centrale de la section d'essai en fonction des différentes vitesses est présentée au tableau 3.5. Pour la turbulence en particulier, deux facteurs sont pris en considération, soit l'uniformité et la valeur maximale. Les résultats détaillés sont disponibles en annexe à la section B.2.

L'analyse de la stabilité temporelle de la turbulence montre que celle-ci est stable et dans les normes. Il est attendu que l'utilisation des gicleurs produit de la turbulence dans la section d'essai considérant qu'il s'agit d'une injection d'air sous pression ayant des caractéristiques différentes à l'écoulement. C'est pourquoi la tolérance avec gicleur ouvert est plus permissive.

L'uniformité spatiale est présentée au tableau 3.6 en fonction des différentes valeurs de vitesse d'écoulement.

Tableau 3.5: Stabilité temporelle de l'intensité de la turbulence à différentes valeurs de vitesse à la ligne centrale à 20°C avec et sans gicleur

Stabilité temporelle de l'intensité de la turbulence													
Test	Vitesse		Pression	Température		Turbulence		Stabilité		Valeurs extrêmes			
	IWT (m/s)		Gicleur (PSI)	IWT (°C)	T _{comp} (°C)	Intensité (%)		Mesuré	Cible	Minimum	Maximum	Max Alloué	
29	4,58	±0,02	0	19,7	±0,2	19	1,66	±0,06	±0,21%	±2,00%	1,50%	1,93%	2,00%
31	9,65	±0,01	0	21,6	±0,0	19	1,15	±0,08	±0,18%		0,97%	1,33%	
33	19,92	±0,04	0	19,5	±0,2	15	0,92	±0,03	±0,10%		0,84%	1,03%	
35	29,75	±0,07	0	20,2	±0,1	12	0,78	±0,03	±0,08%		0,70%	0,86%	
37	39,77	±0,09	0	20,2	±0,2	0	0,82	±0,02	±0,07%		0,76%	0,90%	
39	5,34	±0,02	40	20,0	±0,0	19	3,34	±0,19	±0,63%	±2,00%	2,87%	4,13%	5,00%
41	10,02	±0,08	40	20,0	±0,7	17	2,03	±0,06	±0,21%		1,84%	2,26%	
43	19,87	±0,04	40	20,1	±0,1	15	1,85	±0,14	±0,37%		1,66%	2,39%	
45	29,88	±0,07	40	20,3	±0,1	12	1,08	±0,41	±0,10%		0,98%	1,19%	
47	39,95	±0,05	40	20,1	±0,1	0	0,95	±0,03	±0,07%		0,88%	1,02%	

Tableau 3.6: Uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à différentes valeurs de vitesse à la ligne centrale à 20°C avec et sans gicleur

Uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence													
Test	Vitesse		Pression	Température		Turbulence		Uniformité		Valeurs extrêmes			
	IWT (m/s)		Gicleur (PSI)	IWT (°C)	T _{comp} (°C)	Intensité (%)		Mesuré	Cible	Minimum	Maximum	Max Alloué	
53	4,87	±0,05	0	20,3	±0,2	19	2,77	±0,31	1,09%	<2,00%	2,47%	3,56%	2,00%
50	9,99	±0,08	0	20,0	±0,5	18	2,04	±0,26	0,92%		1,75%	2,68%	
51	19,77	±0,16	0	19,9	±0,5	15	1,75	±0,23	0,92%		1,49%	2,41%	
56	29,43	±0,27	0	20,6	±0,1	12	1,34	±0,16	0,56%		1,17%	1,73%	
58	39,32	±0,29	0	19,5	±0,9	0	1,27	±0,14	0,54%		1,12%	1,66%	
52	5,12	±0,22	40	19,3	±0,4	19	4,54	±0,58	2,14%	<2,00%	3,44%	5,58%	5,00%
54	10,17	±0,19	40	20,1	±0,5	17	2,47	±0,31	1,31%		1,99%	3,30%	
55	20,08	±0,19	40	19,8	±0,6	15	1,82	±0,24	0,88%		1,61%	2,49%	
57	29,74	±0,29	40	20,8	±0,1	12	1,34	±0,15	0,34%		1,40%	1,74%	
59	39,63	±0,36	40	20,1	±0,1	0	1,27	±0,14	0,55%		1,11%	1,65%	

L'intensité de la turbulence est sous la cible à toutes les conditions sauf à 5 m/s (essai 52) lorsque les gicleurs sont actifs. Comme mentionné dans la section sur la vitesse, ceux-ci

créent de la turbulence dans l'écoulement de façon irrégulière sur la section transversale, ce qui fait en sorte que l'écoulement sera plus turbulent lors de l'utilisation de gicleurs.

Pour ce qui est de la valeur maximale, celle-ci est plus problématique considérant que la moitié des essais (essais 50 à 53) sans gicleurs sont hors norme. Parallèlement, puisque l'utilisation des gicleurs permet des valeurs minimum et maximum plus permissives, l'intensité de la turbulence avec gicleurs reste dans les normes plus facilement, et ce, malgré l'augmentation visible de l'intensité de la turbulence de 2,02% à 5m/s et de 0,63% à 10m/s.

À plus haute vitesse, soit 20m/s, 30m/s et 40m/s, les gicleurs semblent avoir un effet négligeable sur l'intensité de la turbulence maximum considérant les valeurs très similaires entre les deux expérimentations. En effet, la différence entre les mesures sont tous en dessous de l'incertitude de la sonde soit une différence de 0,08% à 20m/s, 0,01% à 30m/s et 0,01% à 40m/s.

Il serait possible de corriger en partie le problème en redressant l'écoulement à l'aide de mesures telles qu'un grillage positionné avant les gicleurs et la section du convergent. Ces mesures correctives seraient bénéfiques considérant l'importance d'une faible intensité de turbulence lors des mesures en soufflerie (Manshadi, 2011).

Angle de l'écoulement

L'angle de l'écoulement est présenté au tableau 3.7 selon les coordonnées présentées à la figure 2.20 à la page 90.

Tableau 3.7: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à différentes valeurs de vitesse à la ligne centrale à 20°C avec et sans gicleur

Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement														
Test	Vitesse		Pression	Température			Uniformité Spatiale						Cible	Max Alloué
	IWT (m/s)	Gicleur (PSI)	IWT (°C)	T _{comp} (°C)	Angle α_{min} (°)	Angle α_{max} (°)	Mesuré (α)	Angle β_{min} (°)	Angle β_{max} (°)	Mesuré (β)				
160	4,93	±2,43	0	21,4	±0,2	17	-14,36	-0,67	±6,85°	-15,09	-1,05	±7,02°	±2,00°	±3,00°
162	10,57	±0,38	0	20,9	±0,3	17	-3,36	0,40	±1,88°	-1,66	-0,32	±0,67°		
164	20,32	±0,68	0	19,7	±0,5	15	-1,51	3,24	±2,37°	-1,37	0,23	±0,80°		
166	29,84	±0,94	0	19,8	±0,6	12	-1,12	3,56	±2,34°	-3,58	0,50	±2,04°		
168	39,84	±1,19	0	20,8	±0,4	0	-1,22	3,40	±2,31°	-1,04	0,78	±0,91°		
161	5,40	±2,43	40	21,8	±0,2	17	-39,48	-3,38	±18,05°	-31,42	-1,18	±15,12°		
163	10,64	±0,38	40	20,8	±0,3	17	-3,95	-0,02	±1,96°	-3,17	-0,15	±1,51°		
165	20,42	±0,65	40	20,6	±0,2	15	-1,90	3,43	±2,67°	-1,34	0,31	±0,82°		
167	29,50	±0,92	40	20,7	±0,2	12	-1,15	3,46	±2,30°	-3,51	0,64	±2,07°		
169	39,87	±1,18	40	20,7	±0,2	0	-1,34	3,42	±2,38°	-1,04	0,72	±0,88°		

Ce tableau présente les différentes vitesses d'écoulement pour chacun des essais ainsi que la température contrôlée dans la soufflerie et la température contrôlée des compresseurs. Le vecteur de vitesse V y est présenté ainsi que la disposition des angles α , β , θ et ϕ selon le système de coordonnées cartésiennes. Le tableau 3.7 démontre que l'écoulement se dirige principalement vers l'extérieur de la boucle de la soufflerie considérant l'angle α important pour l'ensemble des essais. Les résultats détaillés sont disponibles en annexe à la section B.3.

L'angle β est moins problématique, mais présente tout de même une variation importante vers le bas, probablement causé par la composante gravitationnelle qui est accentuée par la turbulence. Il est difficile d'avoir une mesure stable à basse vitesse et particulièrement lors de l'activation des gicleurs. À haute vitesse, soit plus de 20 m/s, l'effet des gicleurs est à peine perceptible et peut être inclus dans l'erreur de la mesure. L'angle important vers l'extérieur pourrait être corrigé partiellement à l'aide de mesures de redressement de l'écoulement en amont de la soufflerie. La même action réduirait la turbulence. Il serait aussi possible d'ajuster les vannes de virage dans le dernier coin avant la section d'essai afin de redresser l'écoulement d'air lors du virage. L'angle de l'écoulement semble être le facteur avec le plus grand écart

jusqu'à maintenant et devrait être corrigé considérant son importance sur l'incertitude des mesures aérodynamiques prises en soufflerie. De plus, il a été démontré dans les travaux de Kim et Kim (2013) et Lindgren et Johanson (2002), que le nombre de Reynolds est directement lié à l'incertitude de la mesure d'une sonde bidirectionnelle telle qu'utilisée dans la présente étude.

3.2.3 CARACTÉRISATION THERMODYNAMIQUE

La température étant par nature un processus plus lent à réagir que la vitesse, il est à prévoir que la stabilité temporelle à la ligne centrale, présentée au tableau 3.8, est dans les normes. Il est cependant un peu plus difficile d'atteindre la stabilité à basse vitesse considérant les faibles apports en chaleur et le temps de réaction du système de contrôle. Cependant, lors de l'analyse, plusieurs essais étaient significativement hors norme de plusieurs degrés. La figure 3.5 démontre un exemple de ces essais où les points rouge représente les données aberrantes.

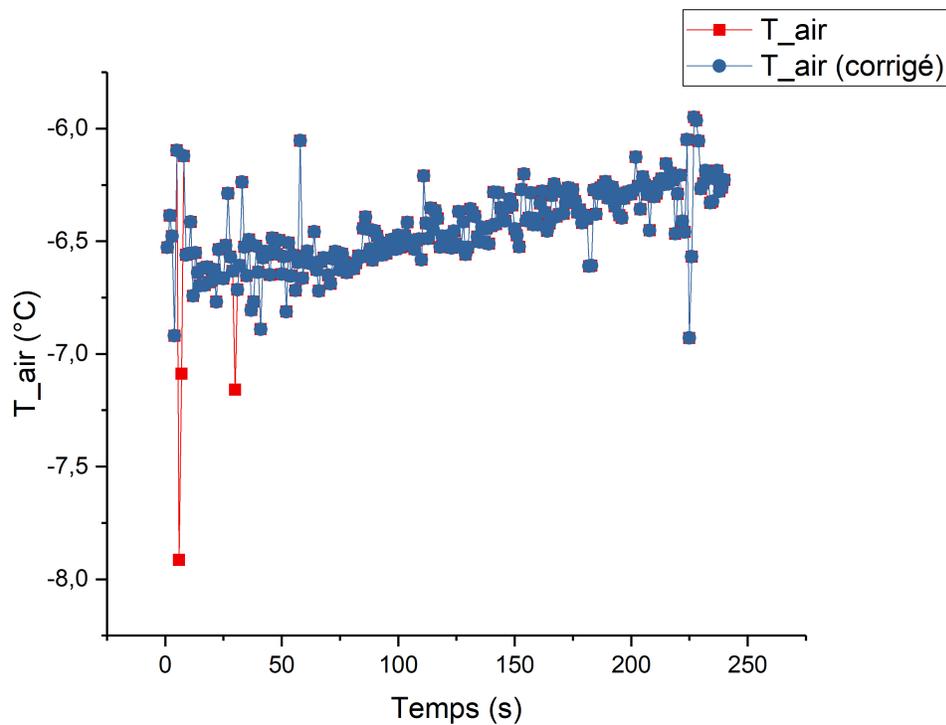


Figure 3.5: Exemple de données aberrantes lors de l'acquisition de la température

Tableau 3.8: Stabilité temporelle de la température pour différentes valeurs de vitesse et de température à la ligne centrale avec et sans gicleur

Stabilité temporelle de la température										
Test	Vitesse		Pression	Température			Stabilité Temporelle			
	IWT (m/s)		Gicleur (PSI)	IWT (°C)		T _{comp} (°C)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Mesuré (°C)	Cible
60	5,08	±0,12	0	-6,7	±0,3	-8	-7,4	-6,7	±0,3	±0,5°C
64	10,13	±0,23	0	-6,6	±0,1	-10	-6,8	-6,4	±0,2	
68	20,24	±0,07	0	-6,5	±0,1	-15	-6,7	-6,4	±0,2	
72	30,40	±0,17	0	-6,3	±0,1	-20	-6,5	-6,0	±0,2	
62*	4,82	±0,23	40	-6,4	±0,2	-8	-6,9	-5,9	±0,5	
66	10,26	±0,09	40	-6,5	±0,1	-10	-6,8	-6,3	±0,2	
70	19,93	±0,09	40	-6,5	±0,1	-15	-6,7	-6,3	±0,2	
74*	30,18	±0,16	40	-6,3	±0,1	-20	-6,7	-5,9	±0,4	
76	5,39	±0,11	0	-11,7	±0,1	-13	-12,0	-11,4	±0,3	±0,5°C
80	10,16	±0,09	0	-11,6	±0,1	-15	-11,8	-11,3	±0,2	
84	19,90	±0,20	0	-11,4	±0,1	-20	-11,6	-11,2	±0,2	
88*	29,62	±0,20	0	-11,3	±0,1	-25	-11,6	-11,1	±0,2	
78*	4,98	±0,90	40	-11,7	±0,2	-13	-12,1	-11,3	±0,4	
82	10,09	±0,30	40	-11,4	±0,1	-15	-11,6	-11,1	±0,3	
86	19,84	±0,15	40	-11,4	±0,1	-20	-11,4	-11,1	±0,2	
90*	29,81	±0,21	40	-11,2	±0,1	-25	-11,5	-11,0	±0,3	
92	4,67	±1,20	0	-16,6	±0,1	-18	-16,8	-16,3	±0,3	±0,5°C
94	9,81	±0,52	0	-16,5	±0,1	-20	-16,7	-16,3	±0,2	
100*	20,28	±0,17	0	-16,4	±0,1	-25	-16,7	-15,9	±0,4	
98	4,63	±1,16	40	-16,7	±0,1	-18	-16,9	-16,4	±0,3	
96*	9,80	±0,12	40	-16,6	±0,1	-20	-16,9	-16,3	±0,3	
102*	20,14	±0,13	40	-16,4	±0,1	-25	-16,6	-16,1	±0,3	
104	4,88	±0,39	0	-21,8	±0,0	-25	-22,0	-21,7	±0,1	±0,5°C
108	9,32	±0,12	0	-21,7	±0,1	-25	-22,1	-21,4	±0,4	
106	4,35	±1,06	40	-21,7	±0,2	-25	-21,7	-21,3	±0,2	
110*	9,67	±0,34	40	-21,5	±0,2	-25	-21,9	-21,0	±0,4	

Les essais hors normes semblaient être aléatoires et donnaient des variations allant jusqu'à 10°C en un soixantième de seconde. Afin de s'assurer qu'il s'agissait bien d'une erreur d'acquisition, le critère de Chauvenet a été appliqué afin d'éliminer les données aberrantes avec un intervalle de confiance supérieur à 99.98%.

Le critère de Chauvenet est une méthode effectuée pour détecter une éventuelle erreur dans la prise de donnée. Ce critère permet de donner une validité scientifique à la décision d'ignorer des valeurs jugées suspectes. La moyenne et l'écart type sont d'abord calculés. Ensuite, le nombre (z-score) d'écarts types (σ_x) pour lesquelles les valeurs suspectes (x_k) s'éloignent de la moyenne (\bar{x}) est calculé (équation 3.2).

$$z - score = \frac{|x_k - \bar{x}|}{\sigma_x} \quad (3.2)$$

Ensuite, la probabilité selon une distribution normale d'obtenir la valeur x_k est déterminée. Le nombre théorique de valeurs n_k est calculé en multipliant par la probabilité. La donnée peut enfin être éliminée selon le critère de Chauvenet si $n_k < 0,5$ (Barnett et Lewis, 1994). La figure 3.6 montre un exemple incluant 10 des 240 données d'un essai à -15°C. Le critère a été appliqué à deux reprises sur toutes les séries afin d'éliminer avec certitude les données aberrantes. Au total, 9 des 26 séries ont présenté des données fautives. Les séries concernées sont identifiées d'une étoile (*) dans le tableau 3.8. Ainsi, on peut conclure hors de tout doute que la température mesurée à la ligne centrale est stable dans le temps selon les critères de la pratique ARP5905 (SAE International, 2013).

Pour ce qui a trait à l'uniformité spatiale, la température est considérée uniforme dans la section d'essai puisque les mesures sont comprises dans la cible de $\pm 1^\circ\text{C}$, tel que démontré

	Original	Passage #1			Passage #2		
Moyenne	-16,390624	-	-	-16,370524	-	-	-16,372724
Écart type	0,33363223	-	-	0,1817081	-	-	0,1238662
N	240	-	-	237	-	-	231
Temps (s)	T _{air} (°C)	Z-score	Décision	T _{air} (°C)	Z-score	Décision	T _{air} (°C)
1	-16,14244	0,743885	-	-16,14244	1,2552232	-	-16,14244
2	-16,33817	0,157221	-	-16,33817	0,1780558	-	-16,33817
3	-17,3734	2,9456866	-	-17,3734	5,5191597	Aberrante	-
4	-16,51454	0,371415	-	-16,51454	0,792567	-	-16,51454
5	-16,34246	0,1443626	-	-16,34246	0,1544465	-	-16,34246
6	-16,31346	0,2312846	-	-16,31346	0,3140432	-	-16,31346
7	-16,30029	0,2707592	-	-16,30029	0,3865221	-	-16,30029
8	-16,36874	0,0655932	-	-16,36874	0,0098189	-	-16,36874
9	-16,24073	0,4492791	-	-16,24073	0,7143006	-	-16,24073
10	-16,4346	0,1318098	-	-16,4346	0,3526306	-	-16,4346

Passage #1	
Population (N)	240
Interval de confiance	0,99895833
Z-score max	3,07808807
Points enlevés	1,25%

Passage #2	
Population (N)	237
Interval de confiance	0,99894515
Z-score max	3,07433772
Points enlevés	3,75%

Figure 3.6: Exemple d'application du critère de Chauvenet dans Excel

au tableau 3.9. Tout comme les paramètres aérodynamiques, 75% de la zone d'essai (voir figure 2.13) est prise en compte dans le calcul de l'uniformité spatiale.

Tableau 3.9: Uniformité spatiale de la température pour différentes valeurs de vitesse et de température à la ligne centrale avec et sans gicleur

Uniformité spatiale de la vitesse de la température										
Test	Vitesse		Pression	Température			Uniformité Spatiale			
	IWT (m/s)		Gicleur (PSI)	IWT (°C)	T _{comp} (°C)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Mesuré (°C)	Cible	
61	4,33	±1,54	0	-6,0	±0,5	-8	-6,9	-5,7	±0,6	±1,0°C
65	9,96	±0,47	0	-6,5	±0,3	-10	-6,8	-6,4	±0,2	
69	20,04	±0,23	0	-6,4	±0,3	-15	-6,8	-6,4	±0,2	
73	30,29	±0,22	0	-6,2	±0,4	-20	-6,9	-6,2	±0,4	
63	4,06	±1,56	40	-6,3	±0,4	-8	-7,1	-6,0	±0,6	
67	9,98	±0,46	40	-6,5	±0,3	-10	-6,8	-6,4	±0,2	
71	19,74	±0,25	40	-6,4	±0,3	-15	-6,8	-6,4	±0,2	
75	30,07	±0,23	40	-6,2	±0,5	-20	-7,1	-6,1	±0,5	
77	4,81	±1,19	0	-11,3	±1,0	-13	-12,5	-11,0	±0,8	±1,0°C
81	9,93	±0,45	0	-11,2	±0,7	-15	-11,7	-11,2	±0,3	
85	19,81	±0,26	0	-11,2	±0,6	-20	-11,7	-11,2	±0,3	
89	30,11	±0,26	0	-11,0	±0,6	-25	-11,8	-11,0	±0,4	
79	4,71	±1,23	40	-11,2	±0,8	-13	-12,5	-10,6	±0,9	
83	9,88	±0,49	40	-11,2	±0,6	-15	-11,7	-11,2	±0,2	
87	19,68	±0,25	40	-11,2	±0,5	-20	-11,8	-11,3	±0,2	
91	29,63	±0,22	40	-11,0	±0,6	-25	-11,8	-11,0	±0,4	
93	4,18	±1,46	0	-16,0	±1,2	-18	-17,6	-15,7	±1,0	±1,0°C
95	9,66	±0,47	0	-16,1	±0,8	-20	-16,8	-16,2	±0,3	
101	20,52	±0,23	0	-16,1	±0,8	-25	-16,8	-16,1	±0,3	
99	4,45	±1,28	40	-15,9	±0,9	-18	-17,3	-15,8	±0,7	
97	9,56	±0,48	40	-16,1	±0,7	-20	-16,8	-16,2	±0,3	
114	19,5	±0,41	40	-15,4	±0,6	-25	-16,0	-15,4	±0,3	
105	4,23	±1,33	0	-20,9	±1,2	-25	-21,7	-20,9	±0,4	±1,0°C
109	9,88	±0,47	0	-21,1	±1,0	-25	-21,9	-21,3	±0,3	
107	4,10	±1,35	40	-21,1	±1,1	-25	-21,9	-21,1	±0,4	
111	9,95	±0,39	40	-21,1	±0,9	-25	-21,6	-21,2	±0,2	

Ceci dit, on remarque une légère différence entre la température commandée par l'ordinateur et la température mesurée à la ligne centrale tel que démontré au tableau 3.10 et à la figure 3.7. Cet écart, qui est de l'ordre d'environ 2°C, est causé par l'emplacement du thermocouple relié au système de contrôle. En effet, celui-ci est positionné près de la paroi de la soufflerie afin de ne pas interférer avec les essais en cours. On remarque que même dans un intervalle de confiance de 95%, la différence est significative et doit être corrigée. Le tableau 3.10 montre l'envergure de l'échantillon utilisé pour calculer l'intervalle de confiance, suivant une loi de distribution normale.

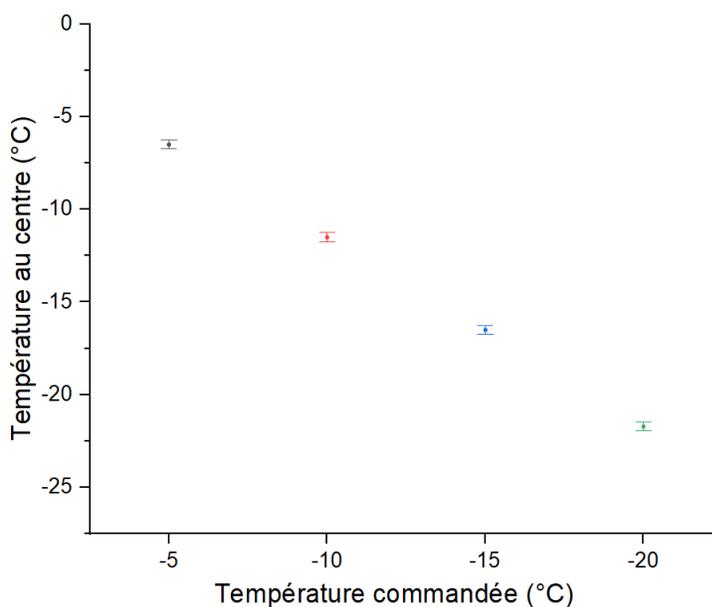


Figure 3.7: Température mesurée en fonction de la température commandée

Tableau 3.10: Correction de la température mesurée au centre de la section d'essai

$T_{commande}$ (°C)	Échantillon n	$T_{moy\ centre}$ (°C)	T_{centre} (°C) (95% CI)	FC
-5	8	-6,5	$\pm 0,1$	0,77
-10	8	-11,5	$\pm 0,1$	0,87
-15	6	-16,5	$\pm 0,1$	0,91
-20	4	-21,7	$\pm 0,1$	0,92

Un facteur de correction, présenté à la figure 3.8, a été calculé à l'aide des données recueillies aux différentes positions dans la section d'essai. Les résultats détaillés sont disponibles en annexe à la section B.4. Un résumé des résultats est aussi disponible au tableau 3.10. La courbe de régression polynomiale de degré 2 (équation 3.3) est obtenue à l'aide de la méthode des moindres carrés et possède un coefficient de détermination de 0,99 ce qui assure une bonne fiabilité.

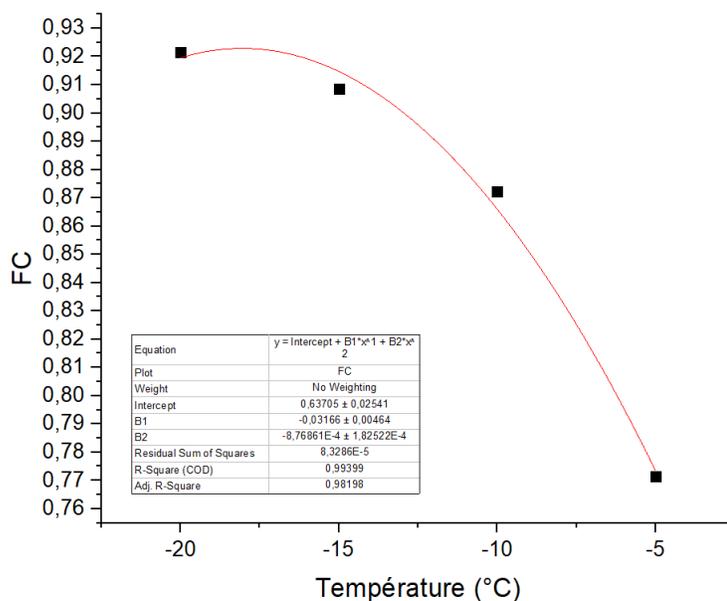


Figure 3.8: Facteur de correction de la température calculée en fonction de la température commandée

$$f(x) = 0,64 - 0,3x - 8,77x^2 \quad (3.3)$$

En appliquant le facteur de correction à la température commandée, il est possible de commander la bonne température à la ligne centrale, et ce, malgré l'impossibilité d'y utiliser un thermocouple en tout temps.

3.2.4 SOMMAIRE

En résumé, le tableau 3.11 présente de manière générale la caractérisation de la soufflerie. Les valeurs extrêmes sont présentées accompagnées de la recommandation de la SAE International entre parenthèses. Les cellules en rouge indiquent une valeur hors norme. Concernant la vitesse, seule l'uniformité spatiale est problématique. La température, quant à elle, est dans les normes, et ce, pour l'ensemble des essais. En ce qui a trait à l'angle de l'écoulement, l'incertitude de la sonde est supérieure à ce que la pratique recommande et l'écart maximum de l'uniformité spatiale et de la valeur limite sont tous les deux en dehors des limites recommandés. La turbulence, de son côté, est problématique au niveau de la valeur limite sans gicleurs et de l'uniformité spatiale en plus de la valeur limite avec gicleurs.

Il est possible d'observer au tableau 5.1 que l'uniformité spatiale de la vitesse ne doit pas dépasser 1% alors qu'elle monte jusqu'à 7%.

Les essais thermodynamiques respectent la pratique recommandée ARP5905 (SAE International, 2015), et ce, dans le cadre des valeurs de température permises malgré les problèmes techniques du système de réfrigération. Il est important de mentionner l'erreur entre la valeur mesurée au centre de la section d'essai et celle fournie au contrôleur qui possède un écart de l'ordre de 2°C. Cette différence a été corrigée par un facteur de correction entre la température à la ligne centrale et la paroi.

L'uniformité spatiale de la turbulence lors de l'utilisation des gicleurs ($P_a - on$) dépasse la valeur demandée par la pratique recommandée de 2,00% avec une valeur de 2,14%. Cependant, en considérant l'incertitude calculée de $\pm 0,22\%$, il est possible de la considérer dans les normes, car celle-ci est inférieure de 0,08% à la valeur maximale admissible. La

turbulence est problématique concernant la valeur maximale admise, soit, 2,00% sans gicleur et 5,00% avec gicleurs avec des valeurs maximales respectives de 3,56% et 5,58%.

L'angle de l'écoulement a une incertitude maximale de $\pm 0,39^\circ$, supérieur à la valeur demandée de $\pm 0,25^\circ$. La pratique recommandée demande $\pm 2,00^\circ$ et $\pm 3,00^\circ$ pour l'uniformité spatiale et la valeur maximale admise. Des valeurs allant jusqu'à $15,12^\circ$ et $-39,48^\circ$ ont été observées lors des essais.

Tableau 3.11: État des performances dans la grande section d'essai de la soufflerie réfrigérée du LIMA

	Incertitude maximale de la mesure	Stabilité temporelle à la ligne centrale	Uniformité spatiale	Valeur limite
Paramètres aérodynamiques				
Vitesse de l'air	$\pm 1\%$ ($\pm 1\%$)	$\pm 1\%$ ($\pm 2\%$)	$\pm 7\%$ ($\pm 1\%$)	N/A
Température statique de -30°C à 5°C	$\pm 0,5^\circ\text{C}$ ($\pm 0,5^\circ\text{C}$)	$\pm 0,4^\circ\text{C}$ ($\pm 0,5^\circ\text{C}$)	$\pm 1,0^\circ\text{C}$ ($\pm 1,0^\circ\text{C}$)	N/A
Angle de l'écoulement	$\pm 0,39^\circ$ ($\pm 0,25^\circ$)	N/A	$15,12^\circ$ ($\pm 2,00^\circ$)	$-39,48^\circ$ ($\pm 3,00^\circ$)
Turbulence de l'écoulement				
$P_a - off$	$\pm 0,08\%$ ($\pm 0,25\%$)	$\pm 0,21\%$ ($\pm 2,00\%$)	$< 1,09\%$ ($< 2,00\%$)	$3,56\%$ ($2,00\%$)
$P_a - on$	$\pm 0,22\%$ ($\pm 0,25\%$)	$\pm 0,63\%$ ($\pm 2,00\%$)	$< 2,14\%$ ($< 2,00\%$)	$5,58\%$ ($5,00\%$)

CHAPITRE 4

ESSAIS DE GIVRAGE

4.1 PLANIFICATION DES ESSAIS

L'instrumentation détaillée à la section 2.2 a été utilisée dans le cadre de la caractérisation et de l'étalonnage du nuage givrant de l'écoulement de la soufflerie réfrigérée du LIMA. Celle-ci inclut :

- Une définition de la grosseur et de l'uniformité du nuage givrant ;
- Un étalonnage de la grosseur des gouttes d'eau (MVD) ;
- Un étalonnage de la teneur en eau liquide (LWC).

Le tableau 4.1 présente les objectifs des performances dans la section d'essai de chacun des paramètres à évaluer. Le LWC (Liquid Water Content) correspond à la teneur en eau liquide et le MVD (Median Volumetric Diameter) à la grosseur des gouttes tel que démontré aux sections 1.6.2 et 1.6.3 respectivement.

Tableau 4.1: Objectifs des performances dans la section d'essai (SAE International, 2015)

	Incertitude maximale de la mesure	Stabilité temporelle à la ligne centrale	Uniformité spatiale	Valeur limite
Uniformité des paramètres du nuage givrant				
LWC	±10%	±20%	±20%	N/A
MVD	±10%	±10%	N/A	N/A
Humidité relative	±3%	N/A	N/A	N/A

4.1.1 ESSAIS DE GIVRAGE

Le tableau 4.2 présente les différents essais à accomplir pour la caractérisation du nuage givrant. Les premiers sont accomplis afin de vérifier la grosseur des gouttes (MVD). En effet, trois points distants les uns des autres dans le graphique de la figure 2.30 (page 98) ont été choisis afin de s'assurer de l'exactitude de celui-ci malgré les changements au système. Les points correspondent à un débit de 15 mm, 30 mm et 45 mm sur l'échelle pour respectivement 45 psi, 30 psi et 15 psi de pression d'air, et ce, pour la rampe centrale. Dans le cas de résultats concluants, la seconde étape incluant les valeurs de débit et de pressions nécessaires à l'étude comparative des appareils et méthodes de mesure du LWC n'aura pas à être accomplie. Cependant, dans le cas où le graphique ne peut être utilisé, ces deux conditions supplémentaires devront être mesurées, permettant ainsi le calcul du LWC pour la méthode du cylindre rotatif. La variété des conditions choisies permettra de quadriller le terrain afin d'obtenir un graphique à jour. De plus, seulement la rampe centrale sera utilisée dans le cadre de cette étude considérant le besoin de comparer avec la méthode du cylindre et du profil aérodynamique. En effet, ceux-ci ne peuvent pas couvrir toute la section contrairement à l'appareil LWC-200.

Tableau 4.2: Plan des essais de givrage pour la grande section

Paramètre	Méthode de mesure	Vitesse de l'air (m/s)	Température de l'air (°C)	Débit d'eau mm	Pression d'air des rampes (psi)
MVD	Huile de silicone	20	20	15/30/45	45/30/15
MVD	Huile de silicone	20	20	30/60	45
LWC	LWC-200	20	20/5/-5	30/60	45
LWC	Profil aérodynamique	20	-18	30/60	45
LWC	Cylindre rotatif	20	-18	30/60	45

Le protocole détaillé pour l'utilisation de la soufflerie est disponible en annexe aux sections A.2.1 pour l'utilisation générale et A.2.2 pour l'utilisation du système de gicleurs.

4.2 ANALYSE ET RÉSULTATS

4.2.1 GROSSEUR DES GOUTTES (MVD)

Le diamètre volumétrique médian (MVD) a été mesuré sous cinq conditions différentes et est présenté au tableau 4.3. Le but premier de l'expérimentation consistait à confirmer la validité d'un graphe (voir figure 2.30 à la page 98) de valeurs théoriques produites lors de travaux antérieurs par Fortin et Perron (2007), afin de l'utiliser lors du calcul des conditions de givrage. Cependant, lors des premiers essais, il était clair que celles-ci ne correspondaient pas aux mesures actuelles considérant d'importants écarts variant de 24% à 66%.

Tableau 4.3: Résultat des mesures de MVD

Débit (mm)	Pression (psi)	Vitesse (m/s)	MVD expérimental (µm)	MVD théorique (µm)	Écart (%)
103	15	20	55	40	36
77	30	20	42	30	40
38	45	20	33	20	66
30	45	20	24	19	24
60	45	20	31	23	35

En effet, il est possible de constater au tableau 4.3 que l'écart relatif entre la valeur théorique et la valeur expérimentale de MVD ne permet pas l'utilisation du graphe pour les essais de teneur en eau. De plus, considérant le temps supplémentaire nécessaire à la création d'un nouveau graphe de référence, seul les valeurs de MVD servant au calcul de la teneur en eau pour l'étude présente ont été mesurées soit 30 mm et 60 mm de débit sur l'échelle. Une étude plus poussée du MVD de la soufflerie sera nécessaire dans le futur considérant l'erreur présentée. Il serait aussi pertinent de considérer une méthode plus rapide et plus fiable que la lamelle et l'huile de silicone sachant que celle-ci varie énormément d'un essai à l'autre et d'un opérateur à l'autre. Il est impossible actuellement de déterminer le temps d'exposition exact, la position exacte de la lamelle dans la section ainsi que la position exacte des échantillons photographiés, ce qui rend la mesure de MVD discutable.

4.2.2 TENEUR EN EAU LIQUIDE (LWC)

Cylindre rotatif

La figure 4.1 présente la visualisation de la teneur en eau liquide mesurée à l'aide du cylindre rotatif, et ce, le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai ($y = 0$). Il est possible d'observer les essais avec l'ensemble des gicleurs de la rampe du centre à 30 mm de débit sur l'échelle (a) et à 60 mm de débit sur l'échelle (b), et ce, selon les paramètres mentionnés au tableau 4.2. Il est important de mentionner que la valeur de teneur en eau liquide n'est qu'une estimation basée sur l'épaisseur de glace et la teneur en eau liquide moyenne calculée lors de l'analyse. Celle-ci sert à la visualisation pour une comparaison subséquente avec les autres méthodes où il est possible de calculer la teneur en eau point par point. De plus, la densité de la glace a été estimée à l'aide du volume moyen de glace mesuré sur le cylindre ainsi que son poids total. La moyenne peut être observée ainsi que sa marge d'erreur incluant un intervalle de confiance de 95%.

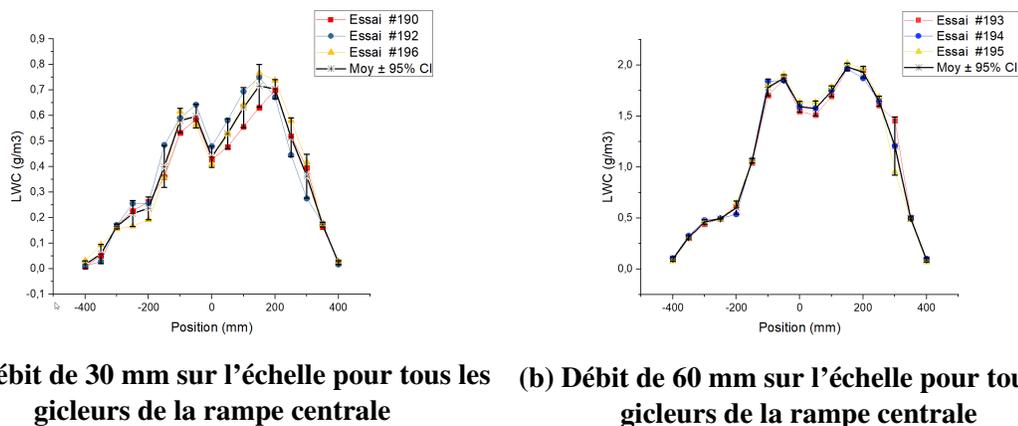


Figure 4.1: Visualisation de la teneur en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide du cylindre rotatif le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à -18°C

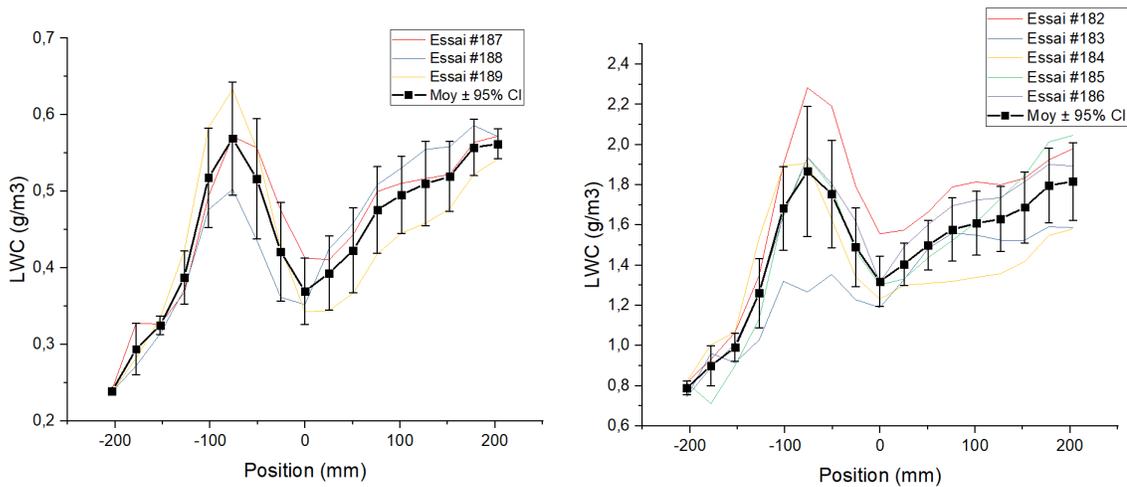
La figure 4.1 montre la bonne répétabilité de la méthode du cylindre rotatif. À 30 mm ainsi qu'à 60 mm de débit sur l'échelle, la marge d'erreur moyenne est de $\pm 0,05\text{g}/\text{m}^3$ ce

qui représente 13% d'erreur relative à la moyenne de LWC de $0,37g/m^3$ à 30 mm contre 5% d'erreur relative à la moyenne de LWC de $1,12g/m^3$ à 60 mm. Ces résultats permettent donc de confirmer la bonne répétabilité de la méthode, et ce, à différentes valeurs de débit d'eau.

Profil aérodynamique

La figure 4.2 présente la teneur en eau liquide mesurée à l'aide du profil aérodynamique en fonction de la position dans la section d'essai. Le profil étant centré, l'essai a été accompli pour la ligne transversale centrée dans la section d'essai ($y=0$). Contrairement à l'analyse avec le cylindre, il est possible de calculer une valeur exacte de LWC pour chaque position permettant de comparer entre les différentes répétitions. Il est aussi pertinent de mentionner que le profil aérodynamique ne couvre pas la largeur complète de la section, seulement 400 mm de celle-ci soit, la largeur du profil. Il est possible d'observer à l'œil la relation similaire entre les essais autant à 30 mm de débit sur l'échelle (a) et à 60 mm de débit sur l'échelle (b), et ce, selon les paramètres mentionnés au tableau 4.2. Comme tous les essais de givrage, la rampe centrale a été utilisée. De plus, la valeur de la densité de glace utilisée a été estimée lors de travaux antérieurs de Fortin et Perron (2007). La moyenne peut être observée ainsi que sa marge d'erreur incluant un intervalle de confiance de 95%.

La figure 4.2 montre qu'à 30 mm de débit sur l'échelle, la marge d'erreur moyenne est de $\pm 0,04g/m^3$ ce qui représente 9% d'erreur relative à la moyenne de LWC de $0,45g/m^3$ à 30 mm. Parallèlement, la marge d'erreur à 60 mm de débit sur l'échelle est de $\pm 0,18g/m^3$ soit 13% d'erreur relative à la moyenne de LWC de $1,47g/m^3$. La marge d'erreur du LWC à 30 mm de débit est similaire à la mesure du cylindre. Cependant, la marge d'erreur est supérieure à 60 mm de débit. Malgré cette hausse, l'erreur relative reste quand même aux alentours de 10% ce qui est acceptable. Plus d'essais ont été accomplis afin de s'assurer qu'il ne s'agissait



(a) Débit de 30 mm sur l'échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale (b) Débit de 60 mm sur l'échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale

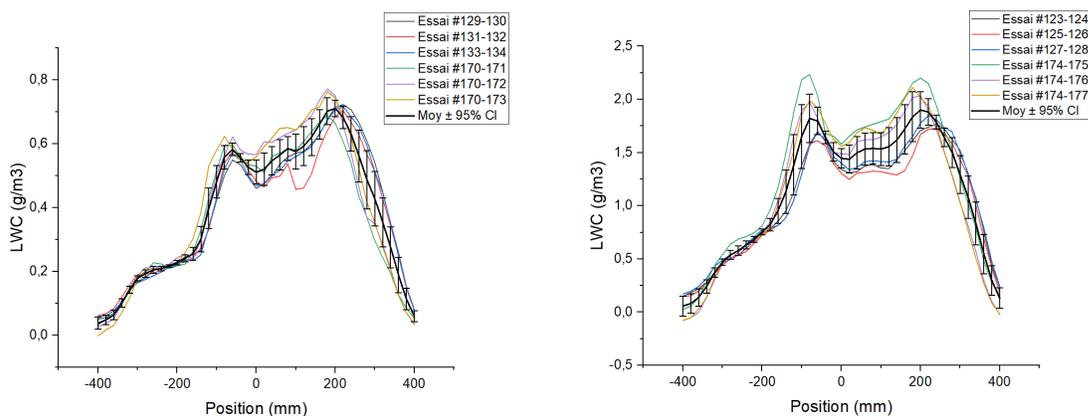
Figure 4.2: Teneur en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide du profil aérodynamique le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à -18°C

pas d'une erreur isolée et il est possible de remarquer que les deux essais extrêmes sont les deux premiers de la série (essais 182 et 186).

LWC-200 à différentes conditions

En premier lieu, une série de mesures à différentes températures soit : 20°C (figure 4.3), 5°C (figure 4.4) et -5°C (figure 4.5) ont été accomplies afin de comparer et d'observer l'effet de celle-ci. Selon les travaux originaux de King et al. (1985), l'inventeur de la première sonde de teneur en eau à fil chaud, tel que le LWC-200 utilisé, la teneur en eau devrait être constante malgré les variations de température. Des essais préliminaires ont été accomplis par Villeneuve au LIMA visant à évaluer l'efficacité de l'appareil nouvellement acquis. Ce rapport conclu que l'ensemble des essais accomplis sont inclus dans un écart maximal de 10% et peut également être utilisé à température pièce afin d'étalonner le nuage givrant pour des essais sous 0°C . Ces essais préliminaires peuvent donc servir de comparaison.

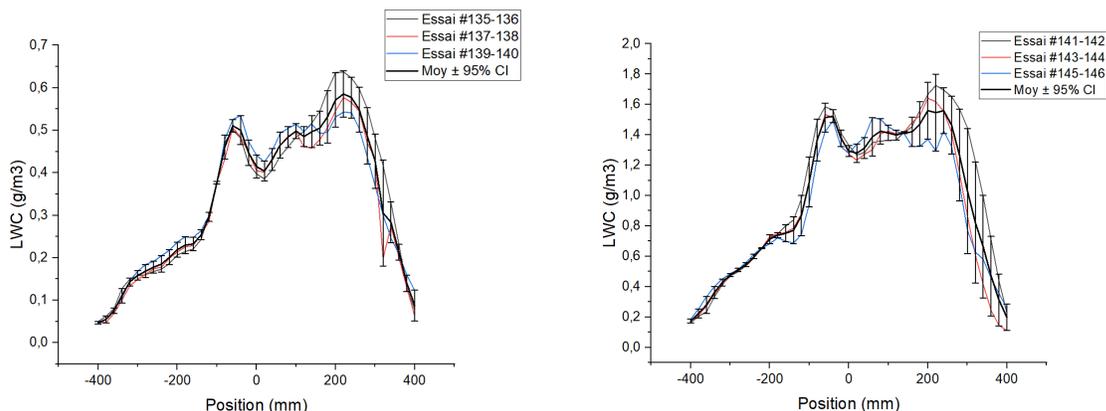
Il est possible d’observer aux figures 4.3 à 4.5, les valeurs mesurées aux différents points de la ligne transversale centrée dans la section d’essai ($y = 0$) à l’aide de l’appareil LWC-200 pour trois températures différentes. Il peut être remarqué que la deuxième série d’essais à 20°C (figure 4.3) donne un LWC un peu supérieur à la plupart des autres données, et ce, pour les deux conditions. Les essais concernés sont les 170-171, 170-172, et 170-173 à un débit de 30 mm sur l’échelle (a) et 174-175, 174-176 ainsi que 174-177 à un débit de 60 mm sur l’échelle (b). La moyenne peut être observé ainsi que sa marge d’erreur incluant un intervalle de confiance de 95%. Il est possible d’observer le profil de la courbe ayant presque toujours un maximum à -100 mm ainsi qu’à 200 mm. La raison est simple, l’étude actuelle utilise des débits constants pour tous les gicleurs. L’écoulement d’air, l’entrecroisement des jets d’eau et l’effet des parois de la soufflerie font en sorte que les côtés ont des valeurs de LWC plus petites alors que le centre varie en fonction de l’écoulement d’air. Afin d’obtenir un LWC plus constant sur la largeur de la section, il est nécessaire de configurer les débits de chacun de gicleurs de manière à contrer les effets mentionnés précédemment.



(a) Débit de 30 mm sur l’échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale (b) Débit de 60 mm sur l’échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale

Figure 4.3: Teneur en eau liquide (LWC) mesurée à l’aide de l’appareil LWC-200 le long de la ligne transversale centrée dans la section d’essai à 20°C

À la figure 4.3, le LWC moyen des essais à 20°C et à 30 mm de débit est de $0,39g/m^3$ avec une marge d'erreur de $\pm 0,04g/m^3$ ce qui représente une erreur relative moyenne de 9%. Parallèlement, à un débit de 60 mm sur l'échelle, le LWC moyen est de $1,12g/m^3$ avec une marge d'erreur de $\pm 0,12g/m^3$ ce qui représente une erreur relative moyenne de 12%.



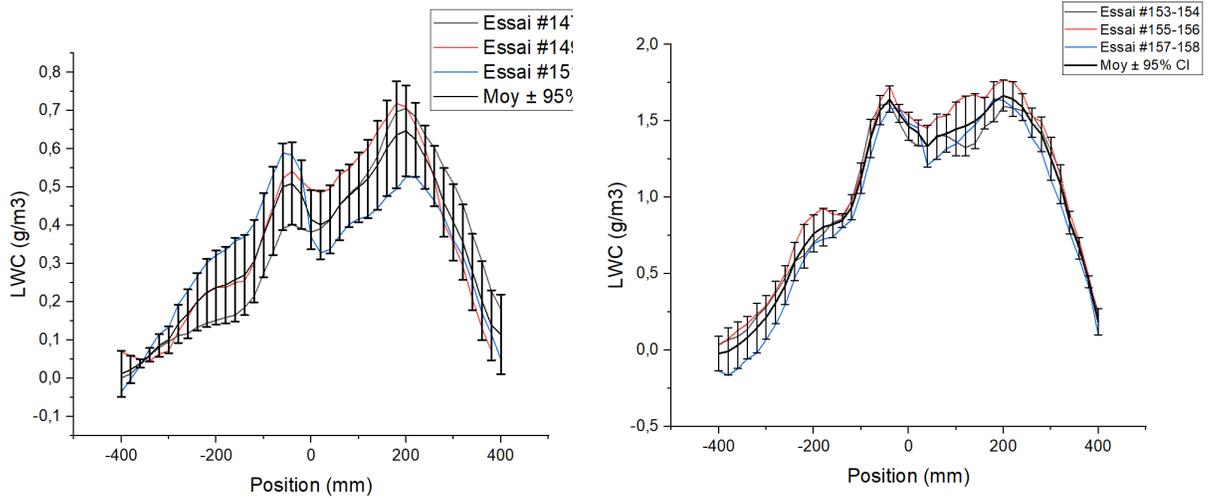
(a) Débit de 30 mm sur l'échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale (b) Débit de 60 mm sur l'échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale

Figure 4.4: Teneur en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide de l'appareil LWC-200 le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à 5°C

Il est possible de remarquer que pour une température de 5°C selon la figure 4.4, que le LWC moyen à 30 mm de débit est de $0,34g/m^3$ avec une marge d'erreur de $\pm 0,03g/m^3$ ce qui représente une erreur relative moyenne de 9%. Pour un débit de 60 mm sur l'échelle, le LWC moyen est de $0,97g/m^3$ avec une marge d'erreur de $\pm 0,11g/m^3$ ce qui représente une erreur relative moyenne de 11%.

Enfin, concernant une température d'essai de -5°C, la figure 4.5 montre que le LWC moyen à 30 mm de débit est de $0,34g/m^3$ avec une marge d'erreur de $\pm 0,08g/m^3$ ce qui représente une erreur relative moyenne de 25%. À un débit de 60 mm sur l'échelle, le LWC moyen est de $0,99g/m^3$ avec une marge d'erreur de $\pm 0,12g/m^3$ ce qui représente une erreur relative moyenne de 12%.

Les tableaux 4.4 et 4.5 présentent les résultats obtenus lors des essais pour deux débits différents. À noter que le débit est ajusté à la même valeur pour tous les gicleurs de la rampe



(a) Débit de 30 mm sur l'échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale (b) Débit de 60 mm sur l'échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale

Figure 4.5: Teneur en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide de l'appareil LWC-200 le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à -5°C

centrale et à une pression de 45 psi, le tout en accord avec les paramètres mentionnés au tableau 4.2 soit, 30 mm et 60 mm sur l'échelle.

Tableau 4.4: Comparaison des teneurs en eau liquide (LWC) mesurées à différentes températures avec un débit de 30 mm sur l'échelle

Comparaison LWC-200 à 30 mm sur l'échelle et 45 psi								
T_{IWT}	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Moyenne	Écart
$^{\circ}\text{C}$	g/m^3							
20	0,39	0,38	0,39	0,37	0,39	0,40	0,39	0,03
5	0,35	0,32	0,34				0,34	0,02
-5	0,34	0,36	0,33				0,34	0,03
							0,36	0,03

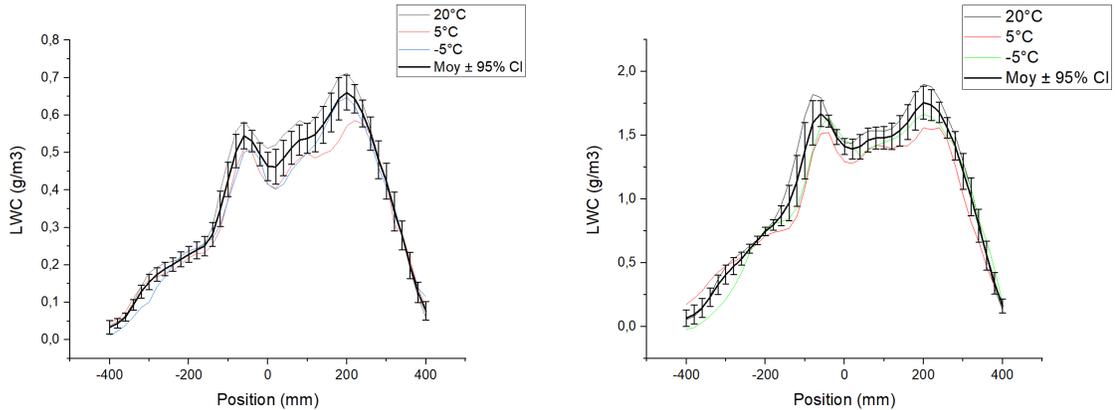
Tableau 4.5: Comparaison des teneurs en eau liquide (LWC) mesurées à différentes températures avec un débit de 60 mm sur l'échelle

Comparaison LWC-200 à 60 mm sur l'échelle et 45 psi								
T_{IWT}	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Moyenne	Écart
$^{\circ}\text{C}$	g/m^3							
20	1,07	1,03	1,10	1,27	1,11	1,14	1,12	0,24
5	0,99	1,08	0,91				1,00	0,17
-5	1,04	0,94	0,92				0,97	0,11
							1,03	0,08

D'après les résultats obtenus, le pourcentage d'écart maximal pour les essais à différentes températures est de 15% à 30 mm et à 60 mm de débit. L'écart est supérieur au 10% mesuré antérieurement par Villeneuve (2015), mais tout de même satisfaisant, considérant la nature expérimentale de la mesure.

L'erreur engendrée à basse température lors de l'accumulation de glace sur la sonde est toutefois improbable considérant les résultats à 5°C qui sont semblables à ceux à -5°C. Une autre possibilité serait une erreur dans le calcul au niveau des constantes variant avec la température de l'air, tel un changement des caractéristiques de l'eau lors de sa sortie des gicleurs comme sa chaleur spécifique ou sa chaleur de vaporisation. Une variation de la pression de l'air ambiant ou du taux d'humidité peut aussi contribuer. En effet, il est malheureusement très difficile de caractériser l'eau lors de sa sortie des gicleurs et ses paramètres peuvent avoir un effet sur le givrage. Comme l'eau est entreposée à 4°C, traverse la rampe de gicleur chauffée à 20°C à l'aide d'une pression relativement élevée de 45 psi puis éjectée dans un milieu à très basse pression inconnue et une basse température de -18°C, l'eau doit ensuite être refroidie pour geler au contact d'une surface. Ces multiples changements rendent les caractéristiques de l'eau au moment du contact difficile à prédire. Celles-ci peuvent varier en fonction de la pression atmosphérique ainsi que la température et le taux d'humidité dans l'air ambiant considérant que la soufflerie n'est pas hermétique ni pressurisée. Cette dernière peut expliquer pourquoi les valeurs de LWC pour une série donnée sont facilement répétitifs mais différent d'une série à l'autre si celles-ci ont été accomplies à différent temps de l'année.

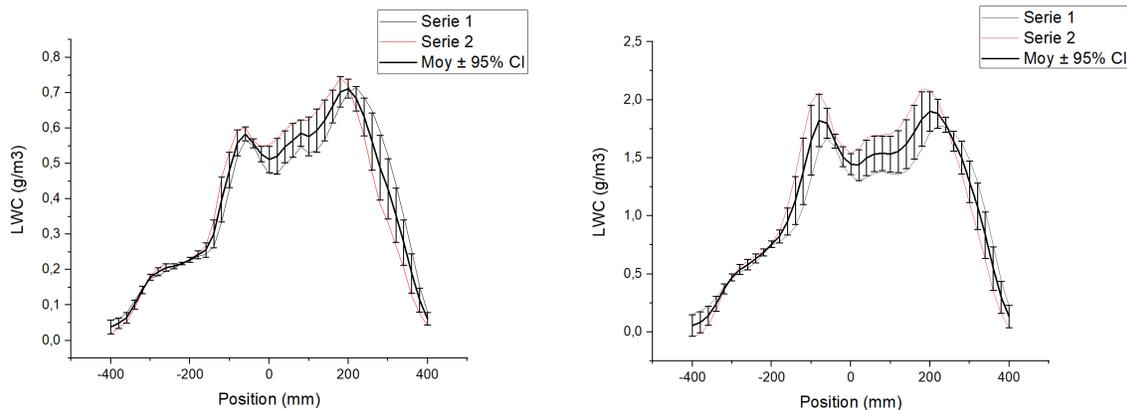
Il est possible d'observer à la figure 4.6 le LWC moyen à 20°C, 5°C et -5°C comparés au LWC moyen ainsi que sa marge d'erreur. Il est plus facile d'y observer la légère différence entre le LWC à 5°C et -5°C et le LWC à 20°C.



(a) Débit de 30 mm sur l'échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale (b) Débit de 60 mm sur l'échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale

Figure 4.6: Teneur en eau liquide (LWC) moyenne mesurée à l'aide de l'appareil LWC-200 le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai à différentes températures

Une deuxième série d'essais (figure 4.7) a été réalisée à 20°C, 2 mois après la première série afin de vérifier la reproductibilité de l'appareil. Celle-ci est définie par les essais 4, 5 et 6 dans les tableaux 4.4 et 4.5. L'écart dans la répétabilité des mesures s'avère être minimal et de l'ordre de 3% et 6% pour 30mm et 60mm de débit respectivement. La majorité de l'écart provient de la seconde série d'essais qui semble avoir un écart doublé comparativement à la première série. Le LWC moyen à 30 mm de débit reste tout de même satisfaisant considérant que le LWC de la série 1 et 2 sont tous les deux de $0,39g/m^3$. Considérant la marge d'erreur de $\pm 0,03g/m^3$, il est possible de conclure que le problème réside principalement dans la série d'essais à 60 mm. Cependant, en étudiant la marge d'erreur, il est possible de constater que la différence de LWC moyen entre les deux séries à 60 mm de débit, ayant respectivement un LWC moyen de $1,06g/m^3$ et $1,17g/m^3$, est inférieur à la marge d'erreur de $\pm 0,13g/m^3$ dans un intervalle de confiance de 95%. On peut donc en conclure que l'essai est bel et bien reproductible selon les données amassées. Bien entendu, il serait pertinent d'ajouter plus de données à une étude future afin de raffiner les résultats.



(a) Débit de 30 mm sur l'échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale (b) Débit de 60 mm sur l'échelle pour tous les gicleurs de la rampe centrale

Figure 4.7: Teneur en eau liquide (LWC) moyenne mesurée à l'aide de l'appareil LWC-200 le long de la ligne transversale centrée dans la section d'essai lors de deux différentes séries à 20°C

LWC-200 comparé aux méthodes conventionnelles

Les tableaux 4.6 et 4.7 présentent les comparaisons entre les différentes séries d'essais incluant les trois méthodes présentées jusqu'à maintenant. L'écart maximum calculé est obtenu en soustrayant la valeur maximale à la valeur minimale.

À faible teneur en eau, le profil aérodynamique (voir section 2.3.1) possède un écart maximum de 6% alors qu'à teneur en eau plus élevée, possède un écart maximum significativement supérieur de 24%. À l'inverse, le cylindre (voir section 2.3.1) semble avoir un écart maximal très faible aux hautes teneurs en eau et vice-versa. En comparant les performances du LWC-200 aux autres méthodes, un écart variant entre 6% et 9% est observé à faible teneur en eau alors qu'un plus grand écart variant de 12% à 22% est observé à haute teneur en eau. Cependant, lorsque la deuxième série d'essais à 20°C est omise, l'erreur maximale correspond à l'ordre de grandeur de celle à basse teneur en haut.

La relation entre les écarts des essais à différentes températures observées à 20°C semble malgré tout plus en accord avec les résultats des essais de cylindre rotatif et du profil aérodynamique. Cependant, son écart maximal est relativement grand dépendant des conditions. Ceci pourrait mettre en évidence que l'erreur est en effet obtenue lors du calcul de la teneur en eau et de ses paramètres et non lors de la mesure. Notamment, les écarts possibles de la mesure de la grosseur des gouttes tels que discuté à la section 4.2.1 peuvent être une source d'erreur lors des calculs de teneur en eau à l'aide du cylindre et partiellement celui du profil aérodynamique. Effectivement, celui-ci fait partie du calcul de la teneur en eau et la détermination du coefficient de captation respectivement. Le calcul approximatif de la densité de la glace sur le cylindre peut aussi avoir un effet et expliquerait l'erreur à faible teneur en eau considérant la quantité de glace moins importante accumulée sur un temps donné.

Tableau 4.6: Comparaison des teneurs en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide de différents appareils et méthodes à un débit de 30 mm sur l'échelle

	T _{IWT}	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Moyenne	Écart	Écart max
	°C	g/m ³	%							
Profil	-18	0,44	0,44	0,46	-	-	-	0,45	0,01	6
Cylindre	-18	0,34	0,37	0,43	-	-	-	0,38	0,05	26
LWC-200	20	0,39	0,38	0,39	0,37	0,39	0,40	0,39	0,03	8
	5	0,35	0,32	0,34	-	-	-	0,34	0,02	6
	-5	0,34	0,36	0,33	-	-	-	0,34	0,03	9

Tableau 4.7: Comparaison des teneurs en eau liquide (LWC) mesurée à l'aide de différents appareils et méthodes à un débit de 60 mm sur l'échelle

	T _{IWT}	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Moyenne	Écart	Écart max
	°C	g/m ³	%							
Profil	-18	1,66	1,30	1,39	1,49	1,53	-	1,48	0,14	24
Cylindre	-18	1,19	1,18	1,17	-	-	-	1,18	0,01	2
LWC-200	20	1,07	1,03	1,10	1,27	1,11	1,14	1,12	0,24	22
	5	0,99	1,08	0,91	-	-	-	1,00	0,17	17
	-5	1,04	0,94	0,92	-	-	-	0,97	0,11	12

Ces relations ont été observées dans le rapport de Ide (1999) qui conclut que le cylindre, le profil aérodynamique et l'appareil de type King (LWC-200) sont significativement similaires lors des conditions d'opération standard à un MVD de 10µm à 40µm alors que

le cylindre rotatif semble être efficace pour des grosseurs de gouttes plus importantes que le profil aérodynamique et la sonde à fil chaud. De plus, l'écart mesuré pour les différents essais du même rapport correspond à l'écart mesuré lors des essais présents, soit de l'ordre de $0,1\text{g}/\text{m}^3$.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION

En conclusion, plus de 200 essais couvrant les caractéristiques aérodynamiques telles que la vitesse, la turbulence et l'angle de l'écoulement, ainsi que les caractéristiques thermodynamiques et de givrage ont été accomplis afin d'effectuer la caractérisation de l'écoulement d'air et du nuage givrant de la soufflerie réfrigérée du LIMA. Le tableau 5.1 présente de manière générale l'état de la soufflerie constatée suite aux travaux de caractérisation avec, entre parenthèses, la valeur maximale acceptée selon la SAE International (2015). Les cellules en rouge mettent l'accent sur les régions problématiques. De plus, les valeurs fournies au tableau 5.1 correspondent aux valeurs extrêmes obtenues et ne représentent pas toutes les conditions couvertes lors de la caractérisation. La vitesse est comparée à l'aide d'une erreur relative, la température à l'aide d'une variation maximale en degré Celsius, l'angle de l'écoulement à l'aide d'une variation maximale en degré et l'intensité de la turbulence par une erreur maximale en pourcentage, à ne pas confondre avec une erreur relative.

Tableau 5.1: État des performances dans la grande section d'essai de la soufflerie réfrigérée du LIMA

	Incertitude maximale de la mesure	Stabilité temporelle à la ligne centrale	Uniformité spatiale	Valeur limite
Paramètres aérodynamiques				
Vitesse de l'air	$\pm 1\%$ ($\pm 1\%$)	$\pm 1\%$ ($\pm 2\%$)	$\pm 7\%$ ($\pm 1\%$)	N/A
Température statique de -30°C à 5°C	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$)	$\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$)	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1,0^{\circ}\text{C}$)	N/A
Angle de l'écoulement	$\pm 0,39^{\circ}$ ($\pm 0,25^{\circ}$)	N/A	$15,12^{\circ}$ ($\pm 2,00^{\circ}$)	$-39,48^{\circ}$ ($\pm 3,00^{\circ}$)
Turbulence de l'écoulement				
$P_a - off$	$\pm 0,08\%$ ($\pm 0,25\%$)	$\pm 0,21\%$ ($\pm 2,00\%$)	$< 1,09\%$ ($< 2,00\%$)	$3,56\%$ ($2,00\%$)
$P_a - on$	$\pm 0,22\%$ ($\pm 0,25\%$)	$\pm 0,63\%$ ($\pm 2,00\%$)	$< 2,14\%$ ($< 2,00\%$)	$5,58\%$ ($5,00\%$)

Les essais aérodynamiques ont démontré une variation notable de l'intensité de la turbulence et donc de l'uniformité de la vitesse ainsi que de l'angle de l'écoulement faisant en sorte que l'écoulement ne respecte qu'en partie la pratique ARP5905 (SAE International, 2015). En effet, on observe au tableau 5.1 que l'uniformité spatiale de la vitesse ne doit pas dépasser 1% alors qu'elle monte jusqu'à 7%.

La turbulence, quant à elle, est problématique en ce qui a trait à l'uniformité spatiale lors de l'utilisation des gicleurs ($P_a - on$). Celle-ci dépasse la valeur demandée par la pratique recommandée de 2,00% avec une valeur de 2,14%. La turbulence pose aussi problème au niveau de la valeur maximale admise, soit, 2,00% sans gicleur et 5,00% avec gicleurs avec des valeurs maximales respectives de 3,56% et 5,58%.

L'angle de l'écoulement est la caractéristique la plus problématique avec une incertitude extrême de $\pm 0,39^\circ$, supérieure à la valeur demandée de $\pm 0,25^\circ$. La pratique recommandée demande $\pm 2,00^\circ$ et $\pm 3,00^\circ$ pour l'uniformité spatiale et la valeur extrême admise. Lors de la mesure de ces paramètres, des valeurs allant jusqu'à $15,12^\circ$ et $-39,48^\circ$ ont été observées.

Les essais thermodynamiques sont satisfaisants dans l'ensemble et respectent la pratique recommandée ARP5905 (SAE International, 2015), et ce, dans le cadre des valeurs de température permises malgré les problèmes techniques du système de réfrigération. Le seul détail noté consiste en l'erreur entre la valeur mesurée et fournie au contrôleur qui possède un écart de l'ordre de 1°C avec la valeur mesurée au centre de la section. Ceci a été corrigé par un calcul d'un facteur de correction entre la température à la ligne centrale et la paroi.

La caractérisation complète du MVD n'a pas été accomplie considérant le temps nécessaire pour remplacer le graphe précédemment utilisé. En effet, une erreur relative allant

jusqu'à 66% a été mesurée lors des essais de vérification de celle-ci, rendant difficile son utilisation dans les calculs de LWC. Afin de mener à bien les différents essais de givrage, les valeurs de MVD nécessaires ont été déterminées et mesurées.

Les essais de givrage, quant à eux, ont permis d'évaluer davantage la sonde de type King (LWC-200) récemment acquise par le LIMA à différentes températures et teneur en eau. Le même appareil a ensuite été comparé aux méthodes utilisées dans le passé, soit le cylindre rotatif et le profil aérodynamique. Ceci a permis de démontrer la possibilité de l'utilisation de l'appareil LWC-200 à température ambiante permettant une calibration beaucoup plus rapide qu'auparavant, soit de l'ordre d'un jour de travail par condition à quelques heures pour plusieurs conditions. Cette économie de temps est significative lors de l'étalonnage d'un nuage givrant uniforme nécessitant plusieurs essais et ajustements. Malgré un écart de l'ordre de 15% entre les essais à 20°C et les essais à 5 et -5 °C, ceux à 20°C correspondent aux valeurs de teneur en eau des méthodes du cylindre rotatif et du profil aérodynamique avec un écart inférieur à 10%. Ce qui veut dire qu'il est même préférable d'accomplir les essais de LWC avec la sonde à fil chaud à une température supérieure à 0°C. Cependant, une erreur semblant significative a été détectée lors de la deuxième série d'essais. À la suite d'une analyse de la marge d'erreur, il a été possible de déterminer que cette série supplémentaire est bel et bien valide et que sa valeur est dans l'intervalle de confiance.

RECOMMANDATIONS

La variation notable d'intensité de turbulence, de l'uniformité de la vitesse ainsi que de l'angle de l'écoulement sont très probablement reliés les uns aux autres et pourraient être corrigés partiellement ou complètement par l'ajout de mesures de redressement de

l'écoulement, tel qu'un filet ou d'une grille en nid d'abeille entre les rampes de gicleur et le dernier virage.

Concernant la mesure du MVD, il serait pertinent d'explorer de nouvelles méthodes de mesure telles qu'une méthode au laser considérant que celle de la lamelle et l'huile de silicone sont difficilement reproductibles et requièrent un temps considérable lors de l'analyse. Une caractérisation complète de ce paramètre est proposée à des fins de référence pour des travaux futurs. Quant à la teneur en eau liquide et considérant l'erreur détectée lors de la deuxième série d'essai du LWC200, une série supplémentaire est tout de même recommandée afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats.

En ce qui à trait aux recommandations, l'importance de celles-ci dépend entièrement de la direction vers laquelle le LIMA dirige ses efforts. Si la qualité de l'écoulement est une priorité, des mesures de correction avant la section convergente devraient être considérées. De plus, considérant l'ampleur des problèmes techniques rencontrés lors des essais de température, il serait pertinent de considérer également sa réparation, permettant ainsi d'atteindre les valeurs de températures les plus extrêmes prédites. Il est cependant important de considérer l'état actuel du système lors de l'évaluation de l'importance de ces réparations, autant du côté technique que du côté financier. Si le LIMA requiert une meilleure caractérisation de la capacité givrante de la soufflerie, il serait important d'examiner la possibilité d'utiliser une méthode plus fiable et rapide lors de la mesure du MVD. De plus, une caractérisation générale des conditions givrantes communément utilisées ainsi que la production d'un graphique de MVD pourrait s'avérer utile lors de travaux futurs. Enfin, les travaux présents ont démontré la fiabilité de l'appareil LWC-200 lors de la mesure de la teneur en eau cependant, considérant l'erreur lors de la deuxième série d'essais, une série supplémentaire serait nécessaire avant

son utilisation dans des travaux de cette envergure afin d'ajouter des données aux séries accomplies.

ANNEXE A

PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

A.1 MISE EN SERVICE

A.1.1 VITESSE

1. Démarrer le ventilateur de la soufflerie ;
2. Mettre en marche l'acquisition des données à l'aide du logiciel de contrôle de la vitesse (figure A.1) ;
3. Ajuster le contrôle de la fréquence à la fréquence maximale admissible ;
4. Noter la vitesse dans la fiche d'essai ;
5. Enregistrer la fiche d'essai.

A.1.2 TEMPÉRATURE

1. Démarrer le ventilateur de la soufflerie ;
2. Ajuster le contrôle de la fréquence à la fréquence minimale admissible ;

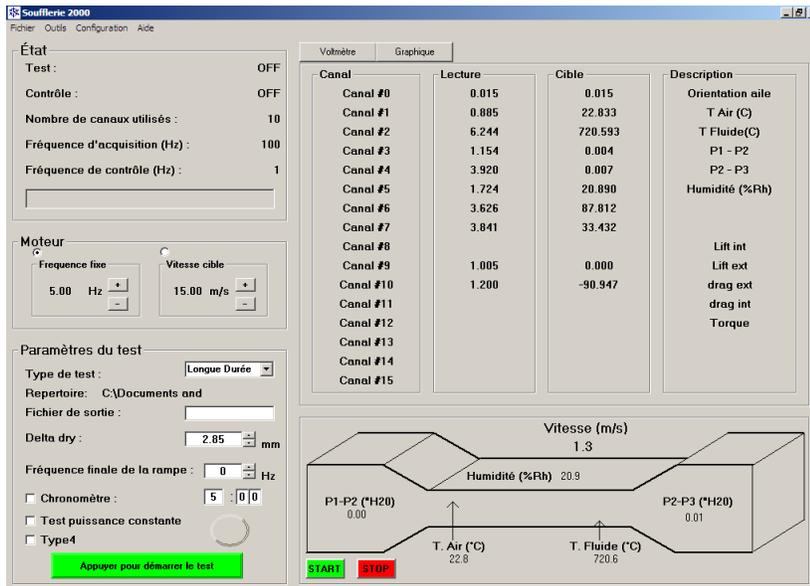


Figure A.1: Interface du logiciel de contrôle de la vitesse

3. Activer le système de réfrigération avec le contrôle de la température de la soufflerie et du compresseur la plus basse possible (figure A.2);



(a) Contrôle de la température de la soufflerie



(b) Contrôle de la température des compresseurs

Figure A.2: Contrôle de la température de l'écoulement d'air de la soufflerie

4. Mettre en marche l'acquisition des données à l'aide du logiciel de contrôle de la vitesse;
5. Attendre que la soufflerie atteigne sa température minimale;
6. Arrêter l'acquisition et noter la température minimale;
7. Remettre en marche l'acquisition des données;
8. Ajuster le système de contrôle à la fréquence correspondant à la vitesse désirée;
9. Attendre que la température atteigne son point stable;
10. Arrêter l'acquisition des données et prendre en note la température maximale dans la fiche.

A.1.3 FACTEUR DE CORRECTION DE LA VITESSE À LA LIGNE CENTRALE

1. Démarrer le ventilateur de la soufflerie;
2. Positionner le tube de Pitot au centre de la section d'essai à l'aide du bras sur rail;
3. Ajuster le système de contrôle de la vitesse à la fréquence correspondant une vitesse de 5 m/s;
4. Enclencher l'acquisition de donnée à la fois à l'aide du système de contrôle de la vitesse et du système d'acquisition relié au contrôle du bras sur rail;
5. Attendre 60 s;
6. Arrêter l'acquisition et enregistrer les données sur l'ordinateur;
7. Refaire les étapes 3, 4 et 5 en incrémentant la vitesse de 5 m/s et ce jusqu'à atteindre la vitesse maximale de la soufflerie.

A.1.4 POSITION DES RAMPES

1. Positionner les rampes de gicleurs adéquatement selon la position à vérifier ;
2. Ajuster le contrôle de la fréquence à la valeur désirée ;
3. Activer le contrôle de la vitesse (la fréquence ne peut pas être utilisée lors d'un essai de glaçage) ;
4. Ajuster le contrôle de la température à -18°C ;
5. Attendre que la température se stabilise, cette étape peut prendre entre 1h à 2h ;
6. Positionner la grille de captation ;
7. Lancer l'acquisition de donnée en activant tous les gicleurs des trois rampes à 30 mm de débit sur l'échelle avec une pression de 40 psi (ce référer au protocole d'utilisation du système de gicleur à la section A.2.2 pour plus de détail) ;
8. Laisser glacer pendant 4 minutes ;
9. Ralentir le vent de la soufflerie au minimum et laisser reposer quelques minutes ;
10. Arrêter le tout et inspecter visuellement la position du nuage de glace, prendre une photographie ;
11. Remplir la fiche d'essai (section D.4).

A.2 UTILISATION DE LA SOUFFLERIE ET DES INSTRUMENTS DE MESURE

A.2.1 ESSAIS DE CARACTÉRISATION

1. Placer, à l'aide du bras sur rail, l'instrument de mesure (tube de Pitot, anémomètre à fil chaud, etc.) au centre de la section d'essai ;

2. Si besoin, démarrer l'instrument et calibrer à zéro ;
 - Si l'appareil utilisé est le tube de Pitot multiaxial à cinq trous, s'assurer que l'option de calcul de l'angle du logiciel d'acquisition est activée ;
 - Si l'appareil utilisé est l'anémomètre à fil chaud, ajuster le voltage en fonction de la sonde utilisée et prendre en note le modèle et ses informations.
3. Ouvrir le contrôle de la température des compresseurs et de la soufflerie ;
4. Ajuster à la température désirée, la température des compresseurs doit être inférieure de 5°C à 25°C à la température contrôlée, celle-ci dépend de la vitesse de l'air ;
5. Démarrer le ventilateur de la soufflerie et ajuster le vent à la vitesse désirée en se basant sur la prise de mesure à la ligne centrale. Si l'instrument de mesure ne permet pas de connaître la vitesse, se fier sur les sondes de pressions du convergent tout en incluant le facteur de correction calculé lors de la mise en service (système d'acquisition du contrôle de la vitesse) ;
6. Laisser la température à l'intérieur de la soufflerie se stabiliser pendant quelques minutes, dans le cas d'un essai thermique, laisser stabiliser pendant 1h30 ;
7. Lancer l'acquisition de donnée à la ligne centrale pendant 240 s à l'aide du logiciel d'acquisition de donnée rattachée au contrôle du bras sur rail ;
8. Enregistrer et nommer les données recueillies dans un dossier à fin d'analyses ;
9. Mettre le bras sur rail à la position initiale et ajuster le temps d'acquisition à 30 s avec un délai de 3 s et une résolution de 100 mm ;
10. Lancer l'opération de balayage du bras sur le plan transversal de la section d'essai, l'opération devrait durer aux alentours de 1h en considérant les valeurs déterminées à la section précédente ;
11. Enregistrer et nommer les données recueillies dans un dossier à fin d'analyse.

A.2.2 UTILISATION DU SYSTÈME DE GIVRAGE

1. Installer l'appareil de mesure avant de préparer le système de gicleur ;
2. Démarrer le ventilateur de la soufflerie ;
3. Ajuster le contrôle de la vitesse à la fréquence correspondant à la vitesse désirée ;
4. Activer le contrôle de la vitesse (la fréquence ne peut pas être utilisée lors d'un essai de glaçage) ;
5. Ouvrir le contrôle de la température des compresseurs et de la soufflerie ;
6. Ajuster à la température désirée, la température des compresseurs doit être inférieure de 5°C à 25°C à la température contrôlée, celle-ci dépend de la vitesse de l'air ;
7. S'assurer que les éléments chauffants des gicleurs sont ajustés à 20°C ;
8. S'assurer que l'ensemble des gicleurs à utiliser sont connectés sur la ligne d'air et que l'air est activé ;
9. Attendre que la température se stabilise ;
10. Mettre le réfrigérateur rempli d'eau déminéralisée sous une pression de 80 psi ;
11. Arrêter la ligne d'air à l'aide du commutateur (figure A.3) ;
12. Connecter la ligne d'eau des gicleurs au réfrigérateur en s'assurant que les débitmètres sont ajustés au maximum ;
13. Ouvrir la ligne d'eau à l'aide de la valve (figure A.4) ;
14. Rapidement, ajuster les débitmètres à la valeur désirée ;
15. Changer la grille de captation située après la section d'essai ;
16. Lorsque le système de gicleur est prêt à être utilisé, réactiver la ligne d'air à l'aide du commutateur.



Figure A.3: Commutateur contrôlant la ligne d'air

17. S'assurer que les lignes d'eau ne gèlent pas en les ajustant à une valeur supérieure à 30 mm sur l'échelle du débitmètre lors des temps morts entre deux essais.
18. S'assurer de l'absence de bulle d'air dans le système avant utilisation. Il est possible de les purger en ajustant momentanément le débit au maximum.

LWC-200

1. Une fois le système de gicleur prêt pour utilisation avec l'appareil LWC-200 installé (section A.2.2), activer le mode «Appareil LWC» du logiciel d'acquisition et s'assurer que la ligne d'air est désactivée;
2. Mettre à la position zéro à l'aide du bouton «zéro» dans le logiciel d'acquisition associé au contrôle du bras sur rail;
3. Activer la source de courant du fil chaud et des bandes chauffantes;



Figure A.4: Valve d'ouverture de la ligne d'eau

4. Ajuster le voltage à la valeur définie dans le mode d'emploi (lorsque l'appareil est sous tension, toujours s'assurer de la présence de vent dans la soufflerie sous risque de surchauffer l'appareil);
5. Démarrer l'acquisition à l'aide du logiciel de contrôle du bras sur rail et du système de contrôle de la vitesse;
6. Attendre environ 20 minutes que l'appareil balaye la largeur de la section;
7. Enregistrer et nommer les données à des fins d'analyse;
8. Activer le commutateur associé à la ligne d'air du système de gicleur (s'assurer que les débits sont toujours aux valeurs demandées);
9. Démarrer l'acquisition à l'aide du logiciel de contrôle du bras sur rail et du système de contrôle de la vitesse;

10. Attendre environ 20 minutes que l'appareil balaye la largeur de la section ;
11. Enregistrer et nommer les données à des fins d'analyse (utilisation de la fiche présentée à la section D.1) ;
12. Changer la grille de captation située après la section d'essai.

Profil aérodynamique

1. Une fois le système de gicleur prêt pour utilisation avec le profil aérodynamique installé (section A.2.2), ralentir la soufflerie à 5 m/s et s'assurer que la ligne d'air est désactivée ;
 - Considérant qu'il est impossible d'enlever le profil aérodynamique de la section d'essai lors de la préparation du système de gicleur, il est actuellement couvert d'une couche de glace ;
2. Enlever la couche de glace du profil aérodynamique à l'aide d'un papier essuie-tout et d'un décapeur thermique ;
3. Refermer la soufflerie et ajuster la vitesse à sa vitesse originale ;
4. Activer la ligne d'air à l'aide du commutateur et le compteur d'un chronomètre en même temps ;
5. Démarrer l'acquisition à l'aide du logiciel du système de contrôle de la vitesse ;
6. Attendre que la couche de glace sur le profil soit supérieure à 1 cm (changer la grille de captation située après la section d'essai au besoin) ;
7. Arrêter la ligne d'air, le chronomètre et l'acquisition de données ;
8. Enregistrer et nommer les données de contrôle de la vitesse et de la température à des fins d'analyse ;

9. Prendre en note le temps d'exposition dans la fiche d'essai ;
10. Ralentir l'écoulement d'air à une vitesse de 5 m/s ;
11. À l'aide d'un pied à coulisse, mesurer et noter dans la fiche d'essai (section D.3) l'épaisseur de glace sur la profondeur du profil, et ce, au 25,4 mm ;
12. Nettoyer le profil aérodynamique ;
13. Changer la grille de captation située après la section d'essai.

Cylindre rotatif

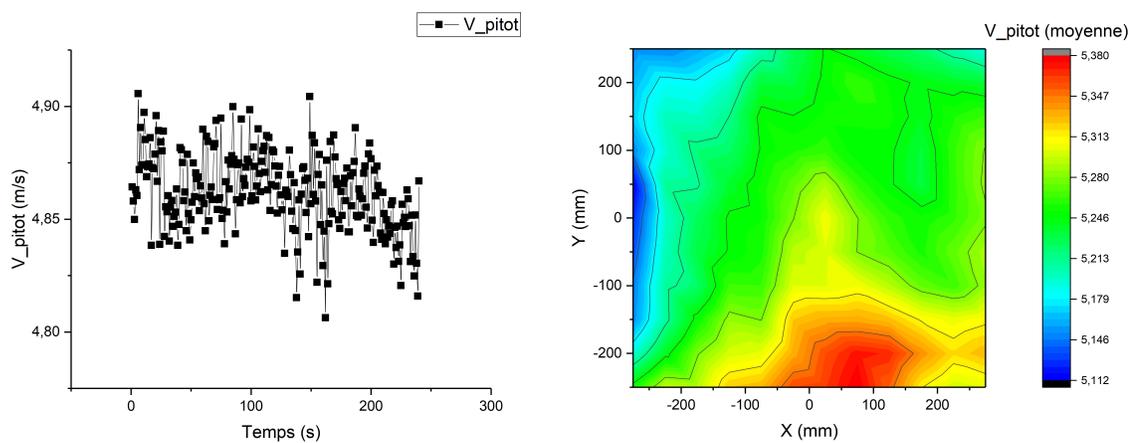
1. Une fois le système de gicleur prêt pour utilisation avec le profil aérodynamique installé (section A.2.2), ralentir la soufflerie à 5 m/s et s'assurer que la ligne d'air est désactivée ;
2. Si cela n'a pas été fait précédemment, peser le cylindre à vide et mesurer son diamètre au 50 mm ;
3. Installer le cylindre rotatif ainsi que le moteur d'entraînement dans la section d'essai ;
4. Refermer le panneau de la section d'essai de la soufflerie et ajuster la vitesse à sa vitesse originale ;
5. Activer le moteur d'entraînement du cylindre ;
6. Activer la ligne d'air à l'aide du commutateur et le compteur d'un chronomètre en même temps
7. Démarrer l'acquisition à l'aide du logiciel du système de contrôle de la vitesse ;
8. Attendre que la couche de glace sur le cylindre soit supérieure à 1 cm (changer la grille de captation située après la section d'essai au besoin) ;

9. Arrêter la ligne d'air, le chronomètre, le moteur d'entraînement et l'acquisition de donnée ;
10. Enregistrer et nommer les données de contrôle de la vitesse et de la température à des fins d'analyse ;
11. Prendre en note le temps d'exposition dans la fiche d'essai ;
12. Ralentir l'écoulement d'air à une vitesse de 5 m/s ;
13. Enlever le moteur d'entraînement et amener le cylindre dans une chambre froide au préalablement ajusté à une température sous zéro ;
14. Peser le cylindre sur une balance et noter la valeur obtenue dans la fiche d'essai ;
15. À l'aide d'un pied à coulisse, mesurer et noter dans la fiche d'essai (section D.2) l'épaisseur de glace sur le diamètre du cylindre, et ce, au 50 mm ;
16. Nettoyer le cylindre ;
17. Changer la grille de captation située après la section d'essai.

ANNEXE B

RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION

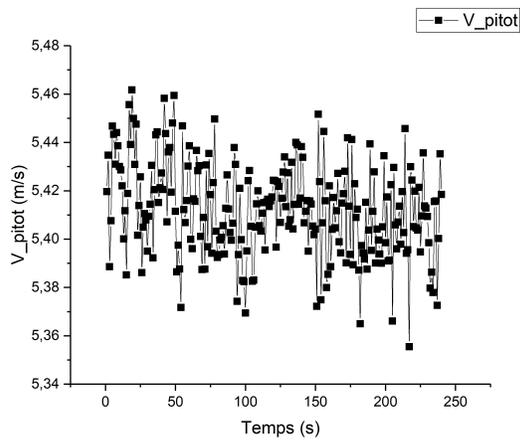
B.1 VITESSE



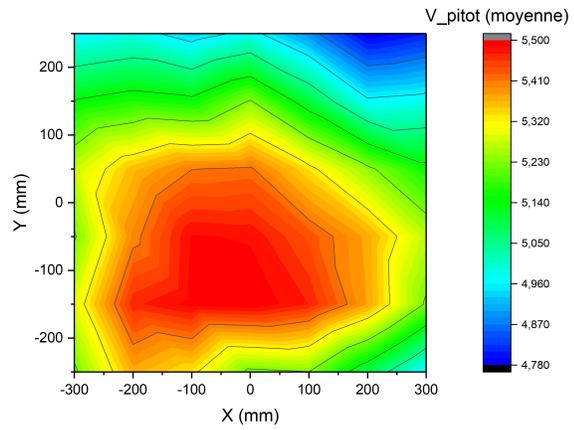
(a) Stabilité temporelle

(b) Uniformité spatiale

Figure B.1: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 5 m/s et 20°C sans gicleur

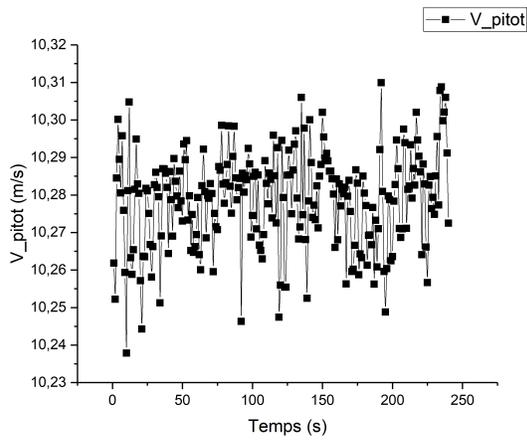


(a) Stabilité temporelle

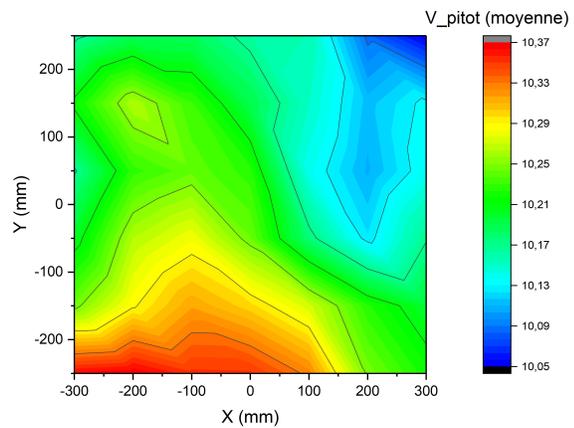


(b) Uniformité spatiale

Figure B.2: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 5 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

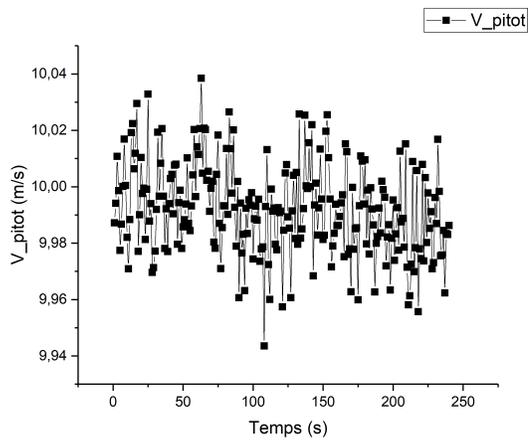


(a) Stabilité temporelle

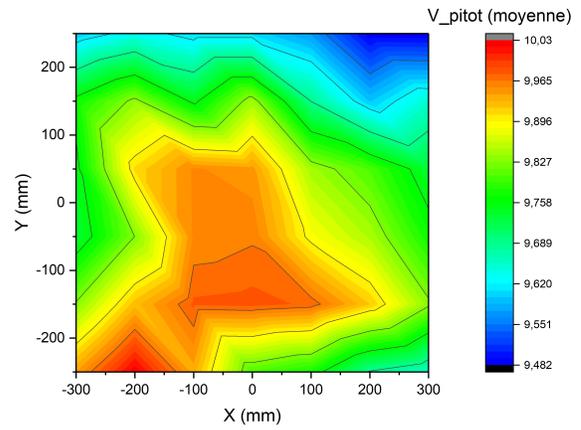


(b) Uniformité spatiale

Figure B.3: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 10 m/s et 20°C sans gicleur

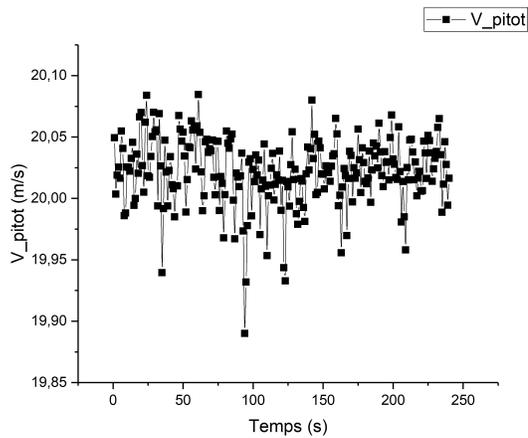


(a) Stabilité temporelle

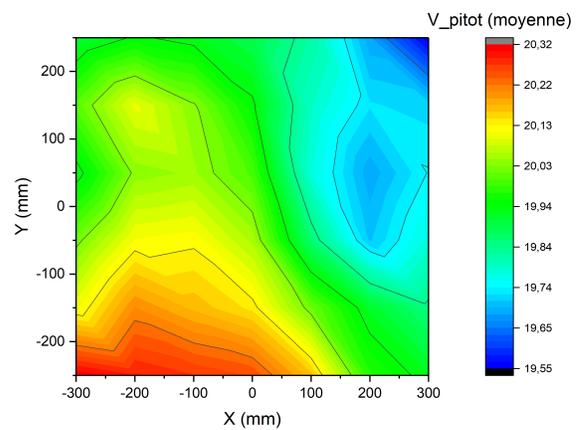


(b) Uniformité spatiale

Figure B.4: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 10 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

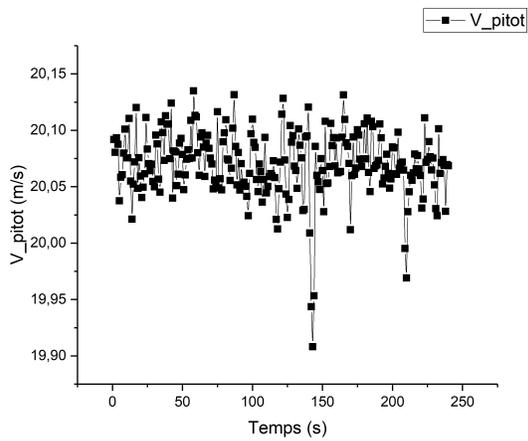


(a) Stabilité temporelle

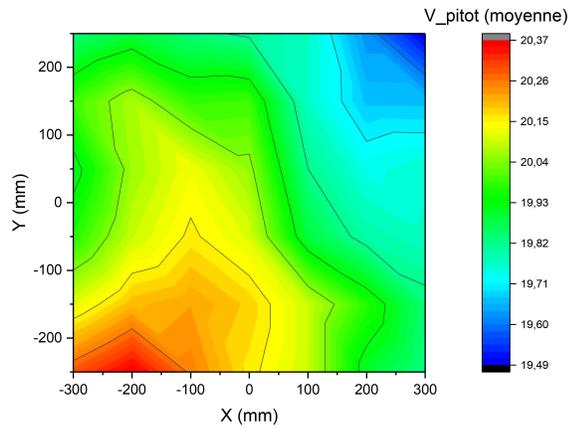


(b) Uniformité spatiale

Figure B.5: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 20 m/s et 20°C sans gicleur

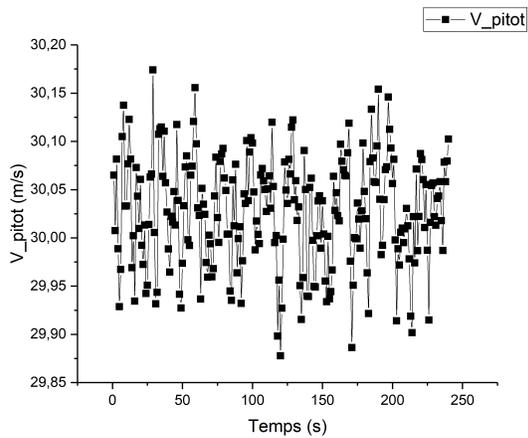


(a) Stabilité temporelle

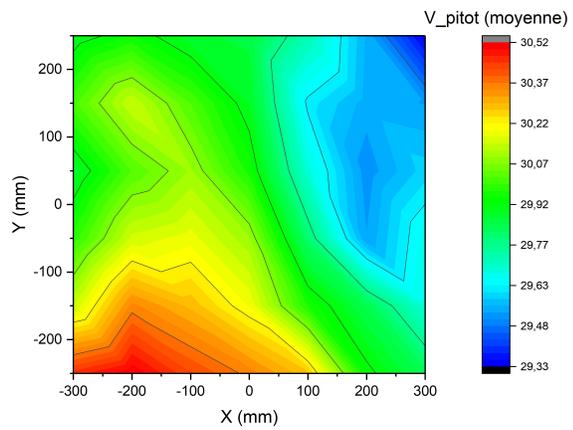


(b) Uniformité spatiale

Figure B.6: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 20 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

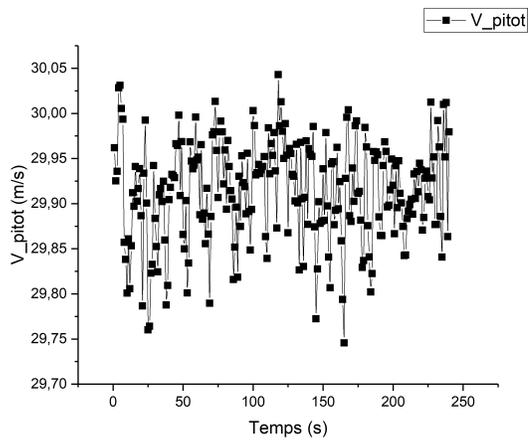


(a) Stabilité temporelle

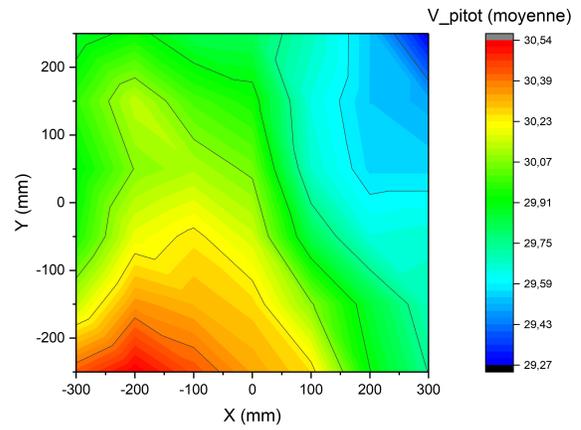


(b) Uniformité spatiale

Figure B.7: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 30 m/s et 20°C sans gicleur

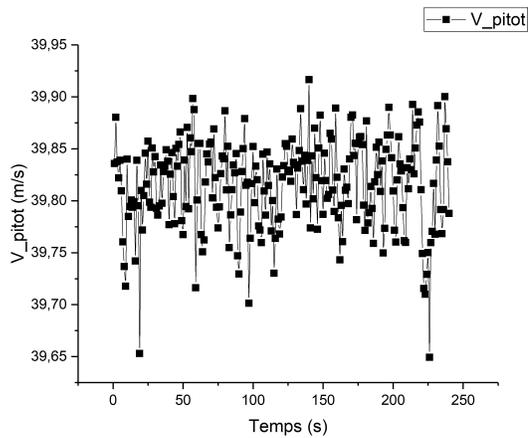


(a) Stabilité temporelle

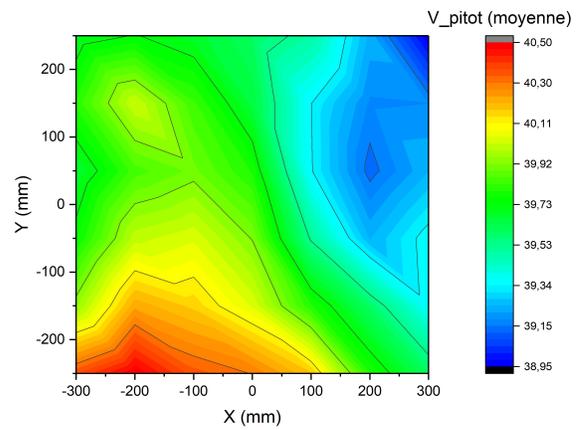


(b) Uniformité spatiale

Figure B.8: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 30 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

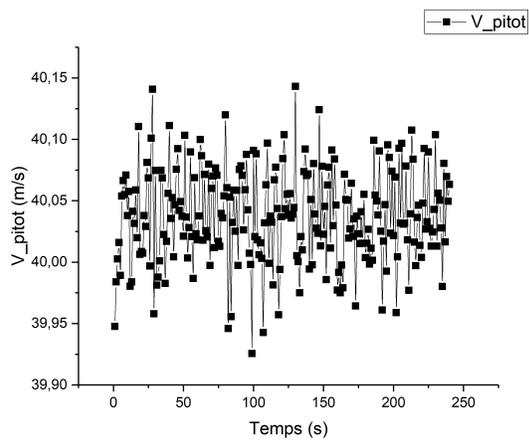


(a) Stabilité temporelle

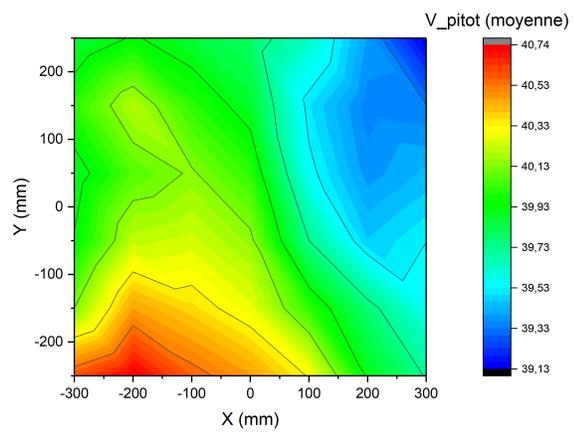


(b) Uniformité spatiale

Figure B.9: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 40 m/s et 20°C sans gicleur



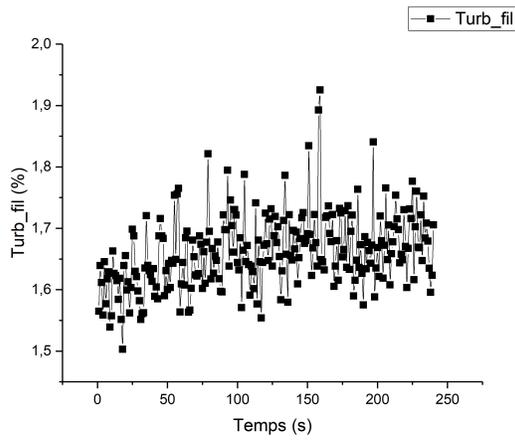
(a) Stabilité temporelle



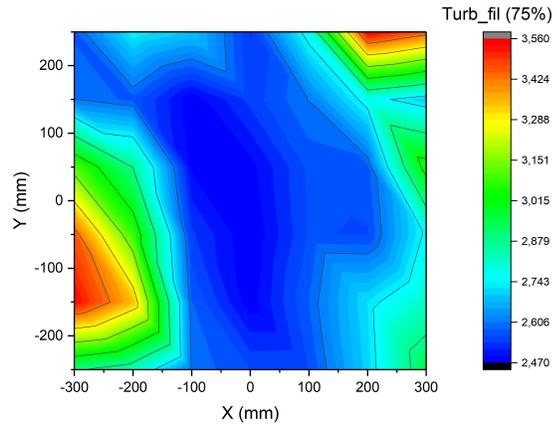
(b) Uniformité spatiale

Figure B.10: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la vitesse de l'écoulement à 40 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

B.2 TURBULENCE

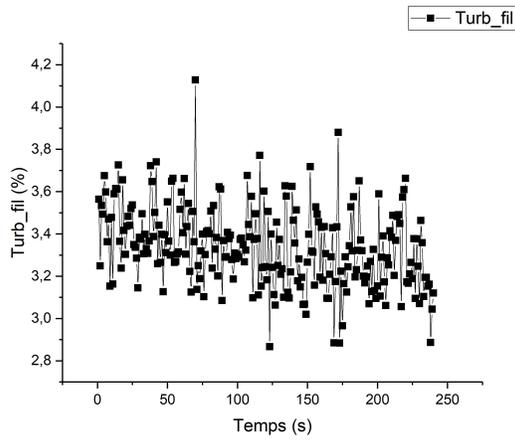


(a) Stabilité temporelle

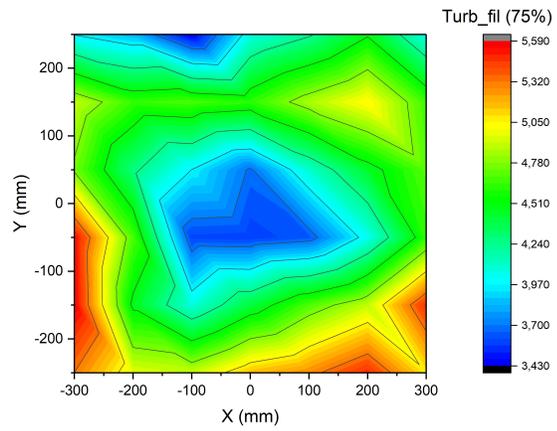


(b) Uniformité spatiale

Figure B.11: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 5 m/s et 20°C sans gicleur

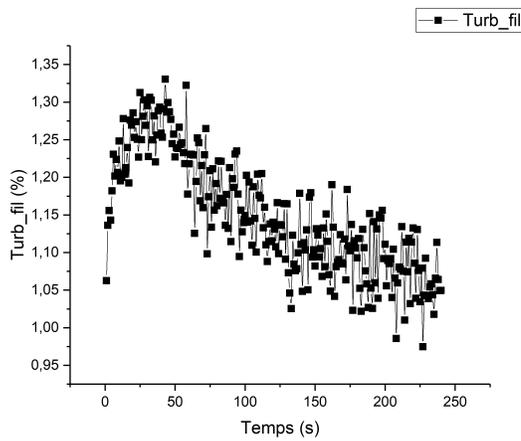


(a) Stabilité temporelle

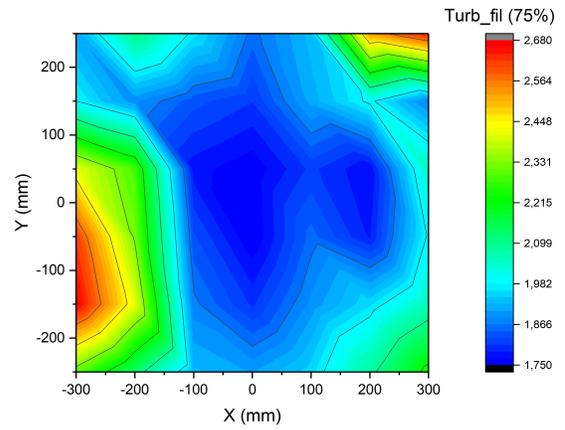


(b) Uniformité spatiale

Figure B.12: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 5 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

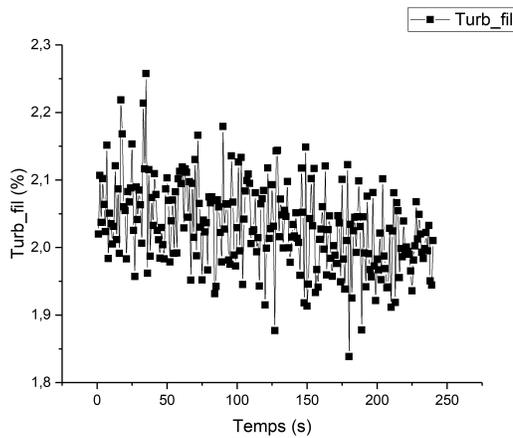


(a) Stabilité temporelle

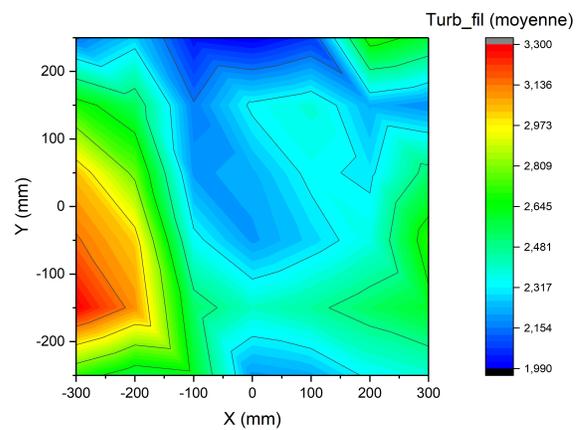


(b) Uniformité spatiale

Figure B.13: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 10 m/s et 20°C sans gicleur

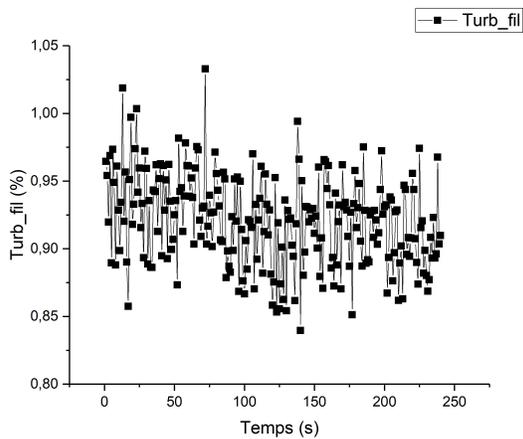


(a) Stabilité temporelle

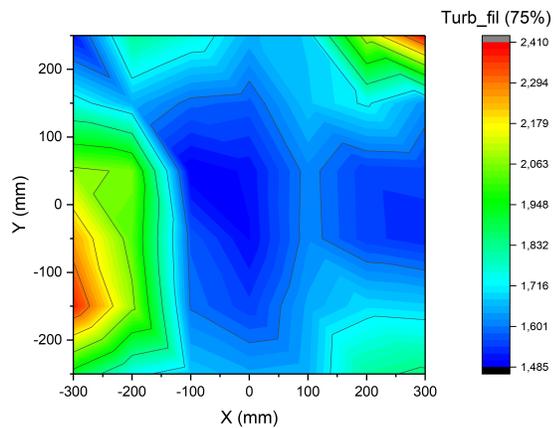


(b) Uniformité spatiale

Figure B.14: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 10 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

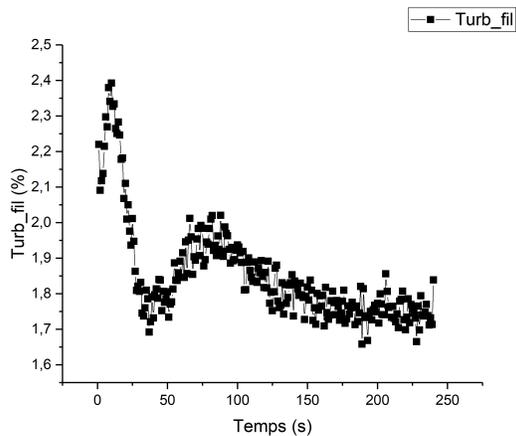


(a) Stabilité temporelle

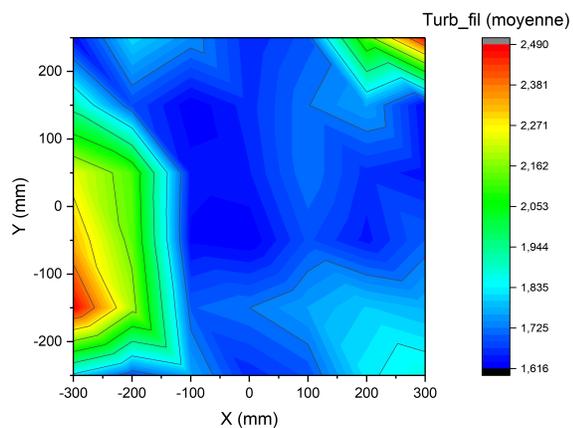


(b) Uniformité spatiale

Figure B.15: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 20 m/s et 20°C sans gicleur

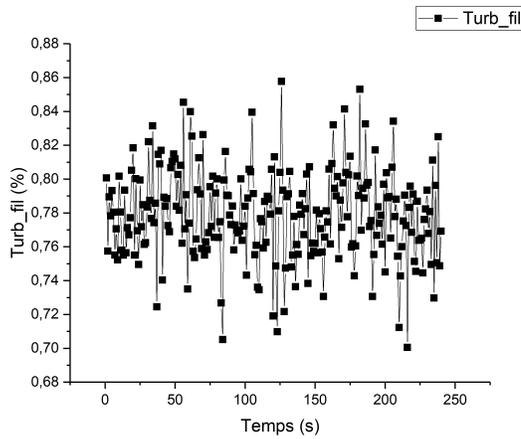


(a) Stabilité temporelle

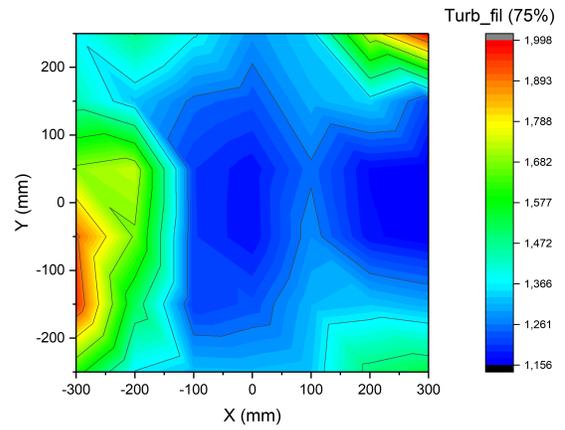


(b) Uniformité spatiale

Figure B.16: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 20 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

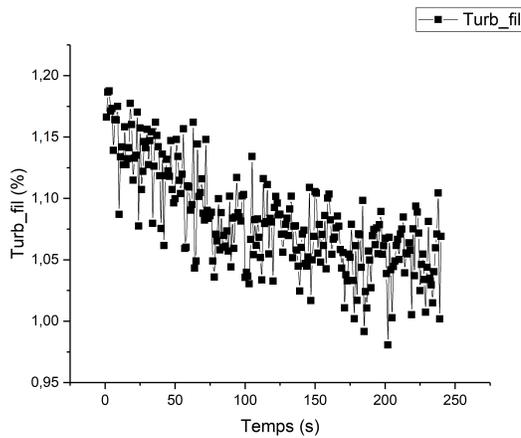


(a) Stabilité temporelle

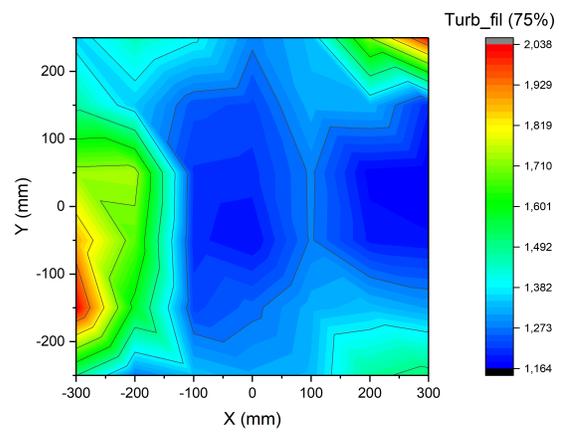


(b) Uniformité spatiale

Figure B.17: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 30 m/s et 20°C sans gicleur

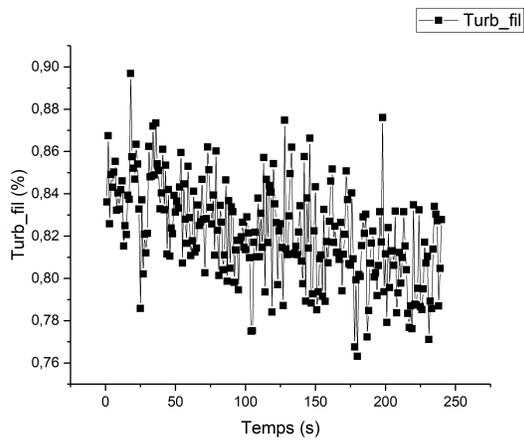


(a) Stabilité temporelle

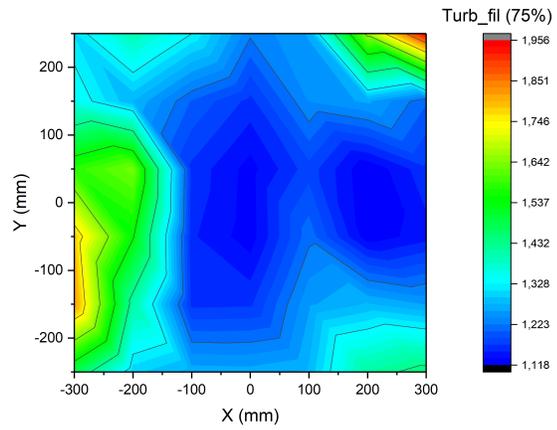


(b) Uniformité spatiale

Figure B.18: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 30 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

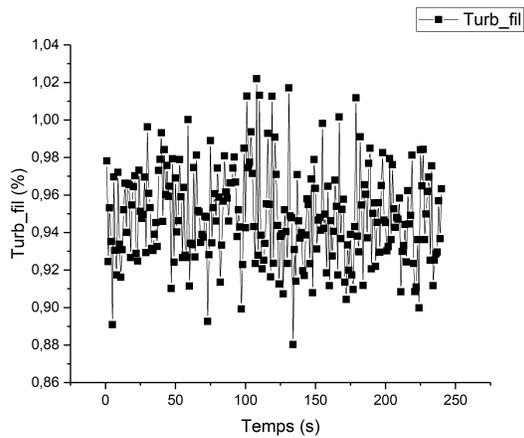


(a) Stabilité temporelle

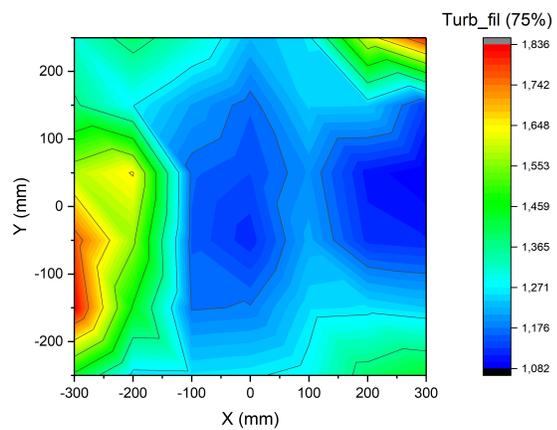


(b) Uniformité spatiale

Figure B.19: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 40 m/s et 20°C sans gicleur



(a) Stabilité temporelle



(b) Uniformité spatiale

Figure B.20: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de l'intensité de la turbulence à 40 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

B.3 ANGLE DE L'ÉCOULEMENT

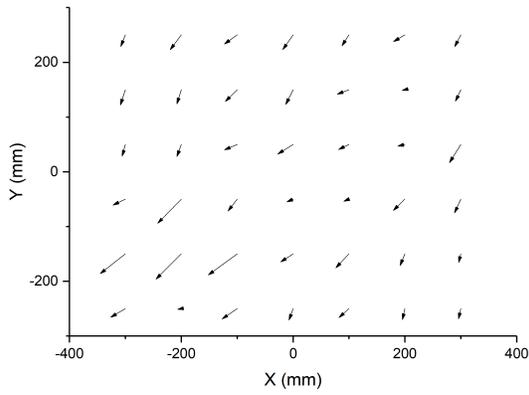


Figure B.21: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 5 m/s et 20°C sans gicleur

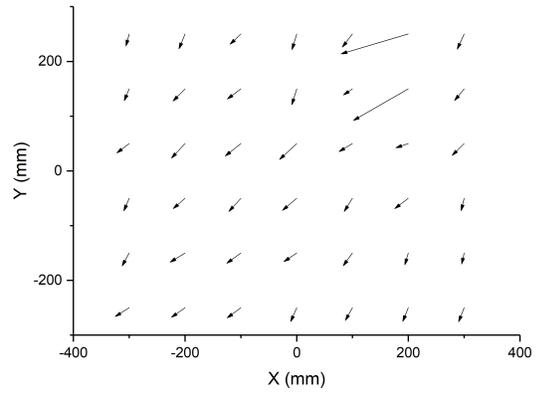


Figure B.22: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 5 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

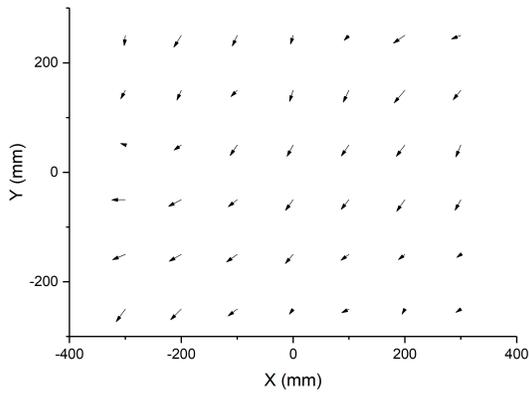


Figure B.23: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 10 m/s et 20°C sans gicleur

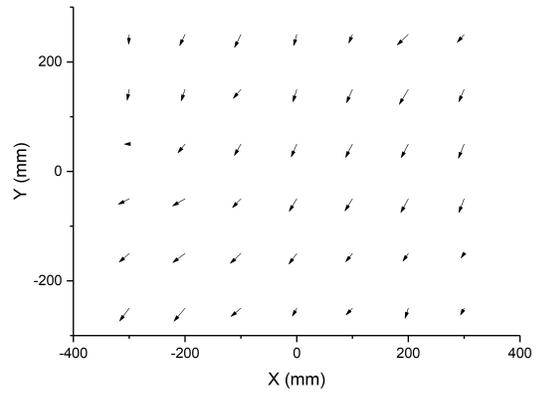


Figure B.24: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 10 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

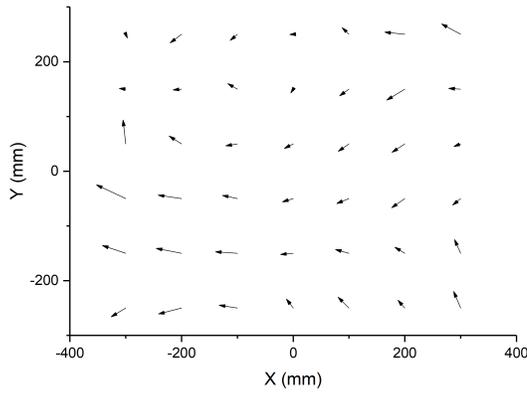


Figure B.25: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 20 m/s et 20°C sans gicleur

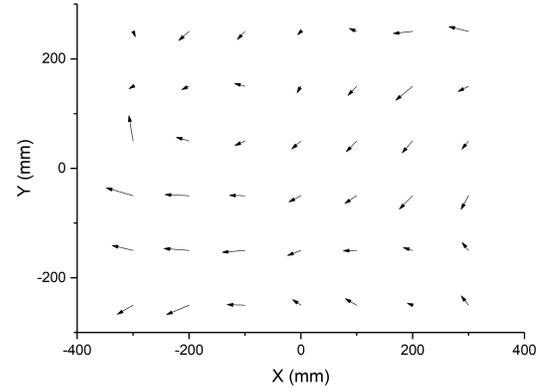


Figure B.26: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 20 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

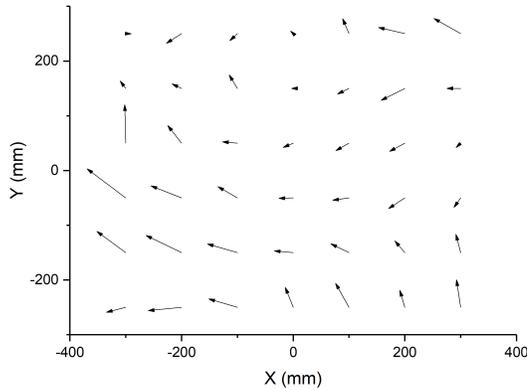


Figure B.27: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 30 m/s et 20°C sans gicleur

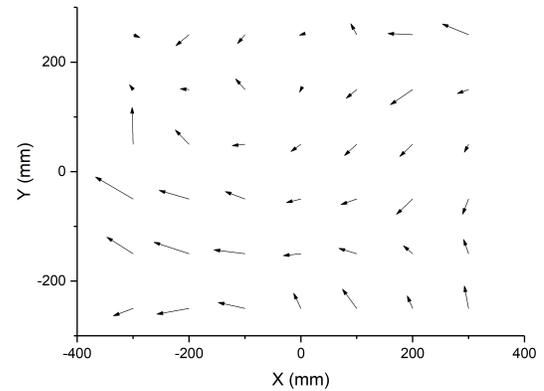


Figure B.28: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 30 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

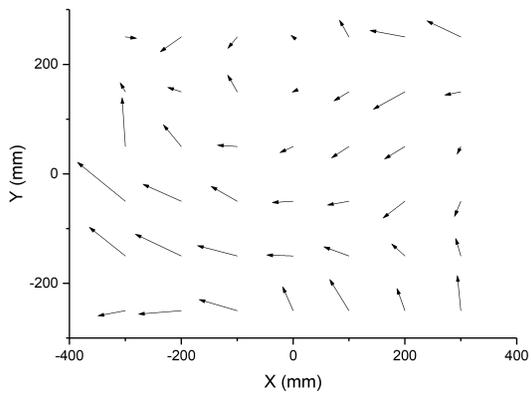


Figure B.29: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 40 m/s et 20°C sans gicleur

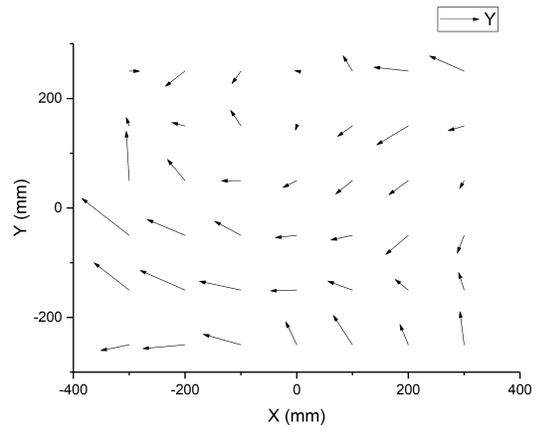
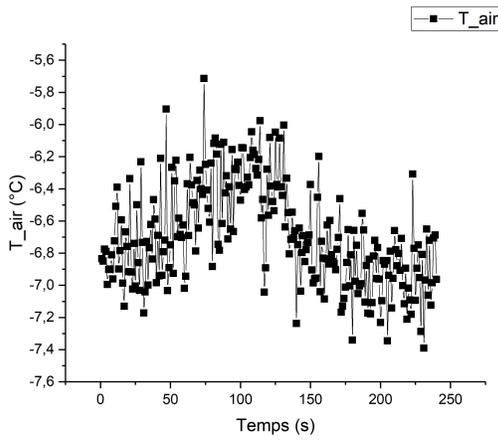
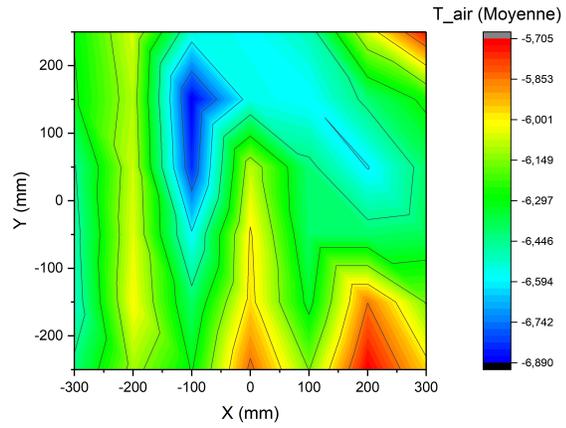


Figure B.30: Uniformité spatiale de l'angle de l'écoulement à 40 m/s et 20°C avec gicleurs à 40 PSI

B.4 TEMPÉRATURE

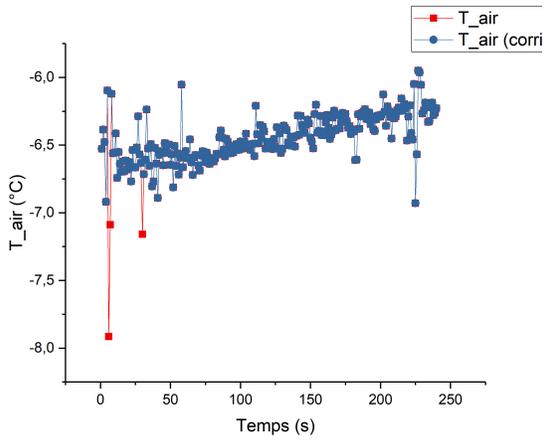


(a) Stabilité temporelle

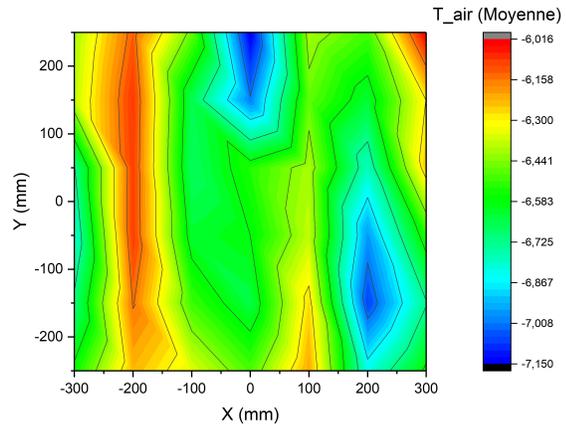


(b) Uniformité spatiale

Figure B.31: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -5°C sans gicleur

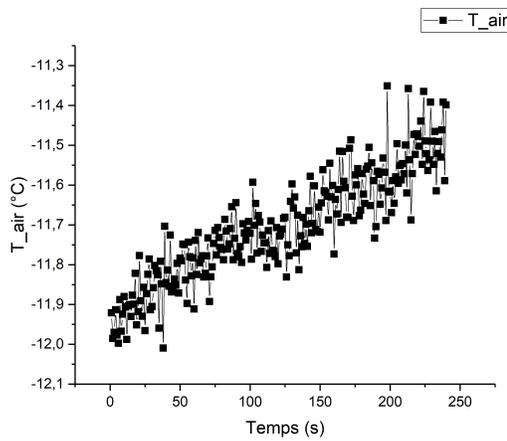


(a) Stabilité temporelle

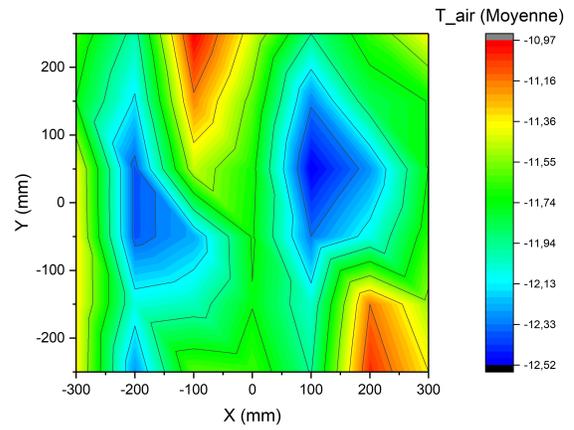


(b) Uniformité spatiale

Figure B.32: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -5°C avec gicleurs à 40 PSI

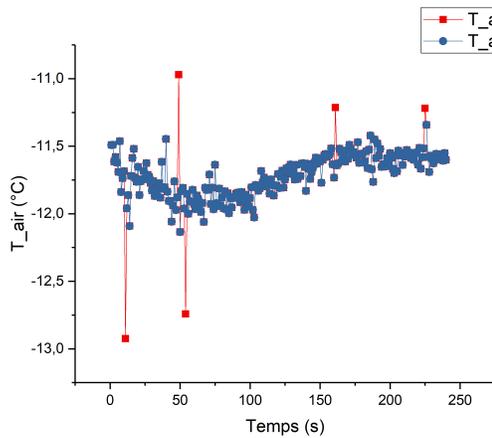


(a) Stabilité temporelle

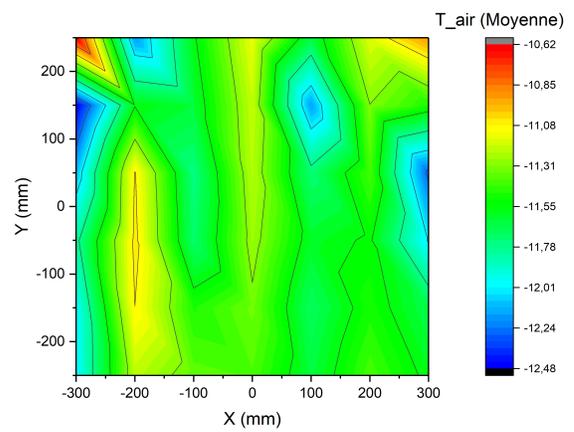


(b) Uniformité spatiale

Figure B.33: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -10°C sans gicleur

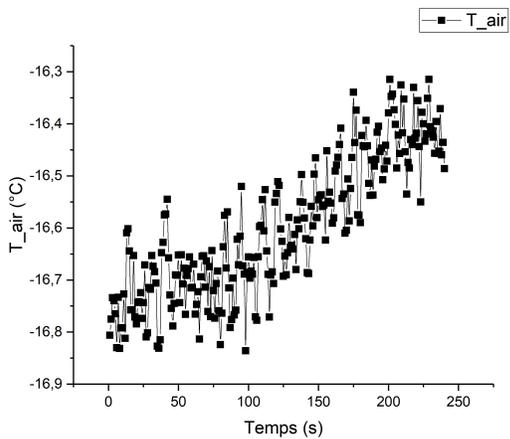


(a) Stabilité temporelle

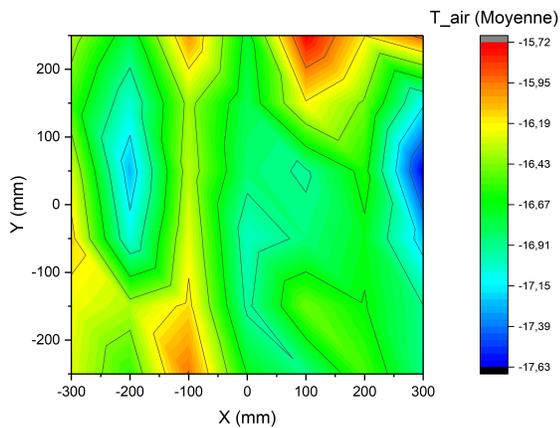


(b) Uniformité spatiale

Figure B.34: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -10°C avec gicleurs à 40 PSI

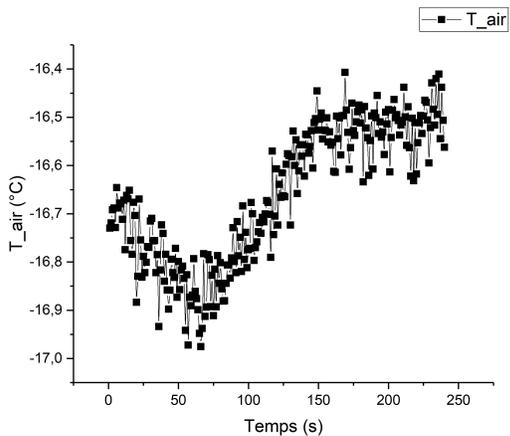


(a) Stabilité temporelle

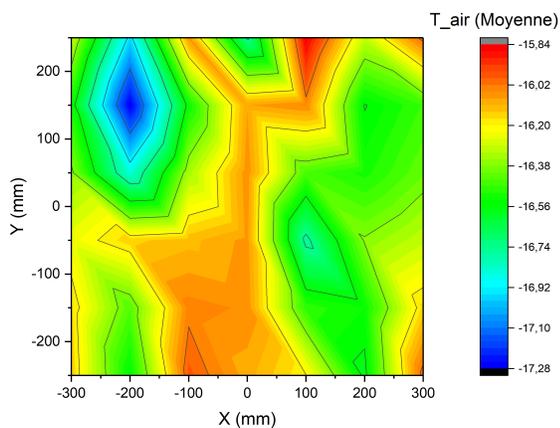


(b) Uniformité spatiale

Figure B.35: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -15°C sans gicleur

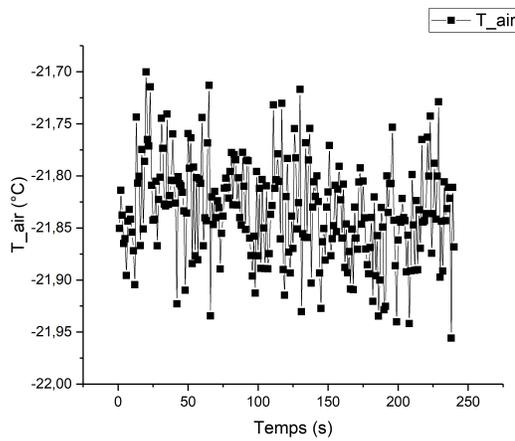


(a) Stabilité temporelle

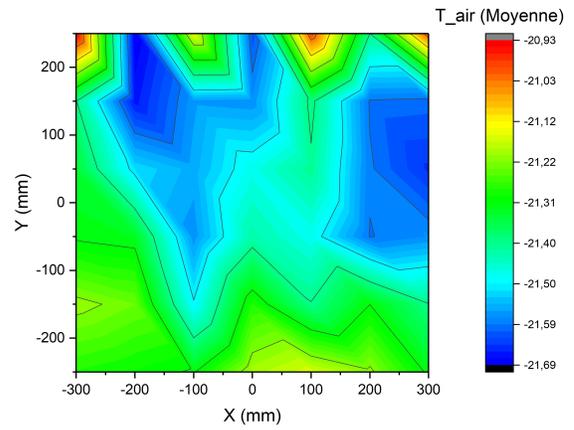


(b) Uniformité spatiale

Figure B.36: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -15°C avec gicleurs à 40 PSI

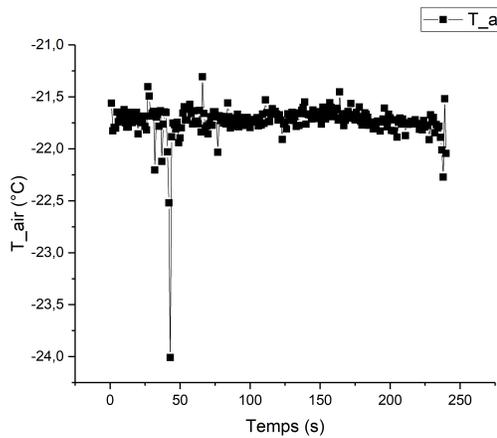


(a) Stabilité temporelle

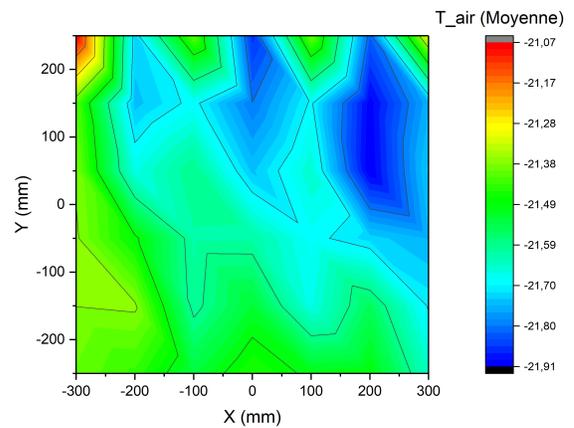


(b) Uniformité spatiale

Figure B.37: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -20°C sans gicleur

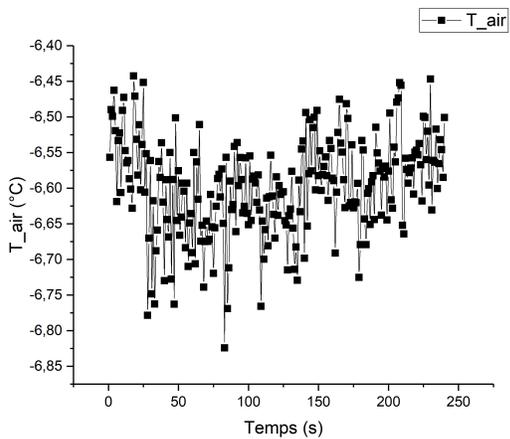


(a) Stabilité temporelle

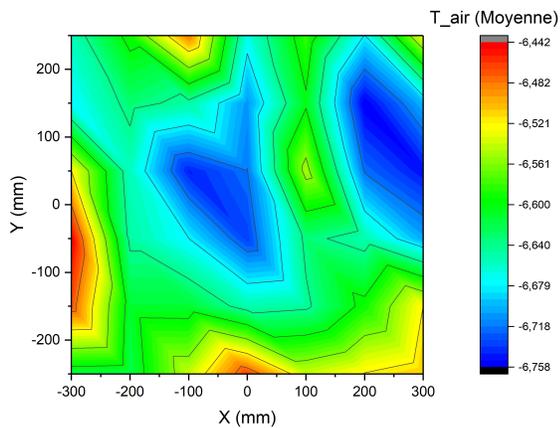


(b) Uniformité spatiale

Figure B.38: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 5 m/s et -20°C avec gicleurs à 40 PSI

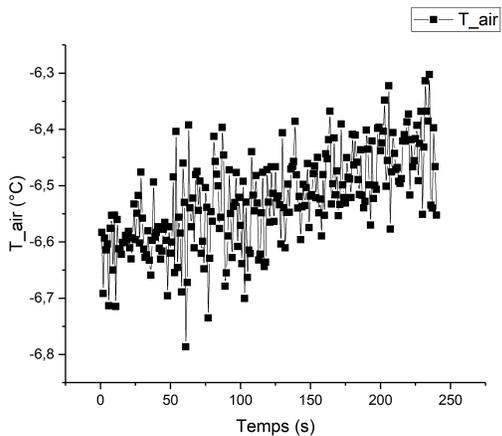


(a) Stabilité temporelle

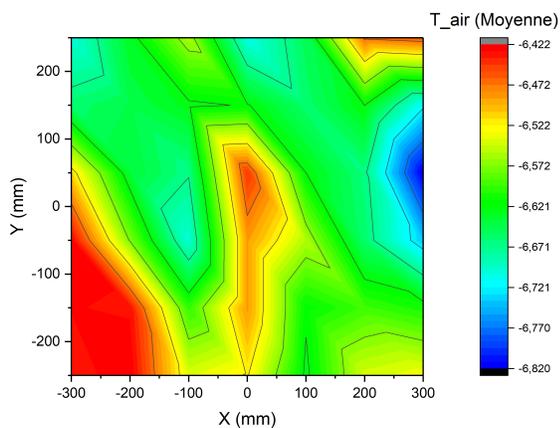


(b) Uniformité spatiale

Figure B.39: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -5°C sans gicleur

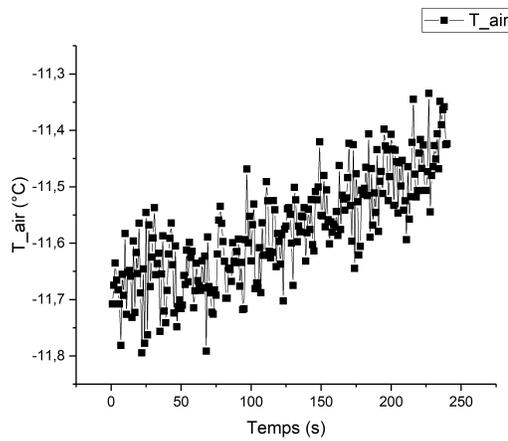


(a) Stabilité temporelle

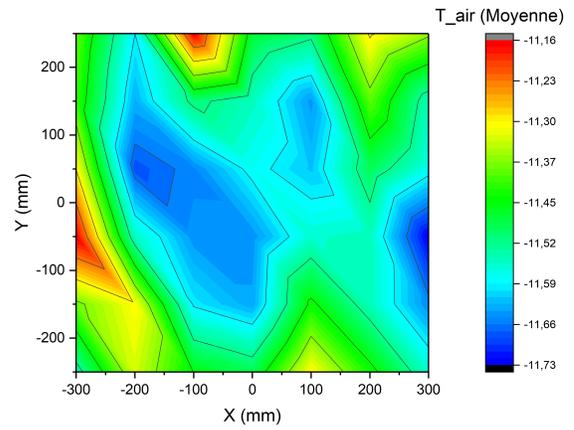


(b) Uniformité spatiale

Figure B.40: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -5°C avec gicleurs à 40 PSI

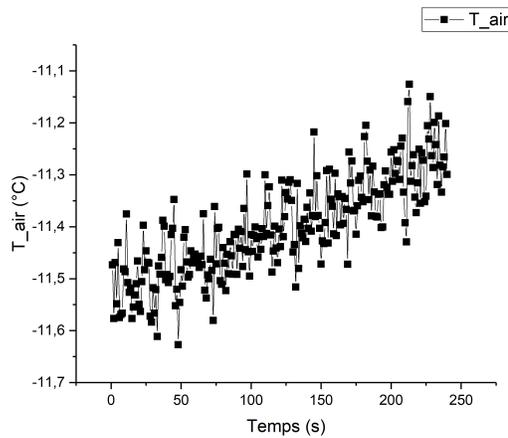


(a) Stabilité temporelle

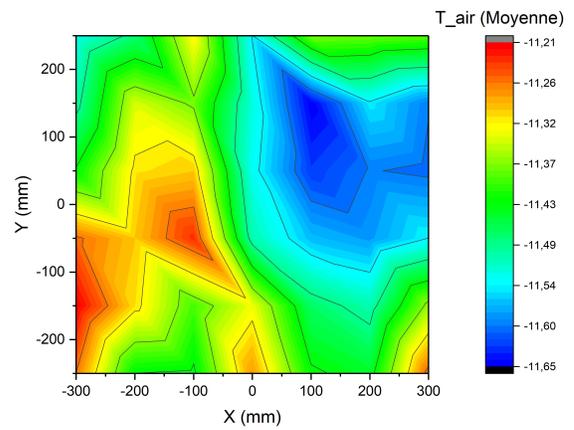


(b) Uniformité spatiale

Figure B.41: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -10°C sans gicleur

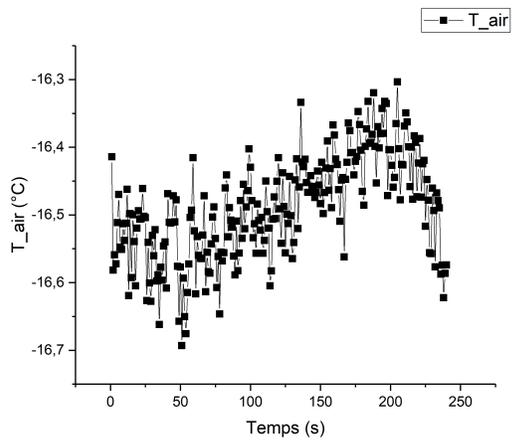


(a) Stabilité temporelle

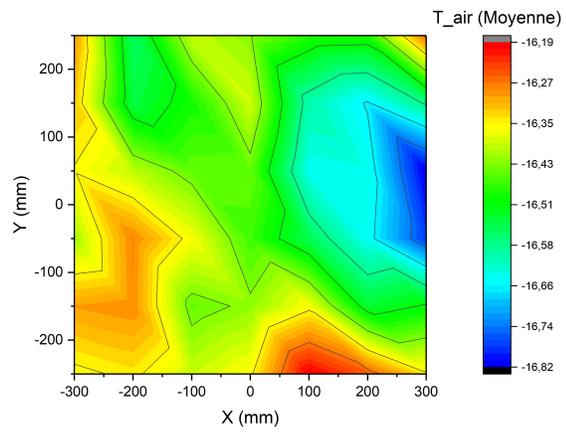


(b) Uniformité spatiale

Figure B.42: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -10°C avec gicleurs à 40 PSI

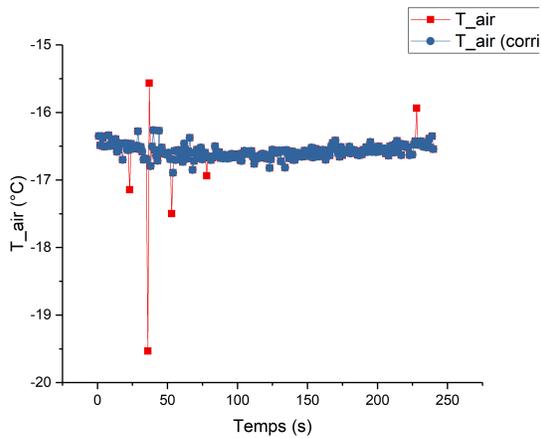


(a) Stabilité temporelle

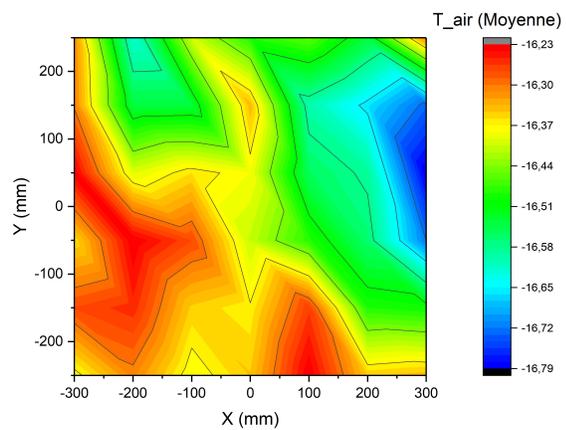


(b) Uniformité spatiale

Figure B.43: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -15°C sans gicleur

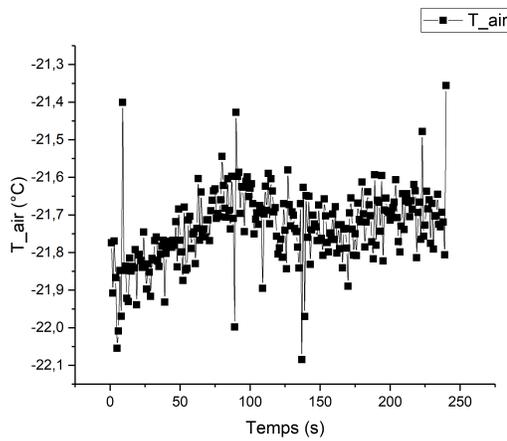


(a) Stabilité temporelle

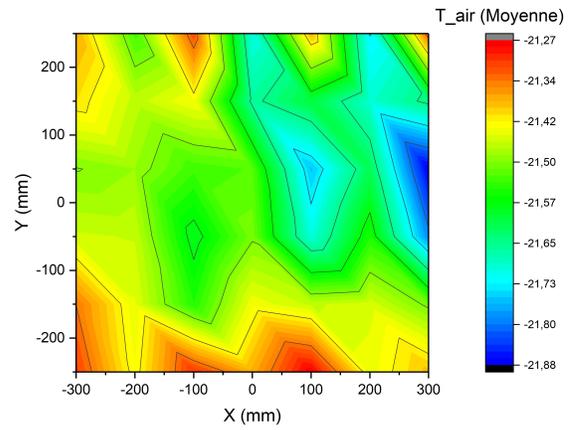


(b) Uniformité spatiale

Figure B.44: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -15°C avec gicleurs à 40 PSI

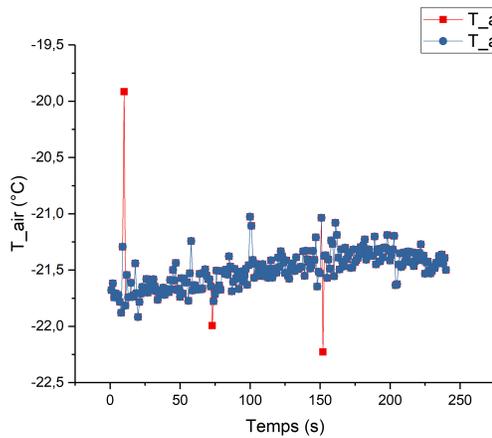


(a) Stabilité temporelle

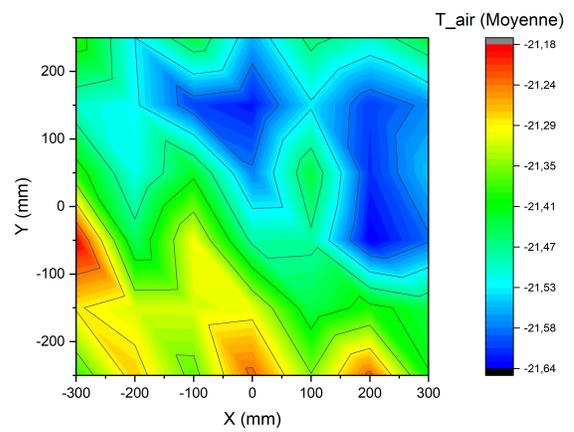


(b) Uniformité spatiale

Figure B.45: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -20°C sans gicleur

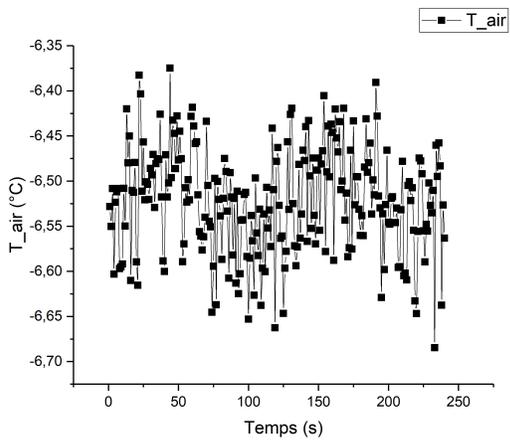


(a) Stabilité temporelle

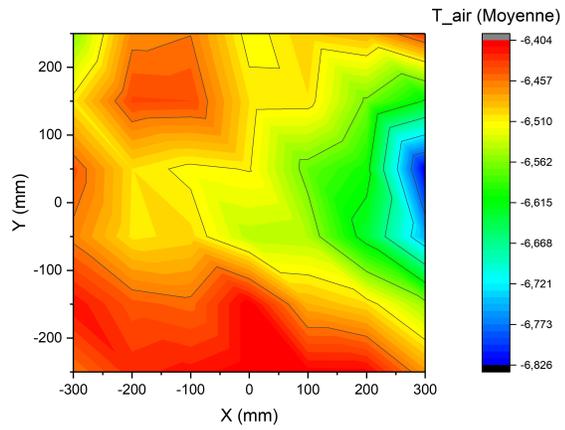


(b) Uniformité spatiale

Figure B.46: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 10 m/s et -20°C avec gicleurs à 40 PSI

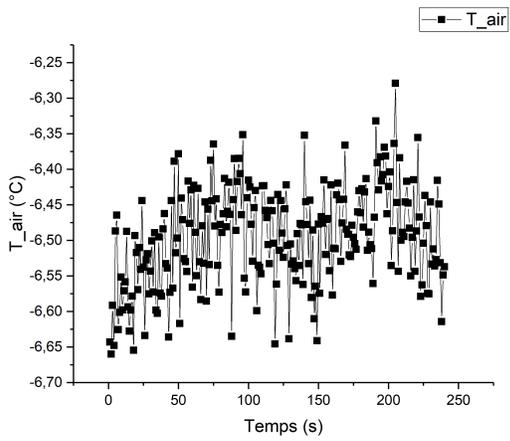


(a) Stabilité temporelle

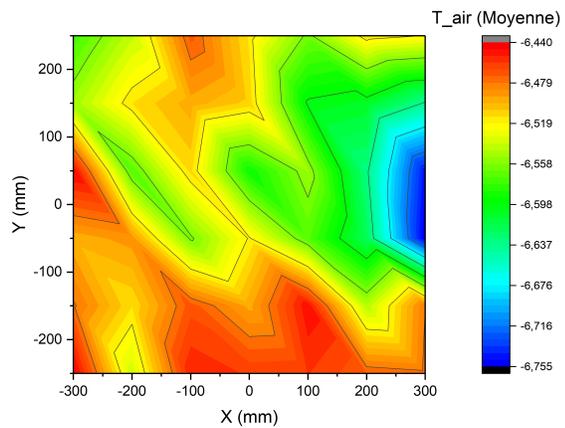


(b) Uniformité spatiale

Figure B.47: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -5°C sans gicleur

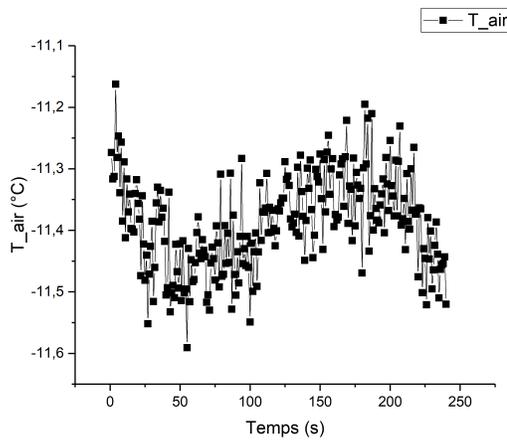


(a) Stabilité temporelle

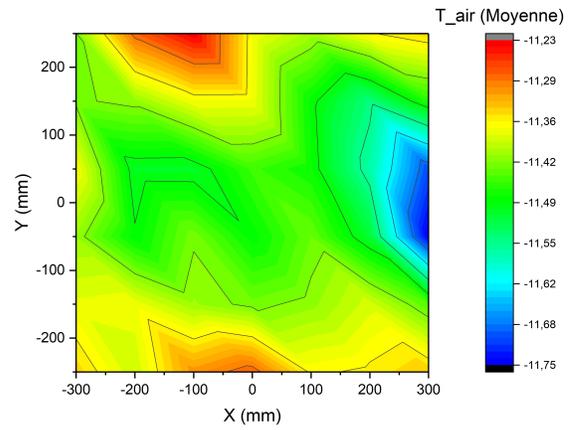


(b) Uniformité spatiale

Figure B.48: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -5°C avec gicleurs à 40 PSI

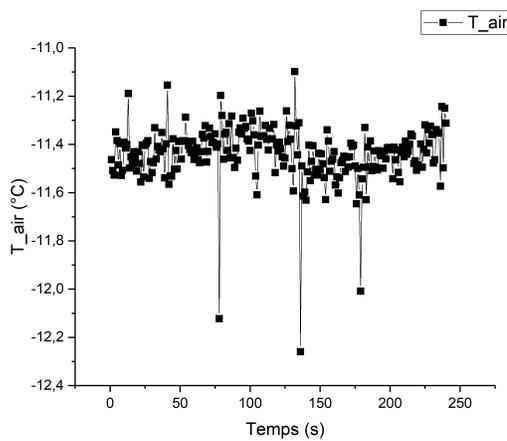


(a) Stabilité temporelle

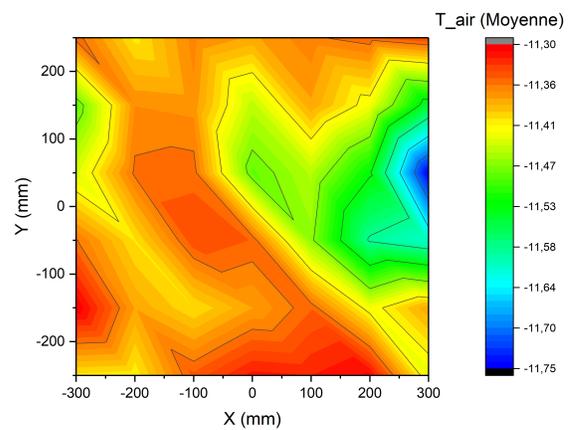


(b) Uniformité spatiale

Figure B.49: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -10°C sans gicleur

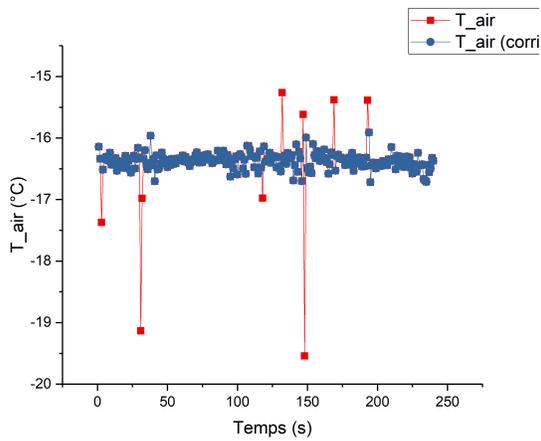


(a) Stabilité temporelle

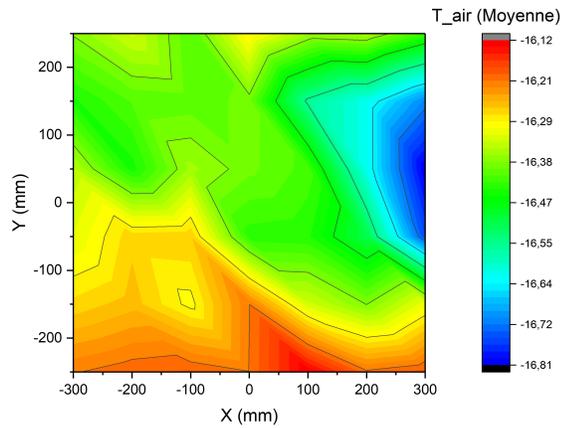


(b) Uniformité spatiale

Figure B.50: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -10°C avec gicleurs à 40 PSI

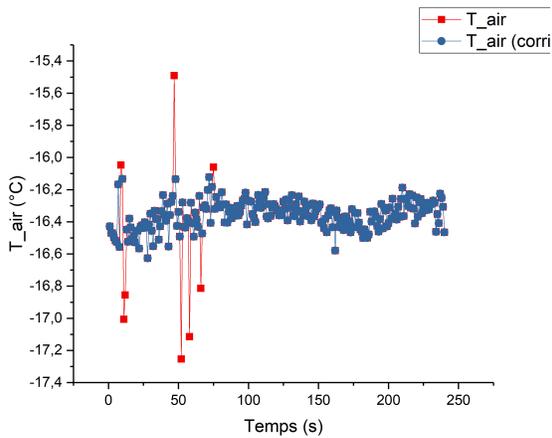


(a) Stabilité temporelle

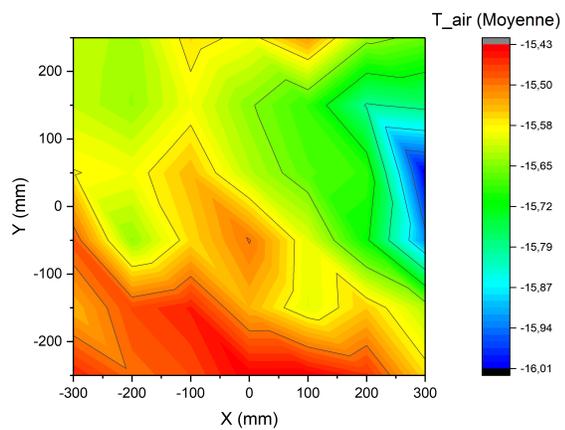


(b) Uniformité spatiale

Figure B.51: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -15°C sans gicleur

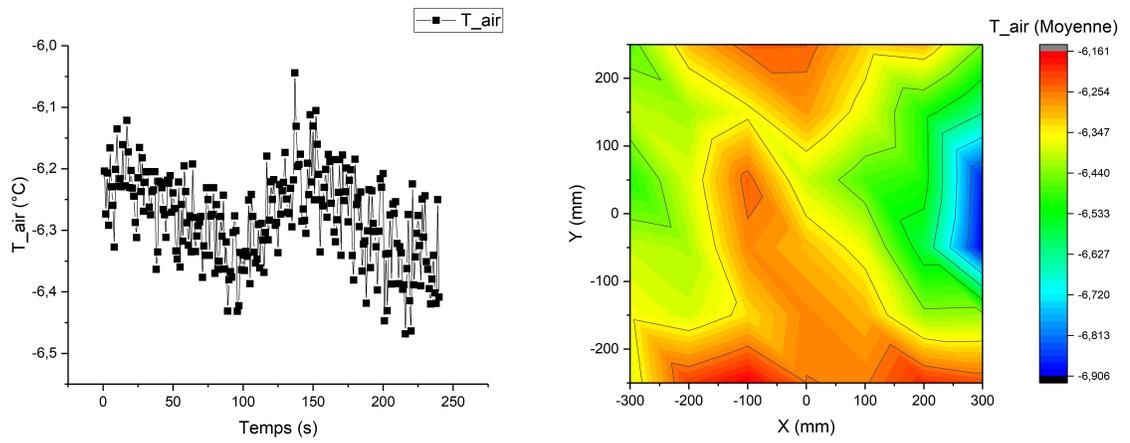


(a) Stabilité temporelle



(b) Uniformité spatiale

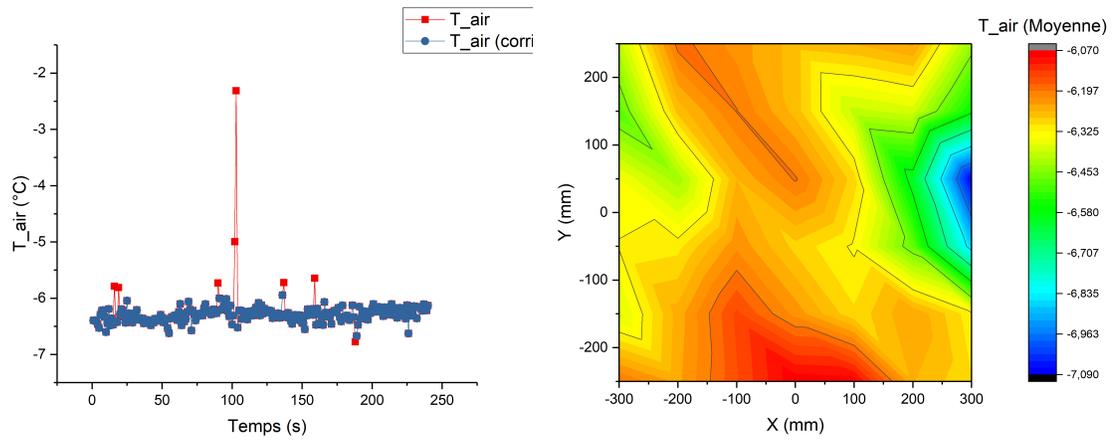
Figure B.52: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 20 m/s et -15°C avec gicleurs à 40 PSI



(a) Stabilité temporelle

(b) Uniformité spatiale

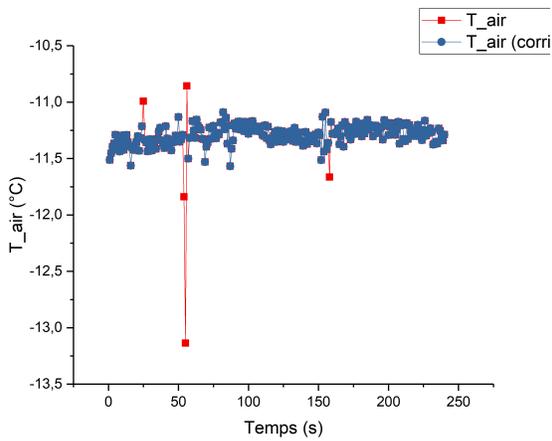
Figure B.53: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 30 m/s et -5°C sans gicleur



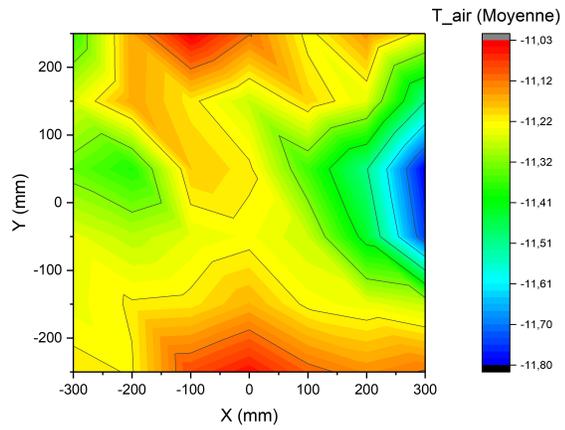
(a) Stabilité temporelle

(b) Uniformité spatiale

Figure B.54: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 30 m/s et -5°C avec gicleurs à 40 PSI

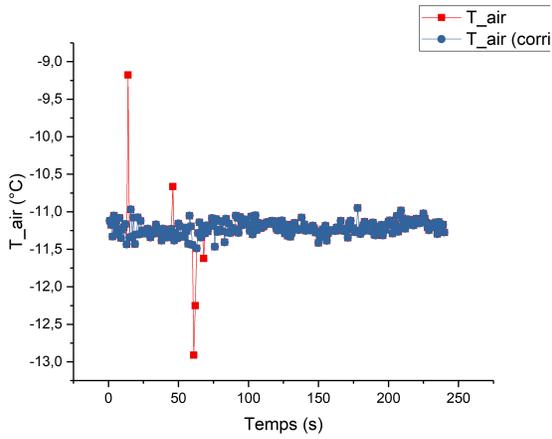


(a) Stabilité temporelle

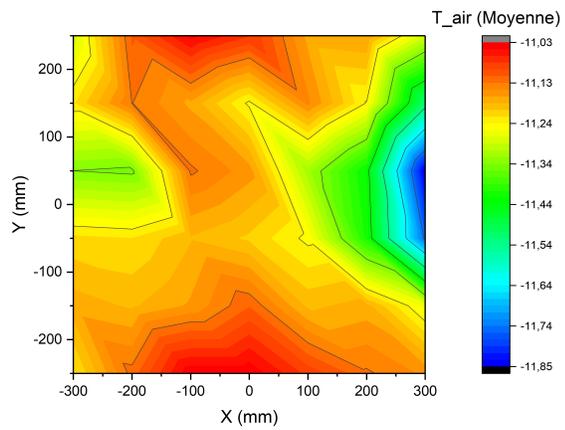


(b) Uniformité spatiale

Figure B.55: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 30 m/s et -10°C sans gicleur



(a) Stabilité temporelle



(b) Uniformité spatiale

Figure B.56: Stabilité temporelle et uniformité spatiale de la température à 30 m/s et -10°C avec gicleurs à 40 PSI

ANNEXE C

ÉQUATIONS ET EXEMPLES DE CALCUL

C.1 VITESSE DANS LA SECTION D'ESSAI

La vitesse dans la section d'essai est calculée à l'aide de l'équation de Bernoulli où p_{TS} est la pression mesurée dans la section d'essai, ρ_{air} est la densité de l'air, U_{TS} est la vitesse dans la section d'essai, p_{RS} est la pression mesurée dans la section des rampes et U_{RS} est la vitesse dans la section des rampes.

$$p_{TS} + 1/2\rho_{air}U_{TS}^2 = p_{RS} + 1/2\rho_{air}U_{RS}^2 \quad (C.1)$$

Avec l'équation de la continuité, le débit volumique est présenté en C.2 où \dot{V} est le débit volumique, A_{TS} est l'aire de la section d'essai, U_{TS} est la vitesse de la section d'essai, A_{RS} est l'aire de la section des rampes et U_{RS} est la vitesse dans la section des rampes.

$$\dot{V} = A_{TS}U_{TS} = A_{RS}U_{RS} \quad (C.2)$$

La vitesse dans la section d'essai est donnée par l'équation C.3.

$$U_{TS} = \sqrt{2 \left(1 - \frac{A_{TS}^2}{A_{RS}^2}\right)^{-1} \frac{p_{RS} - p_{TS}}{\rho_{air}}} \quad (C.3)$$

C.2 CALCUL DE LA TENEUR EN EAU LIQUIDE (LWC)

C.2.1 CYLINDRE ROTATIF

Lorsque la température de l'air est sous la limite de Schuman–Ludlam, les gouttes d'eau captées sont gelées instantanément. Ainsi, la masse de glace (m_i) est égale à la masse d'eau (m_w) et est en relation avec la teneur en eau liquide selon l'équation C.4 où e_c est le coefficient de captation du cylindre (voir section C.2.1), LWC_c est la teneur en eau liquide, A_c est l'aire du cylindre perpendiculaire à l'écoulement et U_{TS} la vitesse dans la section d'essai.

$$m_i = m_w = e_c LWC_c A_c U_{TS} \quad (C.4)$$

L'aire de la section perpendiculaire à l'écoulement du cylindre suite à l'accumulation de glace est donnée selon l'équation C.5 où A_c est l'aire moyenne du cylindre, d_c est le diamètre du cylindre, τ_i est l'épaisseur de glace et l_c est la longueur du cylindre

$$A_c = (d_c + \tau_i) l_c \quad (C.5)$$

Le calcul de la teneur en eau liquide basé sur la masse de glace accumulée sur le cylindre ainsi que l'épaisseur de celle-ci est donnée à l'équation C.6 alors que la teneur en eau en fonction de la masse de glace seulement est donnée à l'équation C.7. Dans ces équations, t est le temps d'exposition et ρ_i la densité de la glace.

$$LWC_c = \frac{m_i}{e_c(d_c + \tau_i)l_c U_{TSt}} \quad (C.6)$$

$$LWC_c = \frac{\pi \rho_i}{e_c U_{TSt}} \left(\sqrt{\frac{m_i}{\pi \rho_i l_c} + \frac{d_c^2}{4}} - \frac{d_c}{2} \right) \quad (C.7)$$

Coefficient de captation du cylindre rotatif

Le coefficient de captation du cylindre rotatif est donné par l'équation C.8 où St_0 est le paramètre de Stokes modifié, calculé par l'équation C.9, nécessaire lorsque le paramètre de Stokes (St), calculé à l'équation C.10, est inférieur à 3 et le paramètre d'inertie (ϕ), calculé par l'équation C.11, est inférieur à 100. dans ces équations, MVD est le diamètre volumétrique médian des gouttes et Re_{MVD} est le nombre de Reynolds des gouttes calculé à l'équation C.12. Ces équations empiriques proviennent des travaux de Knezevici et al. (2005)

$$e_c = 0,457[\log(8St_0)]^{1,634} \quad (C.8)$$

$$St_0 = 0,125 + \frac{St - 0,125}{1 + 0,1206Re_{MVD}^{0,59}} \quad (C.9)$$

$$St = \frac{U_{TS}MDV^2\rho_w}{9\mu_a(d_c + \tau_i)} \quad (C.10)$$

$$\phi = \frac{Re_{MVD}^2}{St} \quad (C.11)$$

$$Re_{MVD} = \frac{\rho_a}{\mu_a}MVDU_{TS} \quad (C.12)$$

C.2.2 PROFIL AÉRODYNAMIQUE

La mesure de la teneur en eau liquide à l'aide du profil aérodynamique (LWC_a) est simple et requiert seulement l'équation C.13 où e_i est le coefficient de captation déterminé numériquement lors de travaux antérieurs du LIMA accompli par Fortin (2003), et ce, à l'aide de la méthode des trajectoires, ρ_i est la densité de glace, τ_i est l'épaisseur de glace, U_{TS} est la vitesse dans la section d'essai et t est le temps d'exposition.

$$LWC_a = \frac{\tau_i\rho_i}{e_aU_{TS}t} \quad (C.13)$$

C.2.3 APPAREIL LWC-200

La puissance dissipée (P_K) par le fil est la somme des puissances due aux pertes de chaleur par convection (P_c) et d'évaporation de l'eau (P_v).

$$P_K = P_c + P_v \quad (\text{C.14})$$

La perte de chaleur associée à l'évaporation de l'eau (P_v) est calculée selon l'équation C.15 où l_K est la longueur du fil, LWC_K est la teneur en eau liquide, d_K est le diamètre du fil, U_{TS} est la vitesse dans la section d'essai, L_v est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, c_w est la chaleur spécifique de l'eau, T_e est la température absolue d'évaporation de l'eau et T_S est la température statique de l'air.

$$P_v = l_K d_K U_{TS} LWC_K [L_v + c_w (T_e - T_S)] \quad (\text{C.15})$$

On mesure la puissance dissipée lors de l'essai. L'accomplissement d'un essai à vide permet de déterminer la perte de chaleur par convection en l'absence d'eau à évaporer. Il est donc possible de d'obtenir l'équation C.16 à l'aide des équations C.14 et C.15 afin de calculer la teneur en eau liquide (LWC_K) à l'aide de P_{dry} correspondant à la puissance dissipée mesurée lors de l'essai à vide aux conditions équivalentes. Dans cette équation le facteur K correspond

au facteur de conversion d'unité permettant d'obtenir une teneur en eau liquide en g/m^3 et e_K le coefficient de captation calculé pour le fil chaud selon la méthode décrite en C.2.1.

$$LWC_K = K \frac{(P_K - P_{dry})}{l_K d_K U_{TS} e_K [L_v + c_w (T_e - T_S)]} \quad (\text{C.16})$$

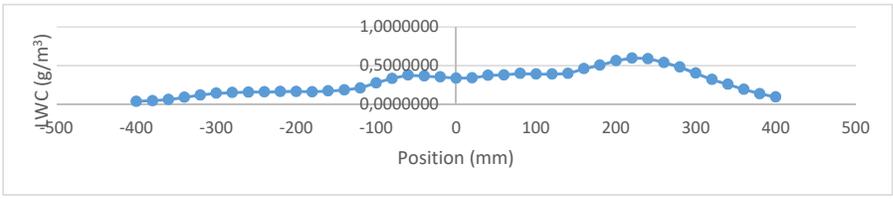
ANNEXE D

FICHES D'ESSAI

D.1 CALCUL LWC (LWC-200)

Mesure de teneur en eau liquide (LWC)

Nom	115-116	P_{air} gicleur (PSI)	45
Date	25/09/2017		
P_{atm} (kPa)	-		
Appareil	LWC-200		



Constantes

Longueur du capteur (m)	0,02	Chaleur latente de vaporization (kJ/kg)	2274,66	Température d'ébullition de l'eau (K)	372,39
Diamètre du capteur (m)	0,0018	Chaleur spécifique de l'eau (kJ/kgK)	4,182	Pression statique (mbar)	1005
Vitesse moyenne air (m/s)	20,23	Température de l'air (°C)	21,54		

Calcul LWC

Position	Mesure à sec	Mesure mouillée	Différence de voltage	Puissance dissipée (P-P ₀)	Teneur en eau liquide (LWC)
mm	V	V	V	W	
400	0,4807190	0,4983353	0,0176163	0,1761633	0,0930615
380	0,4783947	0,5039687	0,0255740	0,2557400	0,1350993
360	0,4768700	0,5130100	0,0361400	0,3614000	0,1909161
340	0,4763397	0,5250973	0,0487577	0,4875767	0,2575713
320	0,4763147	0,5366540	0,0603393	0,6033933	0,3187535
300	0,4761707	0,5521923	0,0760217	0,7602167	0,4015983
280	0,4749490	0,5656530	0,0907040	0,9070400	0,4791604
260	0,4726517	0,5746543	0,1020027	1,0200267	0,5388477
240	0,4723223	0,5839300	0,1116077	1,1160767	0,5895879
220	0,4723820	0,5855907	0,1132087	1,1320867	0,5980454
200	0,4727133	0,5789993	0,1062860	1,0628600	0,5614752
180	0,4732087	0,5687637	0,0955550	0,9555500	0,5047867
160	0,4728953	0,5596707	0,0867753	0,8677533	0,4584065
140	0,4739683	0,5492660	0,0752977	0,7529767	0,3977737
120	0,4742710	0,5477983	0,0735273	0,7352733	0,3884216
100	0,4745017	0,5480457	0,0735440	0,7354400	0,3885096
80	0,4733403	0,5483947	0,0750543	0,7505433	0,3964882
60	0,4747043	0,5464223	0,0717180	0,7171800	0,3788634
40	0,4748600	0,5452337	0,0703737	0,7037367	0,3717617
20	0,4746290	0,5389237	0,0642947	0,6429467	0,3396483
0	0,4743083	0,5381723	0,0638640	0,6386400	0,3373732
-20	0,4738427	0,5406513	0,0668087	0,6680867	0,3529290
-40	0,4742963	0,5434490	0,0691527	0,6915267	0,3653116
-60	0,4737557	0,5449603	0,0712047	0,7120467	0,3761516
-80	0,4733400	0,5362857	0,0629457	0,6294567	0,3325220
-100	0,4738057	0,5258447	0,0520390	0,5203900	0,2749055
-120	0,4763777	0,5160147	0,0396370	0,3963700	0,2093897
-140	0,4769360	0,5115187	0,0345827	0,3458267	0,1826892
-160	0,4786117	0,5109480	0,0323363	0,3233633	0,1708226
-180	0,4803037	0,5105593	0,0302557	0,3025567	0,1598311
-200	0,4804083	0,5116440	0,0312357	0,3123567	0,1650081
-220	0,4808877	0,5114130	0,0305253	0,3052533	0,1612556
-240	0,4807537	0,5108737	0,0301200	0,3012000	0,1591144
-260	0,4804633	0,5101307	0,0296673	0,2966733	0,1567231
-280	0,4811450	0,5094743	0,0283293	0,2832933	0,1496549
-300	0,4806893	0,5074850	0,0267957	0,2679567	0,1415530
-320	0,4804497	0,5029520	0,0225023	0,2250233	0,1188727
-340	0,4805053	0,4971923	0,0166870	0,1668700	0,0881521
-360	0,4825313	0,4938340	0,0113027	0,1130267	0,0597084
-380	0,4843347	0,4929437	0,0086090	0,0860900	0,0454786
-400	0,4833947	0,4904607	0,0070660	0,0706600	0,0373274

Configuration des rampes

No. gicleur	Débit rampe inférieure	Débit rampe centre	Débit rampe supérieure
-	u	u	u
1	0	30	0
2	0	30	0
3	0	30	0
4	0	30	0
5	0	30	0
6	0	30	0
7	0	30	0
8	0	30	0
9	-	30	-

D.2 CALCUL LWC (CYLINDRE ROTATIF)

Mesure de teneur en eau liquide (LWC)

Nom	178	P _{air gicleur (PSI)}	45
Date	23/01/2018		
P _{atm (kPa)}	-		
Appareil	profil		

Cylindre (épaisseur)				
Position	D ₀	D _f	ΔD	
mm	mm	mm	mm	
-400	26,45	26,6	0,15	0,00807
-350	26,46	27,41	0,95	0,05111
-300	26,49	29,65	3,16	0,170008
-250	26,58	30,8	4,22	0,227036
-200	26,44	31,31	4,87	0,262006
-150	26,44	33,12	6,68	0,359384
-100	26,6	36,52	9,92	0,533696
-50	26,52	37,4	10,88	0,585344
0	26,5	34,45	7,95	0,42771
50	26,53	35,4	8,87	0,477206
100	26,45	36,8	10,35	0,55683
150	26,45	38,2	11,75	0,63215
200	26,42	39,44	13,02	0,700476
250	26,44	36,1	9,66	0,519708
300	26,41	33,75	7,34	0,394892
350	26,44	29,8	3,36	0,180768
400	26,55	27,04	0,49	0,026362
Moyenne	26,4805882	33,1641176	6,68352941	0,35957388

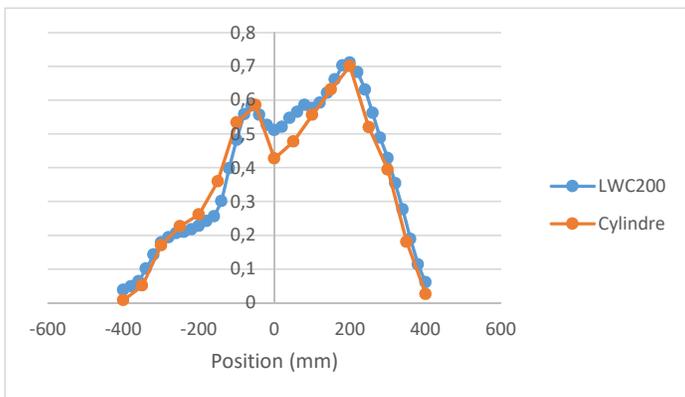
Cylindre				
m _{totale}	m _{cyl+support}	m _{glace}	LWC _m	LWC _D
g	g	g	g/m ³	g/m ³
4259,4	4039,5	219,9	0,35929982	0,32309517

Densité de glace			
Aire cylindre	Aire totale	Aire glace	Densité
m ³	m ³	m ³	kg/m ³
0,000550738	0,00086383	0,00028178	780,39607

Comparaison LWC200	
Position	LWC
mm	g/m ³
400	0,06049333
380	0,11375833
360	0,18939
340	0,276325
320	0,35432333
300	0,428295
280	0,48825167
260	0,56213333
240	0,63132167
220	0,68308
200	0,71137333
180	0,70261667
160	0,66149333
140	0,62166333
120	0,59268167
100	0,57613833
80	0,58553
60	0,56530833
40	0,54718
20	0,520585
0	0,51158333
-20	0,52677833
-40	0,556425
-60	0,58334667
-80	0,558135
-100	0,481785
-120	0,39810333
-140	0,30122
-160	0,25559167
-180	0,24181
-200	0,22772167
-220	0,21717
-240	0,20986333
-260	0,20571833
-280	0,19392167
-300	0,17889167
-320	0,14258
-340	0,10117167
-360	0,064005
-380	0,04852
-400	3,82E-02
Moyenne	0,388159

Constantes	
Densité glace (kg/m ³)	780,39607
Vitesse air (m/s)	20
Temps (s)	2700
Diamètre cyl (m)	0,026480588
Longueur cyl. (m)	0,9
MVD (m)	2,30E-05
Viscosité de l'air (Pa*s)	1,72E-05
Densité air (kg/m ³)	1,225
Densité eau (kg/m ³)	1000

Variable	
Stokes	2,063248565
Stokes modifié	1,121217501
Paramètre d'inertie	521,4227432
Reynolds MVD	32,79976717
Coef. Captation	0,42226983



D.3 CALCUL LWC (PROFIL AÉRODYNAMIQUE)

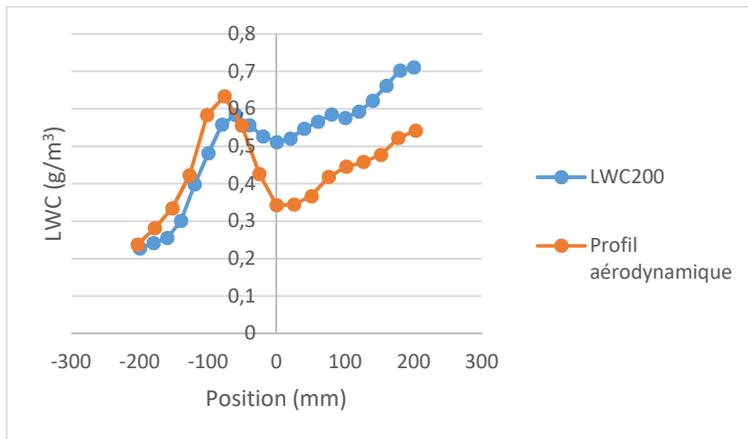
Mesure de teneur en eau liquide (LWC)

Nom	178	P _{air} gicleur (PSI)	45
Date	23/01/2018		
P _{atm} (kPa)	-		
Appareil	profil		

Profil aérodynamique				
Position	e ₀	e _f	Δe	LWC
mm	mm	mm	mm	g/m ³
-203,4	101,81	106,09	4,28	0,23777778
-178	101,82	106,9	5,08	0,28222222
-152,6	101,75	107,78	6,03	0,335
-127,2	101,69	109,3	7,61	0,42277778
-101,8	100,89	111,39	10,5	0,58333333
-76,4	100,8	112,2	11,4	0,63333333
-51	100,76	110,76	10	0,55555556
-25,6	100,64	108,32	7,68	0,42666667
-0,2	100,75	106,92	6,17	0,34277778
25,2	100,7	106,9	6,2	0,34444444
50,6	100,79	107,4	6,61	0,36722222
76	100,89	108,42	7,53	0,41833333
101,4	100,86	108,88	8,02	0,44555556
126,8	102,4	110,65	8,25	0,45833333
152,2	102,35	110,95	8,6	0,47777778
177,6	102,25	111,65	9,4	0,52222222
203	102,12	111,88	9,76	0,54222222
			Moyenne	0,43503268

Comparaison LWC200	
Position	LWC
mm	g/m ³
200	0,71137333
180	0,70261667
160	0,66149333
140	0,62166333
120	0,59268167
100	0,57613833
80	0,58553
60	0,56530833
40	0,54718
20	0,520585
0	0,51158333
-20	0,52677833
-40	0,556425
-60	0,58334667
-80	0,558135
-100	0,481785
-120	0,39810333
-140	0,30122
-160	0,25559167
-180	0,24181
-200	0,22772167
Moyenne	0,51081286

Constantes	
Densité eau (kg/m ³)	850
Coef. Captation	0,85
Vitesse air (m/s)	20
Temps (s)	900



D.4 UNIFORMITÉ DU NUAGE GIVRANT (MÉTHODE DE LA GRILLE)

BIBLIOGRAPHIE

- Aberkane, M. 2012. « Implémentation numérique et calibrage d'un modèle d'endommagement ductile pour la glace atmosphérique ». Thesis.
- Arrington E., A. et C. Pastor-Barsi. 2012. Aero-thermal calibration of the nasa glenn icing research tunnel (2012 tests). Report, National Aeronautics and Space Administration.
- Barlow, J. B., W. H. Rae, et A. Pope. 1999. *Low-speed Wind tunnel testing*. Wiley-Interscience.
- Barnett, V. et T. Lewis. 1994. *Outliers in Statistical Data*. J.Wiley and Sons, 3rd édition.
- Center, N. G. R. 2012. Spray bars to help test engine icing.
- Codron, F. 2013. *Élément de mécanique des fluides*.
- Droplet Measurement Technologies. 2013. Stand-alone liquid water content (lwc-200) sensor operator manual.
- Elert, G. 2017. The physics hypertextbook : Flow regimes.
- Çengel, Y. A. et J. M. Cimbala. 2010. *Fluid Mechanics : Fundamentals and Applications*. McGraw Hill Education, 2nd édition.

- Fikke, S. M., J. E. Kristjánsson, et B. E. Kringlebotn Nygaard. 2008. *Modern Meteorology and Atmospheric Icing*, p. 1–29. Dordrecht : Springer Netherlands.
- Fortin, G. 2003. « Simulation de l'accrétion de glace sur un obstacle bidimensionnel par la méthode des bissectrices et par la modélisation des ruisselets et des gouttes de surface ». Thesis, Chicoutimi.
- . 2010. Chapitre 2 : Phénoménologie de la précipitation de la glace atmosphérique.
- Fortin, G. et J. Perron. 2007. Ice wind tunnel certification tests in accordance with sae arp5905 and air4906. Report no. 2007-GF-08, Anti-icing Materials International Laboratory (AMIL).
- Gates Learjet Corp Wichita, K. S., A. Heinrich, R. Ross, G. Zumwalt, J. Provorse, et V. Padmanabhan. 1991. Aircraft icing handbook. volume 2.
- Gent, R. W., N. P. Dart, et J. T. Cansdale. 2000. « Aircraft icing », *Philosophical Transactions : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 358, no. 1776, p. 2873–2911.
- Gleick, P. 1993. *Water in Crisis : A Guide to the World's Freshwater Resources*. Oxford University Press.
- Hall, N. 2015. Wind tunnel theory.
- HappyApple. 2006. *Venturi effect graphic*.
- Homola, M. C., M. S. Virk, T. Wallenius, P. J. Nicklasson, et P. A. Sundsbø. 2010. « Effect of atmospheric temperature and droplet size variation on ice accretion of wind turbine blades », *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 98, no. 12, p. 724–729.
- Ide, R. F. 1999. Comparison of liquid water content measurement techniques in an icing wind tunnel. Report, U.S. Army Research Laboratory.

- Jørgensen, F. E. 2002. How to measure turbulence with hot-wire anemometers.
- Kim, S. C. et J. Y. Kim. 2013. « The effect of flow approaching angle on the velocity measurement using bi-directional velocity probe », *Procedia Engineering*, vol. 62, p. 797–803.
- Kimura, K. 2016. *Chapter 3 - Wind loads*. Coll. Pipinato, A., éditeur, Coll. « *Innovative Bridge Design Handbook* », p. 37 – 48. Boston : Butterworth-Heinemann.
- King, W. D., J. E. Dye, D. Baumgardner, J. W. Strapp, et D. Huffman. 1985. « Icing wind tunnel tests on the csiro liquid water probe », *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 2, no. 3, p. 340–352.
- Knezevici, D., R. Kind, et M. Oleskiw. 2005. « Determination of medium volume diameter (mvd) and liquid water content(lwc) by multiple rotating cylinders », *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*.
- Kuroiwa, D. 1965. *Icing and Snow Accretion on Electric Wires*. U.S. Army Materiel Command, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Libii, J. N. 2011. *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*, p. 235–260.
- Lindgren, B. et A. V. Johanson. 2002. Evaluation of the flow quality in the mtl wind-tunnel. Report, Royal Institute of Technology.
- Littmann, D. 2016. *Icing : the cold, hard (air) facts*. 01/12.
- Lobban, C., J. L. Finney, et W. F. Kuhs. 1998. « The structure of a new phase of ice », *Nature*, vol. 391, no. 6664, p. 268.

- Manshadi, M. D. 2011. *The Importance of Turbulence Reduction in Assessment of Wind Tunnel Flow Quality*. Coll. « Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research ». InTech.
- Michel, B. 1978. *Ice mechanics*. Québec : Presses de l'Université Laval.
- Mighri, F. 2006. Analyse dimensionnelle et similitude.
- Moore, E. B. et V. Molinero. 2011. « Structural transformation in supercooled water controls the crystallization rate of ice », *Nature*, vol. 479, no. 7374, p. 506–508.
- Newton, D. W. 1978. « An integrated approach to the problem of aircraft icing », *Journal of Aircraft*, vol. 15, no. 6, p. 374–380.
- OMEGA. 2000. *Practical Temperature Measurements*.
- Petrenko, V. F. et R. W. Whitworth. 2006. *Physics of ice*. Oxford University Press.
- Reckzeh, D. et H. Hansen. 2006. *High Reynolds-Number Windtunnel Testing for the Design of Airbus High-Lift Wings*, p. 1–8. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.
- SAE International. 2013. Droplet sizing instrumentation used in icing facilities.
- . 2015. Calibration and acceptance of icing wind tunnels.
- Vectoflow GmbH. 2017a. *Multi-hole probes with standard geometries*. 2017.
- . 2017b. Probe manual.
- Villeneuve, E. 2015. Lwc-200. Report, Anti Icing Materials International Laboratory.
- Villeneuve, E. et J. Perron. 2012. Icing wind tunnel certification tests in accordance with sae arp5905 and air4906. Report no. 2012-EV-01, Anti-icing Materials International Laboratory (AMIL).