



Modélisation du transfert thermique et du transfert de masse lors du processus d'accrétion de glace et de dégivrage des pales d'éoliennes

par Oloufemi Fakorede

Thèse présentée à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D) en ingénierie

Québec, Canada

© Oloufemi Fakorede, 2018

RÉSUMÉ

Le givrage dans les parcs éoliens est un phénomène néfaste qui entraîne des arrêts de production, des pertes aérodynamiques et réduit la durée de vie des équipements. La chute de blocs de glace après les événements givrants constitue également un sérieux problème de sécurité pour le public et les installations aux alentours. Plusieurs approches et technologies ont été mises en œuvre pour pallier les effets du givrage dans les parcs éoliens. Et, il commence à apparaître sur le marché des éoliennes conçues pour être plus robustes en climat froid et équipées de systèmes de protection contre le givre.

L'objectif de ce projet est de fournir à l'exploitant de parc des outils permettant d'estimer la consommation énergétique en mode antigivrage et dégivrage pour un système de protection contre le givre basé sur le chauffage thermique d'une part et, d'autre part, de proposer une démarche analytique permettant de choisir le système le plus adapté pour un contexte donné. Les outils proposés dans ce document ont été choisis en fonction de leur efficacité et de leur simplicité.

Notre méthodologie d'antigivrage consiste à développer un modèle antigivre basé sur une extension des travaux de Kays & Crawford pour la plaque plane ; pour le dégivrage, proposer à partir d'expériences en soufflerie une corrélation qui puisse calculer l'épaisseur de glace à fondre pour détacher un bloc de glace accumulé sur une pale et, finalement, à l'aide d'une méthode analytique d'analyse multicritère combinée avec une définition de paramètres permettant de caractériser les systèmes de protection contre le givre, proposer un outil d'aide à la décision pour le choix de la technologie optimale.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
NOMENCLATURE	xvi
DÉDICACE	xviii
REMERCIEMENTS.....	xix
INTRODUCTION	1
1.1 MISE EN CONTEXTE.....	2
1.2 EXPLOITATION D'ÉOLIENNE EN MILIEU NORDIQUE	2
1.3 PROBLÉMATIQUE	4
1.3.1 LES ARRÊTS DE PRODUCTION.....	4
1.3.2 LES PERTES AÉRODYNAMIQUES	5
1.3.3 LA RÉDUCTION DE LA DURÉE DE VIE	5
1.3.4 LES EFFETS SECONDAIRES.....	6
1.3.5 LA CLASSIFICATION DU GIVRAGE DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE.....	6
1.4 OBJECTIFS	7
1.4.1 GÉNÉRAUX	7
1.4.2 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES	8
1.5 MÉTHODOLOGIE	8
1.6 PLAN DE TRAVAIL.....	9
CHAPITRE 2.....	11
ÉTAT DE L'ART	11
2.1 TECHNIQUES DE PROTECTION CONTRE LE GIVRAGE	11
2.1.1 TECHNIQUES PASSIVES.....	11
2.1.1.1 RÉDUCTION DE LA FORCE D'ADHÉRENCE	11
2.1.1.2 SYSTÈMES THERMIQUES PASSIFS.....	12
2.1.1.3 ARRÊTS PRÉVENTIFS	13
2.1.2 TECHNIQUES DE PROTECTION ACTIVES	14
2.1.2.1 MÉTHODES CHIMIQUES	14
2.1.2.2 MÉTHODES MÉCANIQUES	14
2.1.2.3 MÉTHODES THERMIQUES.....	17
2.1.2.4 CONTRÔLE D'ANGLE D'ATTAQUE	21
2.1.3 COMBINAISON DE TECHNIQUES.....	22

2.1.4	COMPARAISONS.....	24
2.1.4.1	ANALYSE DE MARCHÉ.....	24
2.1.4.2	COMPARAISONS DES TECHNIQUES DE PROTECTION CONTRE LE GIVRAGE.....	26
2.1.5	CONCLUSION.....	29
2.2	MODÉLISATION NUMÉRIQUE.....	30
2.2.1	LOGICIELS COMMERCIAUX.....	30
2.2.1.1	LEWICE.....	30
2.2.1.2	FENSAP-ICE.....	31
2.2.1.3	ANSYS CFD.....	32
2.2.2	LOGICIELS GRATUITS.....	33
2.2.3	RECHERCHES ACADÉMIQUES.....	34
2.2.4	CONCLUSION.....	36
2.3	PRINCIPALES MÉTHODES D'ANALYSE MULTICRITÈRE.....	37
2.3.1	LA THÉORIE DE L'UTILITÉ MULTI-ATTRIBUT (MAUT).....	38
2.3.2	LA MÉTHODE DE LA SOMME PONDÉRÉE.....	38
2.3.3	LES MÉTHODES ELECTRE.....	39
2.3.4	LES MÉTHODES PROMETHEE.....	39
2.3.5	LA MÉTHODE D'ANALYSE MULTICRITÈRE HIÉRARCHIQUE AMCH (AHP).....	40
	CHAPITRE 3.....	41
	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	41
3.1	LA SOUFFLERIE RÉFRIGÉRÉE.....	41
3.1.1	CONTRÔLE DE LA VITESSE ET DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR.....	42
3.1.2	CALIBRATION DE LA TENEUR EN EAU LIQUIDE.....	42
3.2	LE PROFIL DE PALE.....	47
3.2.1	FABRICATION DU PROFIL.....	47
3.2.2	INSTRUMENTATION DU PROFIL.....	48
	CHAPITRE 4.....	52
	ÉTUDE DE L'ANTIGIVRAGE.....	52
4.1	INTRODUCTION.....	52
4.2	PRINCIPES FONDAMENTAUX.....	52
4.2.1	HYPOTHÈSES.....	52
4.2.2	LA MASSE D'EAU COLLECTÉE.....	53
4.2.3	LA CHALEUR SENSIBLE.....	54
4.2.4	LE RÉCHAUFFEMENT CINÉTIQUE.....	54
4.2.5	LA PERTE DE CHALEUR PAR CONVECTION.....	55
4.2.6	LE RÉCHAUFFEMENT AÉRODYNAMIQUE.....	55

4.2.7	LA PERTE DE CHALEUR PAR ÉVAPORATION.....	56
4.2.8	LE BILAN D'ÉNERGIE.....	56
4.3	MODÉLISATION.....	57
4.3.1	DÉVELOPPEMENT.....	57
4.3.2	SYNTHÈSE.....	62
4.4	VALIDATION EXPÉRIMENTALE.....	64
4.4.1	PLAN D'EXPÉRIENCE.....	64
4.4.2	RÉPÉTABILITÉ.....	66
4.4.3	CALCUL THÉORIQUE DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE.....	70
4.4.4	VALIDATION DU MODÈLE ANALYTIQUE.....	73
4.4.4.1	ESSAIS À 10 M/S.....	73
4.4.4.2	ESSAIS À 15 M/S.....	76
4.4.4.3	ESSAIS À 20 M/S.....	78
4.4.4.4	ESSAIS À 25 M/S.....	81
4.4.4.5	ESSAIS À 30 M/S.....	83
4.4.4.6	CONCLUSION.....	85
4.4.5	COMPARAISON À DES ÉTUDES ANTÉRIEURES : EXPÉRIENCES SANS PRÉCIPITATION À TEMPÉRATURE DE SURFACE CONSTANTE.....	85
4.5	EXTRAPOLATION À UNE ÉOLIENNE.....	87
4.5.1	CALCUL THÉORIQUE DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE.....	87
4.5.2	DISCRÉTISATION DE LA PALE.....	94
4.5.2	APPLICATION.....	96
4.5.2.1	ÉTUDE DE CAS : VESTAS V90-3MW.....	96
4.5.2.2	ÉTUDE DE CAS ÉLARGIE.....	101
4.5.2.3	ANALYSE DES RÉSULTATS.....	103
CHAPITRE 5.....		106
ÉTUDE DU DÉGIVRAGE.....		106
5.1	L'ACCRÉTION DE GLACE.....	106
5.1.1	DESCRIPTION.....	106
5.1.2	PARAMÈTRES INFLUENÇANT L'ACCRÉTION DE LA GLACE.....	107
5.2	MODÉLISATION.....	107
5.2.1	MODÈLE ANALYTIQUE.....	107
5.2.2	RÉSULTATS DE SIMULATIONS.....	109
5.2.3	CONCLUSIONS.....	110
5.3	PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL.....	111
5.3.1	PLAN D'EXPÉRIENCE.....	111
5.3.2	TRAITEMENT DES MORCEAUX DE GLACES RAMASSÉS.....	113

5.3.3	TRAITEMENT DES PHOTOGRAPHIES	113
5.4	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	114
5.4.1	MESURE DU FILM D'EAU NÉCESSAIRE POUR ATTEINDRE LA SÉPARATION ...	114
5.4.1.1	ESSAIS À -5°C	114
5.4.1.2	ESSAIS À -15°C	116
5.4.1.3	ESSAIS À DURÉE CONSTANTE	118
5.4.1.4	ANALYSE DES RÉSULTATS	120
5.4.2	ESTIMATION DE LA DURÉE DU DÉGIVRAGE	123
5.4.2.1	ESSAIS À -5°C ET -15°C	123
5.4.2.2	ESSAIS À DURÉE CONSTANTE	125
5.4.2.3	ANALYSE DES RÉSULTATS	126
5.5	EXTRAPOLATION À UNE ÉOLIENNE	128
5.5.1	ÉTUDE DE CAS : VESTAS V90-3MW	129
5.5.2	ÉTUDE DE CAS ÉLARGIE	130
5.5.3	ANALYSE DES RÉSULTATS	131
CHAPITRE 6.....		134
COMPARAISON DES SYSTÈMES DE PROTECTION CONTRE LE GIVRE.....		134
6.1	CRITÈRES DE COMPARAISON	134
6.1.1	CONTRAINTES	134
6.1.2	LA CAPACITÉ DE RETROFIT	134
6.1.3	NÉCESSITÉ D'UN ARRÊT DE L'ÉOLIENNE	134
6.1.4	LA CAPACITÉ DE PUISSANCE DES MOTEURS AUXILIAIRES DE L'ÉOLIENNE	135
6.1.5	LA SÉVÉRITÉ DU GIVRAGE	135
6.2	PARAMÈTRES	135
6.2.1	LE FLUX THERMIQUE	136
6.2.2	LE MODE DE FONCTIONNEMENT.....	136
6.2.3	LE CONTRÔLE DU SYSTÈME	136
6.2.4	LA DÉTECTION DU GIVRE.....	137
6.2.5	LE DEGRÉ DE MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE.....	137
6.2.6	LA DURÉE DE VIE DU SYSTÈME.....	137
6.2.7	EFFICACITÉ DE LA PROTECTION	138
6.2.8	LE RISQUE D'USURE PRÉMATURÉ.....	138
6.2.9	LE COÛT D'INVESTISSEMENT	138
6.2.10	LE COÛT D'OPÉRATION.....	139
6.2.11	LE COÛT MAINTENANCE	139
6.2.12	LE NIVEAU DE RISQUE DE DÉLESTAGE DE GLACE.....	139
6.2.13	LE NIVEAU DE RISQUE POUR L'ÉOLIENNE	140
6.2.14	L'EMPREINTE CARBONE DU SYSTÈME	140

6.2.15 LA RECYCLABILITÉ DU SYSTÈME.....	140
6.2.16 LA POLLUTION SONORE.....	141
6.2.17 LA POLLUTION CHIMIQUE.....	141
6.3 ANALYSE MULTICRITÈRE	141
6.3.1 CHOIX DE LA MÉTHODE D'ANALYSE MULTICRITÈRE HIÉRARCHIQUE AMCH (AHP) 141	
6.3.2 APPLICATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE MULTICRITÈRE HIÉRARCHIQUE AMCH 142	
6.3.2.1 IMPORTANCE DES CRITÈRES	142
6.3.2.2 HIÉRARCHIE DES CRITÈRES.....	142
6.3.3.3 MATRICES DES CRITÈRES DE DÉCISION	143
6.3.3.4 ÉTUDE DE CAS	149
6.4 CONCLUSION	153
CHAPITRE 7.....	155
CONCLUSION.....	155
CHAPITRE 8.....	159
RECOMMANDATIONS	159
BIBLIOGRAPHIE.....	163
ANNEXE A.....	170
ANALYSES DIMENSIONNELLES	170
A.1 MODÈLE ANTIGIVRAGE EN RÉGIME SEC	170
A.2 MODÈLE ANTIGIVRAGE EN RÉGIME HUMIDE	170
ANNEXE B.....	173
FICHES D'EXPÉRIENCES DE DÉGIVRAGE À -5°C.....	173
B.1 DURÉE D'ACCRÉTION DE 30 MIN.....	174
B.2 DURÉE D'ACCRÉTION DE 60 MIN.....	180
B.3 DURÉE D'ACCRÉTION DE 120 MIN.....	186
ANNEXE C.....	190
FICHES D'EXPÉRIENCES DE DÉGIVRAGE À -15°C.....	190
C.1 DURÉE D'ACCRÉTION DE 30 MIN.....	191
C.2 DURÉE D'ACCRÉTION DE 60 MIN.....	197
C.3 DURÉE D'ACCRÉTION DE 120 MIN.....	203
ANNEXE D.....	207
FICHES D'EXPÉRIENCES DE DÉGIVRAGE À -10°C.....	207
D.1 DURÉE D'ACCRÉTION DE 60 MIN.....	208

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: CLASSIFICATION IEA AVEC LES RECOMMANDATIONS CORRESPONDANTES.....	7
TABLEAU 2: ANALYSE DE MARCHE.....	25
TABLEAU 3: COMPARAISON DES TECHNIQUES DE PROTECTION CONTRE LE GIVRAGE.....	27
TABLEAU 4: COMPARAISON DES LOGICIELS POUR LA MODELISATION DE L'ANTIGIVRAGE/DEGIVRAGE.....	37
TABLEAU 5: EXEMPLE D'APPLICATION DE LA METHODE MAUT.....	38
TABLEAU 6: EXEMPLE D'APPLICATION DE LA METHODE DE LA SOMME PONDEREE.....	39
TABLEAU 7: REGLAGE MANUEL DES ROTAMETRES.....	46
TABLEAU 8: VALEURS MOYENNES DE TEMPERATURE DE CHAQUE RESISTANCE POUR LES TESTS DE REPETABILITE DE L'ESSAI A.....	66
TABLEAU 9: VALEURS MOYENNES DE TENSIONS AUX BORNES DE CHAQUE RESISTANCE POUR LES TESTS DE REPETABILITE DE L'ESSAI A.....	67
TABLEAU 10: VALEURS MOYENNES DE TEMPERATURES DE CHAQUE RESISTANCE POUR LES TESTS DE REPETABILITE DE L'ESSAI B.....	67
TABLEAU 11: VALEURS MOYENNES DE TENSIONS AUX BORNES DE CHAQUE RESISTANCE POUR LES TESTS DE REPETABILITE DE L'ESSAI B.....	68
TABLEAU 12: VALEURS MOYENNES DE TEMPERATURES DE CHAQUE RESISTANCE POUR LES TESTS DE REPETABILITE DE L'ESSAI C.....	68
TABLEAU 13: VALEURS MOYENNES DE TENSIONS AUX BORNES DE CHAQUE RESISTANCE POUR LES TESTS DE REPETABILITE DE L'ESSAI C.....	69
TABLEAU 14: RECAPITULATIF DES TESTS D'ANTIGIVRAGE.....	70
TABLEAU 15: DISTRIBUTION DE L'EFFICACITE DE COLLECTION POUR UN PROFIL NACA 0012 PAR LE LOGICIEL LEWICE (APPROCHE LAGRANGIENNE) (DA SILVEIRA, ET AL., 2003)..	72
TABLEAU 16: RECAPITULATIF DES ERREURS ABSOLUES MOYENNEES.....	85
TABLEAU 17: RECAPITULATIF DES COURBES DE TENDANCES DE LA PUISSANCE DE MAINTIEN DE LA SURFACE A 5 °C EN FONCTION DE LA VITESSE POUR LES TEMPERATURES DE 0 °C, -5 °C, -10 °C ET -15 °C.....	86
TABLEAU 18: DISCRETISATION NORMALISEE DE LA CORDE DE LA PALE.....	95
TABLEAU 19: DISCRETISATION DE LA PALE D'UNE VESTAS V90-3.0 MW.....	96
TABLEAU 20: VALEURS DES CONSTANTES D'ECOULEMENT EN FONCTION DE LA TEMPERATURE AMBIANTE.....	99
TABLEAU 21: CONSOMMATION EN MODE ANTIGIVRAGE DE LA VESTAS V90-3.0 MW A -5 °C.....	99
TABLEAU 22: CONSOMMATION EN MODE ANTIGIVRAGE A DE LA VESTAS V90-3.0 MW A -10 °C.....	100
TABLEAU 23: CONSOMMATION EN MODE ANTIGIVRAGE A DE LA VESTAS V90-3.0 MW A -15 °C.....	100
TABLEAU 24: PUISSANCE REQUISE POUR L'ANTIGIVRAGE A -5 °C.....	101
TABLEAU 25: PUISSANCE REQUISE POUR L'ANTIGIVRAGE A -10 °C.....	102
TABLEAU 26: PUISSANCE REQUISE POUR L'ANTIGIVRAGE A -15 °C.....	102
TABLEAU 27: VARIATIONS DE LA DUREE DE LA FONTE EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE LA GLACE (TERREAUX, ET AL., 2012).....	109
TABLEAU 28 : VARIATIONS DE LA DUREE DE LA FONTE EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE LA GLACE POUR DIFFERENTES VITESSES D'ECOULEMENT (TERREAUX, ET AL., 2012). ..	110
TABLEAU 29: VARIATIONS DE LA DUREE DE LA FONTE EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE LA GLACE POUR DIFFERENTS ANGLES D'ATTAQUE (TERREAUX, ET AL., 2012).....	110
TABLEAU 30: VARIATION DE L'EPAISSEUR DE GLACE FONDUE EN FONCTION DE LA DUREE D'ACCRETION ET DE LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE A UNE TEMPERATURE DE -5 °C. ..	115
TABLEAU 31: ESTIMATION DES ERREURS DE MESURE POUR LES EXPERIENCES A UNE TEMPERATURE DE -5 °C.....	116
TABLEAU 32: VARIATION DE L'EPAISSEUR DE GLACE FONDUE EN FONCTION DE LA DUREE D'ACCRETION ET DE LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE A UNE TEMPERATURE DE -15 °C.	117

TABLEAU 33: ESTIMATION DES ERREURS DE MESURE POUR LES EXPERIENCES A UNE TEMPERATURE DE -15 °C.....	118
TABLEAU 34: VARIATION DE L'ÉPAISSEUR DE GLACE FONDUE POUR UNE DURÉE D'ACCRETION D'UNE HEURE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE.....	119
TABLEAU 35: TABLEAU RECAPITULATIF DES VALEURS MOYENNES DE GLACES ACCUMULÉE ET FONDUE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	121
TABLEAU 36: ÉNERGIE REQUISE POUR LE DEGIVRAGE A -5 °C.....	130
TABLEAU 37: ÉNERGIE REQUISE POUR LE DEGIVRAGE A -15 °C.....	131
TABLEAU 40: ÉCHELLE D'IMPORTANCE DES CRITERES.....	142
TABLEAU 41: HIERARCHIE DES CRITERES.....	143
TABLEAU 42: EXEMPLE DE CALCUL DE LA PONDERATION DES CRITERES.....	144
TABLEAU 43: MATRICE DES CRITERES GENERAUX.....	145
TABLEAU 44: MATRICE DES SOUS-CRITERES OPERATIONNELS.....	146
TABLEAU 45: MATRICE DES SOUS-CRITERES ENVIRONNEMENTAUX.....	146
TABLEAU 46: MATRICE DES SOUS-CRITERES D'EXPLOITATION.....	146
TABLEAU 47: MATRICE DES SOUS-CRITERES DE COUT.....	147
TABLEAU 48: MATRICE DES SOUS-CRITERES TECHNIQUES.....	147
TABLEAU 49: MATRICE DES SOUS-CRITERES DU CONTROLE DU SYSTEME.....	147
TABLEAU 50: MATRICE DES SOUS-CRITERES DE L'EMPREINTE CARBONE.....	148
TABLEAU 51: MATRICE DES SOUS-CRITERES DU NIVEAU DE POLLUTION.....	148
TABLEAU 52: MATRICE DES SOUS-CRITERES DE COUTS FIXES.....	148
TABLEAU 53: ÉVALUATION SANS CONTRAINTE DES TECHNOLOGIES DE PROTECTION CONTRE LE GIVRE ETUDIÉES.....	150
TABLEAU 54: ÉTUDE DE L'ÉVALUATION AVEC DIVERSES CONTRAINTES DES TECHNOLOGIES DE PROTECTION CONTRE LE GIVRE.....	153

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: DUREES DES PERIODES DE GIVRAGE METEOROLOGIQUE ET INSTRUMENTAL COMPAREES A CELLES DES ARRETS LORSQUE LES PALES SONT CHAUFFEES ET NON CHAUFFEES : MESURES EFFECTUEES A SAINT-BRAIS DURANT L'HIVER 2009-2010. SOURCE : (DIERER, ET AL., 2011).....	5
FIGURE 2: PALES D'EOLIENNE PEINTES EN NOIR GIVREES.	13
FIGURE 3: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU DEGIVRAGE PNEUMATIQUE (BOTURA & FISHER, 2003).....	15
FIGURE 4: DEGIVRAGE EXPULSIF. SOURCE : 8TH POLAR TECHNOLOGY CONFERENCE (RYERSON, 2012).....	16
FIGURE 5: PRINCIPE DU DEGIVRAGE ULTRASONIQUE (DEICE-UT, 2014).....	17
FIGURE 6: DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE RESISTANCE THERMIQUE.	18
FIGURE 7: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME ENERCON (ENERCON, 2011).	19
FIGURE 8: IMPACT DU GIVRAGE SUR LES COURBES DE PUISSANCE DES EOLIENNES A ANGLE D'ATTAQUE NON REGULE (A GAUCHE) COMPARE AUX EOLIENNES A ANGLE D'ATTAQUE REGULE (A DROITE) SOUS DIFFERENTES CONDITIONS DE GIVRAGE. SOURCE : VTT FINLAND (IEA WIND, 2012).....	22
FIGURE 9: REPRESENTATION DE LA NOUVELLE VERSION DU DISPOSITIF DE DEGIVRAGE D'ENERCON. SOURCE : (JONSSON & SITE ASSESSMENT, 2012).	24
FIGURE 10: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA SOUFFLERIE.....	41
FIGURE 11: RAMPE DE GICLEURS A L'ENTREE DE LA SECTION.	43
FIGURE 12: MONTAGE EXPERIMENTAL POUR LA CALIBRATION DE LA TENEUR EN EAU AVEC L'APPAREIL LWC-200.....	44
FIGURE 13: COURBE DE CARACTERISATION DES GICLEURS.	44
FIGURE 14: DISTRIBUTION DES TENEURS EN EAU LIQUIDE SUR LE PROFIL A 10 M/S ET 15 M/S AVEC UNIQUEMENT LES ROTAMETRES 2 ET 3 OUVERTS A 25 MM.....	45
FIGURE 15: VERIFICATION DES REGLAGES DETERMINES POUR LES ROTAMETRES.....	46
FIGURE 16: VERIFICATION DES REGLAGES MANUELS DES ROTAMETRES AFIN D'OBTENIR UNE TENEUR EN EAU LIQUIDE CONSTANTE LE LONG DU PROFIL (CAS ETUDIE : 10 M/S).	47
FIGURE 17: MOULE DE LA PALE BASEE SUR UN PROFIL NACA 0012.	48
FIGURE 18: ARRANGEMENT DES RESISTANCES CHAUFFANTES (REPRESENTEES EN JAUNE ET ROUGE) SUR L'EXTRADOS DU PROFIL.....	49
FIGURE 19: PROFIL NACA 0012 INSTRUMENTE.....	50
FIGURE 20: FLUXMETRE OMEGA HFS-4 EN TAILLE REELLE.....	51
FIGURE 21: MONTAGE EXPERIMENTAL INSTALLE DANS LA SOUFFLERIE REFRIGEREE.....	51
FIGURE 22: CALCUL DE L'EFFICACITE DE COLLECTION. SOURCE : (DA SILVEIRA, ET AL., 2003).	54
FIGURE 23: BILAN ENERGETIQUE.....	57
FIGURE 24: EXEMPLE D'UNE DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE A LA SURFACE SOUS FORME DE RAMPE. SOURCE : (KAYS, ET AL., 2012).....	58
FIGURE 25: EXTRADOS DU PROFIL EXPERIMENTAL NACA 0012 UNIFORMEMENT CHAUFFE A 5 °C.	65
FIGURE 26: EFFICACITE DE COLLECTION POUR UN PROFIL NACA 0012 (DA SILVEIRA, ET AL., 2003).....	73
FIGURE 27: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 10 M/S ET 0 °C.....	74
FIGURE 28: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 10 M/S ET -5 °C.	74
FIGURE 29: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 10 M/S ET -10 °C.	75
FIGURE 30: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 10 M/S ET -15 °C.	75

FIGURE 31: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 15 M/S ET 0 °C.....	76
FIGURE 32: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 15 M/S ET -5 °C.	77
FIGURE 33: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 15 M/S ET -10 °C.	77
FIGURE 34: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 15 M/S ET -15 °C.	78
FIGURE 35: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 20 M/S ET 0 °C.....	79
FIGURE 36: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 20 M/S ET -5 °C.	79
FIGURE 37: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 20 M/S ET -10 °C.	80
FIGURE 38: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 20 M/S ET -15 °C.	80
FIGURE 39: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 25 M/S ET 0 °C.....	81
FIGURE 40: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 25 M/S ET -5 °C.	81
FIGURE 41: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 25 M/S ET -10 °C.	82
FIGURE 42: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 25 M/S ET -15 °C.	82
FIGURE 43: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 30 M/S ET 0 °C.....	83
FIGURE 44: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 30 M/S ET -5 °C.	83
FIGURE 45: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 30 M/S ET -10 °C.	84
FIGURE 46: COMPARAISONS ENTRE RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAL A 30 M/S ET -15 °C.	84
FIGURE 47: PUISSANCE DE MAINTIEN DE LA SURFACE A 5 °C EN FONCTION DE LA VITESSE POUR LES TEMPERATURES DE 0 °C, -5 °C, -10 °C ET -15 °C.	87
FIGURE 48: DISTRIBUTION DE LA CORDE LE LONG DU PROFIL D'UNE PALE MESURANT UN METRE DE LONG.	95
FIGURE 49: REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DISCRETISATION DE LA VESTAS V90-3.0 MW.	97
FIGURE 50: HISTOGRAMME COMPARATIF DES PUISSANCES CONSOMMEES EN ANTIGIVRAGE PAR RAPPORT AUX PUISSANCES PRODUITES.	103
FIGURE 51: REPARTITION DE LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE PAR ELEMENT CHAUFFANT POUR LWC = 0,3 G/M ³ A -15 °C.....	105
FIGURE 52: FONCTION DE REGRESSION EXPERIMENTALE DE L'EPAISSEUR DU FILM D'EAU EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE L'EPAISSEUR DE GLACE.	122
FIGURE 53: VARIATIONS DE LA DUREE DU DEGIVRAGE EN FONCTION DE LA QUANTITE DE CHAUFFAGE A -5 °C APRES DES EVENEMENTS GIVRANTS DE DUREES 30 MIN, 60 MIN ET 120 MIN A 0.3 G/M ³	124
FIGURE 54: VARIATIONS DE LA DUREE DU DEGIVRAGE EN FONCTION DE LA QUANTITE DE CHAUFFAGE A -15 °C APRES DES EVENEMENTS GIVRANTS DE DUREES 30 MIN, 60 MIN ET 120 MIN A 0.3 G/M ³	124
FIGURE 55: VARIATIONS DE LA DUREE DU DEGIVRAGE EN FONCTION DE LA QUANTITE DE CHAUFFAGE A -15 °C APRES DES EVENEMENTS GIVRANTS DE DUREES 30 MIN, 60 MIN ET 120 MIN A 0.3 G/M ³	125
FIGURE 56: FONCTION D'INTERPOLATION DE LA DUREE DE DEGIVRAGE EN FONCTION DE LA DUREE D'ACCRETION ET DE LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE A -5 °C.....	127

FIGURE 57: FONCTION D'INTERPOLATION DE LA DUREE DE DEGIVRAGE EN FONCTION DE LA DUREE D'ACCRETION ET DE LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE A -15 °C..... 127

FIGURE 58: HISTOGRAMME COMPARATIF DES PUISSANCES DE DEGIVRAGE PAR RAPPORT A LA PUISSANCE NECESSAIRE A L'ANTIGIVRAGE A -15 °C. 132

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AHP	Analytic Hierarchy Process
AMCH	Analyse MultiCritère Hiérarchique
CFD	Computational Fluid Dynamics
IEA	International Energy Agency
EDF-EN	Électricité De France — Énergies Nouvelles
ELECTRE	Elimination Et Choix Traduisant la Réalité
Elt	Élément
LAMSADE	Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision
LIMA	Laboratoire International des Matériaux Antigivre
LWC	Liquid Water Content
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MVD	Median Volume Diameter
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
PDMS	Polydiméthylsiloxane
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
S.O.	Sans Objet
SPCG	Système de protection contre le givre
TRL	Technology Readiness Level
TSR	Tip Speed Ratio

NOMENCLATURE

c	Corde du profil	m
C_f	Coefficient de friction	
$C_{p,a}$	Capacité calorifique de l'air	J/kgK
$C_{p,g}$	Capacité calorifique de la glace	J/kgK
$C_{p,w}$	Capacité calorifique de l'eau	J/kgK
E	Efficacité de collection	
$D_{accrétion}$	Durée de l'accrétion	s
$D_{degivrage}$	Durée du dégivrage	s
E_{film}	Épaisseur de glace fondue	m
E_{glace}	Épaisseur de glace initialement accumulée	m
h	Coefficient de convection	W/m ² K
k, k_a	Conductivité thermique de l'air	W/m ² K
k_g	Conductivité thermique de la glace	W/m ² K
L_{evap}	Chaleur latente d'évaporation	J/kg
L_{rug}	Épaisseur de rugosité	m
LWC	Teneur en eau liquide	g/m ³
\dot{m}_{imp}	Intensité de l'accumulation de glace	kg/m ² s
N_u	Nombre de Nusselt	
p_{∞}^0	Pression atmosphérique	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	
Q	Puissance d'énergie électrique	W
$q_{chauffage}$	Flux de chauffage	W/m ²
\dot{q}, \dot{q}_{anti}	Flux de chaleur pour l'antigivrage	W/m ²
\dot{q}_{aero}	Réchauffement aérodynamique	W/m ²
\dot{q}_{conv}	Perte de chaleur par convection	W/m ²
\dot{q}_{dry}	Flux de chaleur en mode sec	W/m ²
\dot{q}_{evap}	Perte de chaleur par évaporation	W/m ²
$\dot{q}_{imp}, \dot{q}_{sens}$	Chaleur sensible	W/m ²
\dot{q}_{kin}	Réchauffement cinétique	W/m ²
\dot{q}_l	Flux de chaleur en régime laminaire	W/m ²
\dot{q}_{moy}	Flux de chaleur moyenné	W/m ²
\dot{q}_t	Flux de chaleur en régime turbulent	W/m ²
\dot{q}_{wet}	Flux de chaleur en mode humide	W/m ²
r, R	Rayon de pale	m
R_e	Résistance électrique	Ω

r_c	Facteur de recouvrement	
Re	Nombre de Reynolds	
S	Aire	m^2
S_t	Nombre de Stanton	
T_∞	Température ambiante (température de l'écoulement)	K
T_s	Température de surface	K
TSR	Vitesse de vent spécifique	
u	Composante selon — de la vitesse de l'écoulement	m/s
U	Tension électrique	V
v	Composante selon — de la vitesse de l'écoulement	m/s
V	Vitesse de vent relative	m/s
V_∞	Vitesse du vent	m/s
V_g	Volume de la glace	m^3
ω	Vitesse de rotation	rpm
ρ, ρ_a	Densité de l'air	kg/m^3
ρ_g	Densité de la glace	kg/m^3
μ	Viscosité dynamique	
ν	Diffusivité thermique	m^2/s

DÉDICACE

Il me fait reposer dans de verts pâturages, Il me dirige près des eaux paisibles.

Il restaure mon âme, Il me conduit dans les sentiers de la justice, A cause de son nom.

***Quand je marche dans la vallée de l'ombre de la mort, Je ne crains aucun mal, car tu
es avec moi : Ta houlette et ton bâton me rassurent.***

*Tu dresses devant moi une table, En face de mes adversaires ; Tu oins d'huile ma tête, Et
ma coupe déborde.*

*Oui, le bonheur et la grâce m'accompagneront Tous les jours de ma vie, Et j'habiterai dans
la maison de l'Éternel Jusqu'à la fin de mes jours.*

[Cantique de David.] Psaumes 23

REMERCIEMENTS

En premier, je veux remercier Dieu car c'est lui qui me donne la force d'avancer. Il a honoré ma vie d'opportunités que je sais ne sont ni de ma main ni d'aucune autre main humaine. À lui soit la gloire et le pouvoir pour toujours. Amen.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux membres du jury :

- Le professeur Christophe Volat qui me fait l'honneur de présider ce jury.
- Les professeurs Zahira Ghalmi, Marcelo Reggio et Hassan Ezzaidi, qui ont eu la gentillesse d'accepter mon invitation à juger ce travail.
- Les professeurs Jean Perron et Adrian Ilinca, pour leur aide précieuse, et les encouragements qu'ils n'ont cessé de me prodiguer.

La présente étude n'aurait pas été possible sans le bienveillant soutien de certaines personnes et organismes qui ont cru à ce projet. Je ne pourrai tous les citer, mais je voudrais les prier d'accueillir ici tous mes sentiments de gratitude qui viennent du fond de mon cœur, en acceptant mes remerciements.

Mes premiers remerciements vont d'abord à mon directeur de thèse, le professeur Jean Perron, qui m'a accompagné tout au long de ma formation. Sa disponibilité et ses conseils au cours de certains de mes moments difficiles ont été d'une très grande qualité, et d'un immense réconfort. J'aimerais également remercier spécialement mes co-directeurs de thèse, le professeur Adrian Ilinca et le professeur Hussein Ibrahim, pour leurs remarques pertinentes, leurs conseils et leurs soutiens qui se sont manifestés de diverses manières au cours de ces 8 dernières années.

Je dois aussi des remerciements aux professeurs, départements et organismes qui m'ont offert du soutien financier sous forme d'aide financière, de bourses ou de prix. Par ordre alphabétique : Adrian Ilinca, FQRNT, LIMA (Jean Perron & Christophe Volat), Technocentre Éolien, et Université du Québec à Chicoutimi.

Mes remerciements vont également aux personnels du LIMA et du Technocentre Éolien qui ont toujours pris le temps de répondre à mes questions et m'ont permis de profiter de leur vaste expérience ; mentions spéciales à Adam Money Chehouri le meilleur colocataire que je n'ai jamais eu, Elizabeth Crook notre boussole au LIMA, Amr Hayyani et Éric Villeneuve mes partenaires (...),

les techniciens du LIMA que je qualifie affectueusement du cœur du LIMA pour qui rien n'a jamais été impossible à construire et Monsieur Jean Louis Laforte pour ses conseils et ses corrections.

Enfin et surtout, merci à ma famille. Vos attentions et encouragements m'ont accompagné tout au long de ces années. Vous n'avez jamais douté de moi et je vous en serai éternellement redevable.

INTRODUCTION

Le givrage atmosphérique affecte une grande variété de structures de parcs éoliens entraînant des pertes de production et réduisant la durée de vie des équipements. De nombreuses tentatives ont été effectuées pour mieux comprendre le phénomène et développer des techniques en vue d'en réduire les effets néfastes. Et en dépit de sa complexité, la modélisation numérique a connu des avancées significatives. Les recherches ont pour la plupart été menées dans le domaine de l'aéronautique et ne sont pas directement applicables au secteur éolien. Parmi les techniques développées, il existe l'utilisation d'un flux d'air chaud soufflé à l'intérieur des pales, de bandes chauffantes installées à la surface des pales, de micro-ondes, de rayons infrarouges, de revêtements glaciophobes/hydrophobes ... (Fakorede, et al., 2016).

Toutefois, la technique qui semble la plus prometteuse pour contrer le givrage dans les parcs éoliens est l'installation de bandes chauffantes sur les pales des éoliennes. Cette solution est encore en développement et n'est pas totalement maîtrisée. Et, en général pour un gestionnaire ou un promoteur de parc éolien, il n'est actuellement pas possible de répondre à des questions telles que :

- Quel est le coût énergétique pour la protection d'une éolienne contre les effets du givrage ?
- Serait-il rentable d'installer des bandes chauffantes sur les pales ?
- Quelle serait la stratégie optimale de mitigation du givrage en fonction des caractéristiques d'un site ?
- Quel serait le meilleur système de protection pour un site donné ?

Ce projet se réalise en collaboration avec les universités du Québec à Chicoutimi et à Rimouski, le technocentre éolien, partenaire avec le turbinier Senvion, afin de fournir aux exploitants de parcs éoliens des outils d'aide à la décision pour la mitigation du givrage des éoliennes. Il s'intéresse à tous les aspects cruciaux du givrage des éoliennes et son succès constituera une avancée aussi bien sur le plan de l'évolution de la connaissance que sur l'optimisation de la rentabilité des éoliennes en climat nordique.

1.1 MISE EN CONTEXTE

Les régions nordiques sont des endroits sujets à des événements givrants ou à des périodes pendant lesquelles les températures ambiantes sont inférieures aux limites de fonctionnement usuelles des éoliennes. Ceci peut avoir une grande incidence sur la mise en œuvre et la rentabilité d'un parc éolien (Cattin, 2012). Toutefois, un site peut être situé dans une région nordique sans être affecté par des événements givrants.

La terminologie suivante permet de caractériser un événement givant (Cattin, 2012) :

- Le givrage atmosphérique : la période pendant laquelle les conditions météorologiques sont réunies pour la formation de la glace. C'est la période de formation de la glace.
- Le givrage instrumental : la période pendant laquelle la glace demeure sur les pales ou a un impact sur la production.
- Le temps d'incubation : le délai entre le début du givrage météorologique et le début du givrage instrumental.
- Le temps de récupération : le délai entre la fin du givrage météorologique et la fin du givrage instrumental.

Les régions nordiques requièrent des turbines éoliennes adaptées aux conditions froides, exigeant plus de temps de maintenance, des lubrifiants spéciaux pouvant garder leur viscosité à de basses températures et des coûts de chauffage supplémentaires pour la protection contre le givrage.

1.2 EXPLOITATION D'ÉOLIENNE EN MILIEU NORDIQUE

Le givrage atmosphérique est un terme générique regroupant tous les types d'accrétion d'eau glacée. Le givrage se produit principalement en présence de gouttes et de gouttelettes d'eau liquide en surfusion à des températures sous le point de congélation. En frappant un obstacle, elles se transforment en glace. Un autre mode de formation plus rare implique le passage de la vapeur d'eau directement à l'état solide : c'est la sublimation.

Aujourd'hui, l'exploitation des éoliennes montre que le givrage affecte la production d'énergie éolienne en causant des pertes (Cattin, 2012). Plusieurs simulations (expérimentales et numériques) ont été effectuées afin de quantifier ces pertes de production en fonction de la charge de glace sur les pales (Homola, et al., 2012; Seifert & Richert, 1997). Même de faibles quantités de glace peuvent réduire cette production d'énergie. Les parties inférieures des pales, les plus proches du moyeu central, sont moins sensibles à la perte de production causée par le givrage.

Sur la base de ces expériences en soufflerie et des modèles numériques, les courbes de puissance des éoliennes modifiées par la présence de glace ont été développées (Cattin, 2012). Il existe également des courbes de puissance en trois dimensions spécifiques qui montrent la production d'énergie en fonction de la vitesse du vent et de la charge de glace (Cattin, 2012). Il existe aussi des comparaisons entre les pertes dues au givrage et la production d'énergie réelle (Cattin, 2012). Cependant, ces comparaisons font ressortir une assez grande imprécision quand vient le temps de quantifier la perte effective dans la production d'électricité (Dimitrova, et al., 2011).

Le principal problème pour la validation expérimentale réside dans le manque de données fiables, en particulier sur les charges de glace sur les pales et leur évolution au cours d'un événement de givrage. Dans la plupart des études, les mesures des contraintes exercées par la masse de la glace sur la pale sont prises à partir d'un seul point sur la nacelle de l'éolienne, ce qui n'est pas représentatif de toute la pale, ni pendant l'événement givrant (accumulation de glace), ni pendant le temps de récupération (fonte des glaces, la sublimation) (Cattin, 2012). Il existe peu d'informations et de modèles décrivant le processus de chute de la glace (Cattin, 2012). Un autre problème rencontré réside dans la difficulté d'accéder aux données de production des parcs éoliens en service pour des raisons de confidentialité.

Dû à l'absence de systèmes commerciaux éprouvés de dégivrage et d'antigivrage, il est difficile de quantifier leur effet sur la production d'énergie éolienne. Des études en Suisse,

effectuées avec le système à air chaud d'ENERCON montrent que lorsqu'il est actif pendant les périodes de givrage (Cattin, 2012), il permet dans la plupart des cas de redémarrer la production juste après l'événement givrant ; tandis que sans l'utilisation de ce système, la production ne peut reprendre que lorsqu'il n'y a plus de glace sur les pales et les instruments de mesure. Le chauffage des pales de l'éolienne durant son fonctionnement reste une situation relativement nouvelle qui demande une étude plus approfondie.

1.3 PROBLÉMATIQUE

1.3.1 LES ARRÊTS DE PRODUCTION

Sans dispositif antigivrage, les turbines éoliennes sont arrêtées afin de prévenir tout dommage mécanique. Ceci entraîne d'importantes pertes de production dans les parcs éoliens, d'autant plus que les effets d'un épisode givrant peuvent durer jusqu'à quatre fois plus longtemps que l'épisode lui-même (Dierer, et al., 2011).

La Figure 1 compare des durées du givrage météorologique (première ligne; couleur rouge), du givrage instrumental (deuxième ligne ; couleur bleu foncé), des arrêts de production lorsque les pales sont chauffées (troisième ligne ; couleur bleu ciel) et des arrêts de production lorsque les pales ne sont pas chauffées (quatrième ligne ; couleur mauve). Il en résulte une diminution des temps d'arrêt lorsque les pales sont chauffées.

Néanmoins, cette figure ne permet pas de comparer le gain de production par rapport à l'énergie utilisée pour protéger l'éolienne. Les modèles développés dans le cadre du présent projet permettront d'effectuer une telle comparaison.

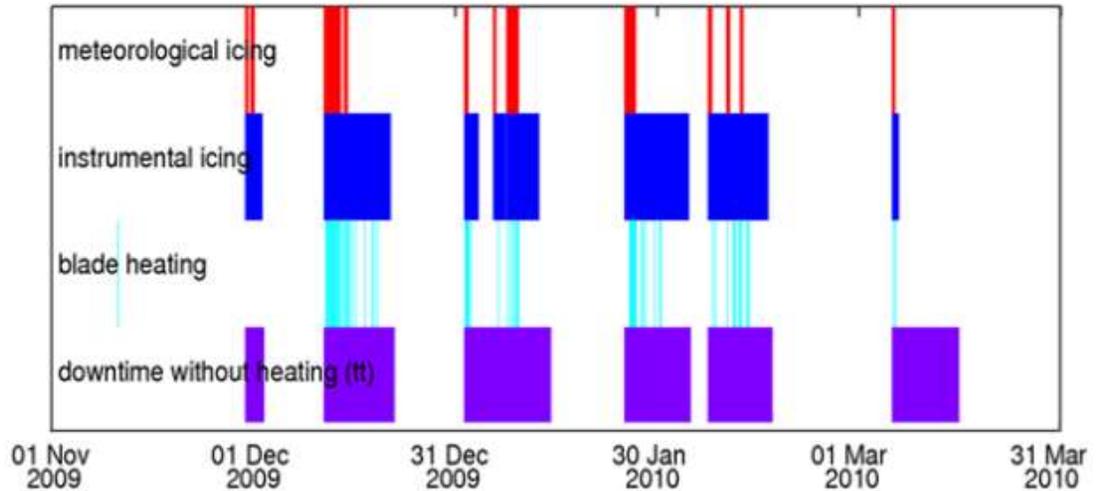


Figure 1: Durées des périodes de givrage météorologique et instrumental comparées à celles des arrêts lorsque les pales sont chauffées et non chauffées : mesures effectuées à Saint-Brais durant l'hiver 2009-2010. Source : (Dierer, et al., 2011).

1.3.2 LES PERTES AÉRODYNAMIQUES

La couche de glace en surface rend la pale plus rugueuse. L'impact de cette rugosité du profil de la pale de l'éolienne sur la production d'énergie est largement documenté dans la littérature. Le profil aérodynamique de la pale est ainsi modifié, causant de sévères pertes de performance (Sagol, et al., 2013) parce que l'écoulement autour de la pale se fait de manière plus turbulente. L'augmentation de la rugosité accroît également le coefficient de transfert de chaleur par convection ; ceci implique que plus la surface est rugueuse, plus il faut chauffer pour faire fondre la glace. La rugosité du profil est principalement influencée par le type de glace accumulée : le verglas a par exemple une surface plus lisse que le givre sec et la surface du verglas est par conséquent moins rugueuse que celle du givre sec.

1.3.3 LA RÉDUCTION DE LA DURÉE DE VIE

Lors des épisodes givrants, les pales glacées de turbines éoliennes deviennent déséquilibrées à cause de la charge de glace et des contraintes supplémentaires sur les autres composantes de la turbine (Frohboese & Anders, 2007). Même si ces dernières sont fabriquées en tenant compte d'un facteur de sécurité pour les rendre capables de supporter

des charges importantes, elles restent soumises à des charges en fatigue qui réduisent inévitablement leur durée de vie (Dalili, et al., 2009). Ces effets sont détaillés dans les travaux de Tammelin (Tammelin, et al., 1998) :

- Les masses de glace causent des charges plus élevées ;
- L'asymétrie des masses de glace cause un déséquilibre ;
- L'accumulation de glace augmente les vibrations ;
- Des phénomènes de résonance peuvent apparaître dus à la perturbation de la fréquence naturelle des pales, particulièrement dans le cas de petites turbines et de pales légères.

1.3.4 LES EFFETS SECONDAIRES

Les effets secondaires, mais non moins importants, sont :

- Les risques à la sécurité : lorsque les blocs de glace se détachent des pales en rotation, ils peuvent être projetés très loin en fonction de leur poids et de la vitesse de rotation des pales. Ils constituent un risque majeur pour la sécurité des personnes, des routes et des installations aux alentours (Cattin, 2012).
- Un pic de production électrique en raison d'un décrochage aérodynamique retardé de la pale couverte de glace (Tammelin, et al., 1998) : l'accrétion de glace peut retarder le décrochage aérodynamique, ce qui augmente la production d'énergie parce que la vitesse de rotation de l'éolienne excède sa vitesse maximale prévue. Cette surcharge peut endommager certains composants électriques (surcharge) et augmenter le stress sur les composants mécaniques (arbres, boîte à vitesse ...).

1.3.5 LA CLASSIFICATION DU GIVRAGE DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE

Ce paragraphe présente la classification du givrage pour les sites éoliens (Tableau 1) telle que proposée par l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA), qui donne une première indication sur la gravité de la glace et ses conséquences sur un site donné. C'est pour cette

raison que dans tout projet d'implantation de parc éolien, des analyses très détaillées des conditions de givrage spécifiques au site doivent être effectuées (IEA Wind, 2012).

Tableau 1: Classification IEA avec les recommandations correspondantes.

Classe IEA	Givrage météorologique	Givrage instrumental	Perte de production
	(% de l'année)	(% de l'année)	(% de production par an)
5	>10	>20	> 20
4	5 à 10	10 à 30	10 à 25
3	3 à 5	6 à 15	3 à 12
2	0,5 à 3	1 à 9	0,5 à 5
1	0 à 0,5	<1,5	0 à 0,5

La classification est divisée en cinq niveaux identifiant le pourcentage de l'année où il y a des épisodes de givrage météorologique et instrumental, ainsi que la perte de production annuelle qui y est associée. Le niveau 1 étant le niveau le plus faible et le niveau 5 étant celui le plus élevé.

Ce chapitre met en évidence les effets néfastes de la glace sur les turbines éoliennes. Il apparaît donc crucial pour certains sites de disposer d'un système de protection contre le givrage. Vu le peu de données disponibles, notre travail se propose de répondre à la question : comment peut-on déterminer s'il est rentable d'installer un système de protection contre le givrage ?

1.4 OBJECTIFS

1.4.1 GÉNÉRAUX

L'objectif principal de ce travail est de proposer un outil de quantification de la consommation énergétique d'un système de protection électrothermique contre le givrage opéré dans les deux modes de protection envisageables : l'antigivrage humide et le dégivrage. L'antigivrage humide consiste à chauffer les gouttelettes s'écrasant sur la pale suffisamment

pour éviter leur gel, tandis que le dégivrage consiste à chauffer la pale pour accélérer le délestage de la glace déjà déposée.

La connaissance de la consommation d'un système de protection électrothermique contre le givrage en fonction des conditions météorologiques particulières à un site donné permettra d'en évaluer les coûts d'exploitation et de les comparer aux gains de production projetés. Cette information permettra d'atteindre notre objectif secondaire, qui est de proposer aux exploitants de parcs une démarche analytique pour le choix de la technologie de dégivrage la mieux adaptée à leur site.

1.4.2 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

Nos objectifs spécifiques sont les suivants :

- Développer un modèle analytique de l'antigivrage ;
- Élaborer une expression reliant la durée de dégivrage en fonction du temps d'accrétion et de la puissance de chauffage ;
- Mesurer expérimentalement l'épaisseur de glace à fondre pour causer son détachement ;
- Établir une norme de caractérisation des systèmes de protection contre le givrage ;
- Élaborer une méthode de sélection d'un système de protection contre le givrage pour un site donné en se basant sur une analyse multicritère.

1.5 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie utilisée pour atteindre nos objectifs comporte trois grands volets. Le premier volet portera sur l'antigivrage et consistera à modéliser l'énergie nécessaire pour l'antigivrage sur une pale d'éolienne en s'inspirant des travaux de Kays et Crawford sur la plaque plane (Kays, et al., 2012). Ces auteurs ont développé une équation qui calcule l'énergie

nécessaire pour maintenir une plaque plane semi-finie à une température de surface donnée en présence d'un écoulement d'air sec. Cette expression sera modifiée en y introduisant les termes liés à la présence de l'eau de façon à définir une nouvelle formulation pour un fluide diphasique (eau et air). Les résultats de cet exercice de modélisation seront validés par comparaison aux mesures expérimentales obtenues grâce à un nouveau dispositif expérimental.

Le second volet portera sur le dégivrage et sera purement expérimental. Des précipitations givrantes seront projetées sur un profil représentatif d'une pale d'éolienne et les temps de dégivrage en fonction de la puissance de chauffage seront mesurés. Chaque précipitation sera caractérisée selon l'épaisseur de glace, la durée, la température ambiante et la teneur en eau liquide. Ces données expérimentales permettront d'établir une relation entre la durée du dégivrage à une température donnée et la puissance de chauffage requise.

Dans le dernier volet, il sera présenté la comparaison des systèmes de protection contre le givrage. Les deux premiers volets permettront d'estimer le coût d'exploitation d'un système de protection contre le givrage électrothermique ; cette information est cruciale dans le choix du système adéquat. Des critères de filtrage et des paramètres de comparaison seront définis pour caractériser les dispositifs de protection contre le givrage. Finalement, en utilisant la méthode d'analyse multicritère hiérarchique, une méthode d'aide à la décision pour le choix du système de protection le plus adapté pour un site donné sera proposée.

1.6 PLAN DE TRAVAIL

Pour répondre aux objectifs, la thèse a été divisée en huit chapitres. Le **Chapitre 1** présente la problématique du givrage dans les parcs éoliens et décrit de manière générale notre méthodologie. Le **Chapitre 2** présente l'état de l'art des techniques de protection contre le givre pour les parcs éoliens et les outils de modélisation numérique existants. Les infrastructures utilisées pour réaliser cette étude (soufflerie réfrigérée et montage expérimental) sont détaillées au **Chapitre 3**. Les bases étant ainsi définies, le **Chapitre 4**

aborde la première partie de notre projet, qui concerne l'étude de l'antigivrage. Dans ce chapitre, un modèle analytique est développé, validé expérimentalement et qui est utilisé pour évaluer la consommation énergétique de quelques éoliennes en mode antigivrage. La deuxième partie du projet portant sur l'étude du dégivrage est abordée au **Chapitre 5** ; dans ce chapitre figurent les résultats de tests expérimentaux qui permettront de déterminer une corrélation entre l'épaisseur de glace accumulée et l'épaisseur de glace à fondre pour faire chuter cette glace d'une part et, d'autre part, une corrélation entre la durée du dégivrage et la puissance de chauffage fournie pour le dégivrage. Tout comme au volet précédent, une extrapolation de quelques éoliennes est réalisée afin d'estimer la consommation en énergie du dégivrage dans un environnement réel de production. Le **Chapitre 6** présente un outil de sélection du système de protection contre le givre approprié pour un site donné ; cet outil est basé sur une définition de paramètres (pour caractériser les systèmes de protection contre le givre) jumelée à l'utilisation d'une méthode d'analyse multicritère. Finalement, les principales conclusions et recommandations sont énumérées aux **Chapitres 7 et 8**. Les fiches d'expériences en annexe viennent compléter les différents chapitres.

Dans tout ce document, le terme glace désignera de manière générique, sauf indication contraire, tout type d'accumulation (givre, verglas ou autres).

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART

2.1 TECHNIQUES DE PROTECTION CONTRE LE GIVRAGE

Ce chapitre a pour but de présenter les techniques actuelles de protection contre le givrage et leur degré de maturité. Il se décompose en deux grandes parties :

- Les techniques passives ;
- Les techniques actives.

2.1.1 TECHNIQUES PASSIVES

Les techniques passives sont utilisées pour prévenir l'accumulation de glace sans aucun apport additionnel d'énergie ; elles ne font intervenir que l'énergie naturelle. L'idée derrière ces techniques est de réduire les coûts opérationnels et de garder la surface de pale propre sans aucun contrôle et sans aucun système de protection. La majorité de ces techniques sont des techniques d'antigivrage qui peuvent être regroupées en deux catégories : la réduction de la force d'adhérence et les systèmes thermiques passifs. Ces deux catégories sont basées sur la modification des propriétés physicochimiques de la surface de la pale.

2.1.1.1 RÉDUCTION DE LA FORCE D'ADHÉRENCE

Il existe plusieurs moyens de réduire la force d'adhérence de la glace sur une surface solide. La plus courante consiste à recouvrir la surface à protéger par un matériau glaciophobe. Les revêtements couramment utilisés sont des matériaux à faible énergie superficielle.

Au lieu des revêtements glaciophobes, les revêtements hydrophobes peuvent également être utilisés pour empêcher l'eau de stagner sur la surface de la pale. Mais il a été prouvé que l'hydrophobicité est insuffisante pour empêcher l'accrétion de glace (Arianpour, et al., 2013).

Une autre méthode présentée par Farzaneh consiste à utiliser des revêtements comportant des zones hydrophiles qui sont entourées de zones hydrophobes. L'idée est de permettre l'accumulation d'eau uniquement sur les zones hydrophiles afin d'en contrôler facilement l'élimination (Farzaneh, 2008). Cette technique est à l'état de concept.

La plupart de ces techniques sont encore au stade expérimental, et même si certaines d'entre elles montrent des résultats prometteurs, très peu d'essais ont été réalisés sur le terrain. Les grands avantages des revêtements sont que toute la surface de la pale peut être traitée (aucun risque de givrage secondaire) et qu'ils ne nécessitent aucun contrôle. Certains de ces revêtements peuvent également être utilisés comme des instruments de mesure météorologique. Toutefois, les revêtements induisent une rugosité de surface dont il faut tenir dans l'estimation de leur performance.

2.1.1.2 SYSTÈMES THERMIQUES PASSIFS

Une méthode passive consiste à peindre le rotor en noir de façon à absorber l'énergie créée par le rayonnement solaire (Figure 2). Cette méthode montre une amélioration de la performance (Seifert & Richert, 1997) sur les sites où les épisodes de givrage sont peu fréquents et sont suivis de réchauffement à des températures supérieures à 0 °C, ou sont exposés à une intensité solaire élevée (Fakorede, et al., 2016). La peinture noire chauffe la pale pendant le jour et permet une fonte plus rapide de la glace. En été, l'utilisation de la peinture noire ne présente aucun risque de surchauffe et de détérioration des propriétés mécaniques de la pale (Weis & Maissan., 2003).



Figure 2: Pales d'éolienne peintes en noir givrées.

2.1.1.3 ARRÊTS PRÉVENTIFS

Il s'agit d'une technique en cours d'investigation par la compagnie Électricité De France — Énergies Nouvelles (EDF-EN). Elle consiste à arrêter la turbine éolienne dès le début de l'événement givrant. En effet, quand la turbine éolienne ne tourne pas, la masse de glace accumulée est faible et, par conséquent, la turbine peut être remise en fonctionnement plus rapidement après l'événement givrant. L'avantage de cette technique est qu'elle ne nécessite aucun investissement. Par contre, elle doit être améliorée car les essais actuels ont montré que les bénéfices sont négligeables (EDF-EN, 2014). L'aspect le plus important ici est la prédiction météorologique du givrage ; avec de meilleurs outils de prédiction, cette technique pourrait fournir de meilleurs résultats.

2.1.2 TECHNIQUES DE PROTECTION ACTIVES

2.1.2.1 MÉTHODES CHIMIQUES

Les revêtements peuvent être jumelés à des substances chimiques afin d'abaisser le point de congélation. Ces matériaux créent une hystérésis thermique entre le point de fusion et le point de congélation (Farzaneh, 2008).

Le gel des gouttelettes en surfusion peut par exemple être évité en utilisant un fluide, tel que l'éthylène glycol, ayant comme propriété d'abaisser le point de fusion de l'eau. Ces fluides sont couramment utilisés pour dégivrer et protéger les aéronefs au sol contre la glace avant leur décollage. Cette approche peut permettre d'éviter complètement la formation de glace sur la structure, ou tout simplement aider à maintenir un mince film d'eau ou de fluide antigel entre la structure et la glace pour faciliter l'élimination de celle-ci par l'effet naturel de la gravité ou du vent (Laflamme, et al., 2002).

Ces méthodes nécessitent des applications répétées, dépendent de la prévision météorologique et ne peuvent être utilisées de manière continue que sur de petites surfaces. De plus, les fluides utilisés sont généralement non biodégradables. Leur application est donc limitée.

2.1.2.2 MÉTHODES MÉCANIQUES

Les méthodes mécaniques réfèrent à toutes les approches mécaniques utilisées pour briser la glace et accélérer sa chute. Elles consistent à interrompre l'accumulation de glace directement par le raclage ou à l'aide de l'énergie libérée par des vibrations ou des mouvements de la structure. Ces méthodes sont principalement conçues pour le dégivrage. Le raclage manuel, l'utilisation de revêtements souples, la secousse contrôlée des pales et le dégivrage par air à haute vitesse ne sont pas considérés dans le présent document en raison de leur incompatibilité avec les grandes structures comme les turbines éoliennes.

a) Les techniques pneumatiques

Elles sont couramment utilisées dans le secteur de l'aéronautique pour le dégivrage du bord d'attaque des petits avions. Lorsque suffisamment de glace s'accumule sur le bord d'attaque, les chambres à air se gonflent et se dégonflent sous l'effet d'impulsions successives d'air comprimé. La déformation de la couche de glace a pour effet de la rompre et de l'éjecter (Figure 3). Cette technique est très simple et requiert peu d'énergie, mais modifie les propriétés aérodynamiques de la pale et est difficile à installer. En outre, elle nécessite beaucoup d'entretien (Mayer, et al., 2007).

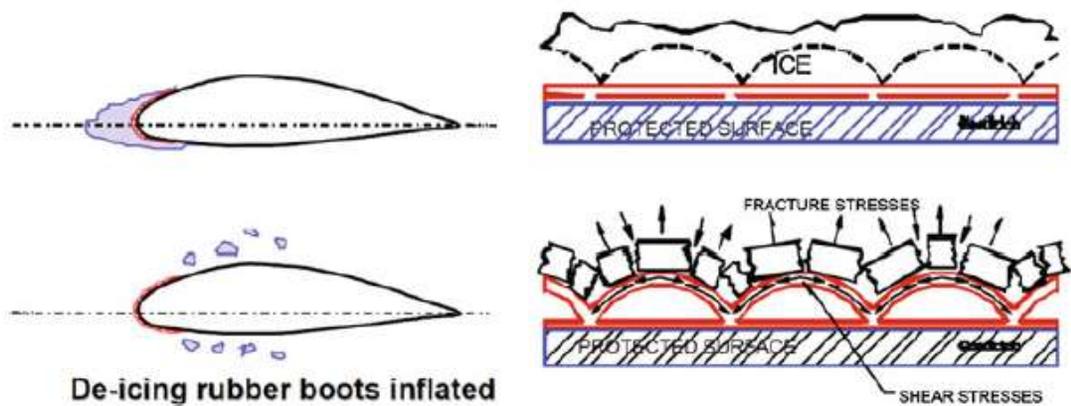


Figure 3: Principe de fonctionnement du dégivrage pneumatique (Botura & Fisher, 2003)

b) Les techniques explosives

Ces techniques consistent à utiliser des impulsions électromagnétiques ou piézoélectriques pour briser et éjecter la glace (Mayer, et al., 2007). Dans le cas du dégivrage par électro-expulsion, une bobine en spirale appelée actuateur est placée à proximité de la face interne d'une plaque métallique (Figure 4). Lorsqu'un courant est appliqué à la bobine, un champ magnétique est créé, lequel déforme le métal. Il en résulte un déplacement rapide du profil de surface et l'expulsion de la glace accumulée. Dans le cas du dégivrage piézoélectrique expulsif, une tension est passée à travers un élément piézoélectrique ; ce qui crée un déplacement de surface et permet l'élimination de la glace. Ce système est économe en énergie et peut être facilement automatisé.

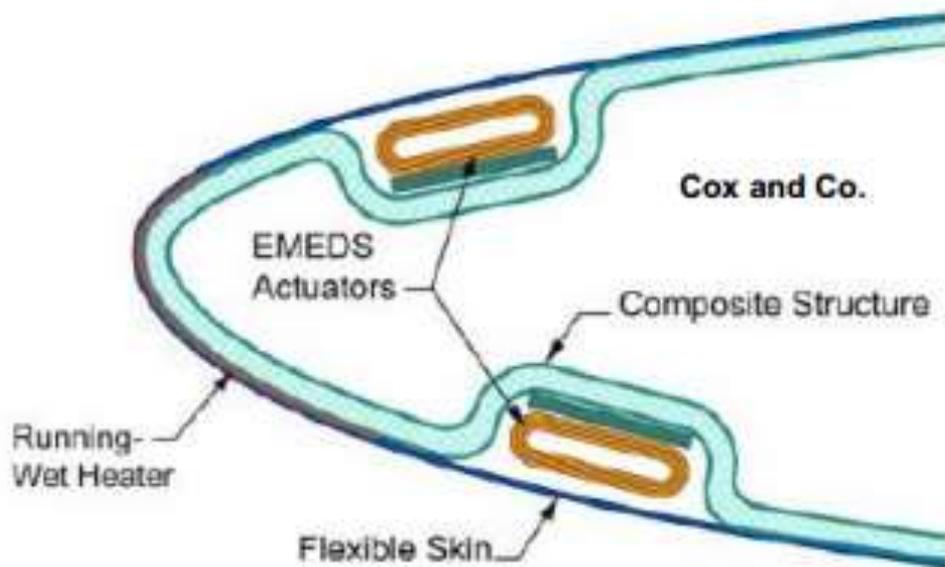


Figure 4: Dégivrage expulsif. Source : 8th Polar Technology Conference (Ryerson, 2012)

c) Dégivrage ultrasonique

Le principe de cette technique est de briser les liens d'adhérence entre deux surfaces en utilisant des ultrasons pour créer une contrainte à la jonction des surfaces. Les avantages de cette technique sont son faible coût (faible énergie nécessaire) et un dégivrage instantané (Goraj, 2004; Palacios, et al., 2009).

Cette technique a prouvé son efficacité dans le dégivrage des pales d'hélicoptère. C'est un concept très prometteur pour les pales d'éoliennes, mais il n'a pas encore été adapté pour cet usage et le risque de délaminage qu'il présente doit être pris en considération. La société Delce-UT, basée au Royaume-Uni, développe actuellement des dispositifs de dégivrage basés sur cette technologie (Figure 5) dont la commercialisation est prévue dès 2020 (Delce-UT, 2014).

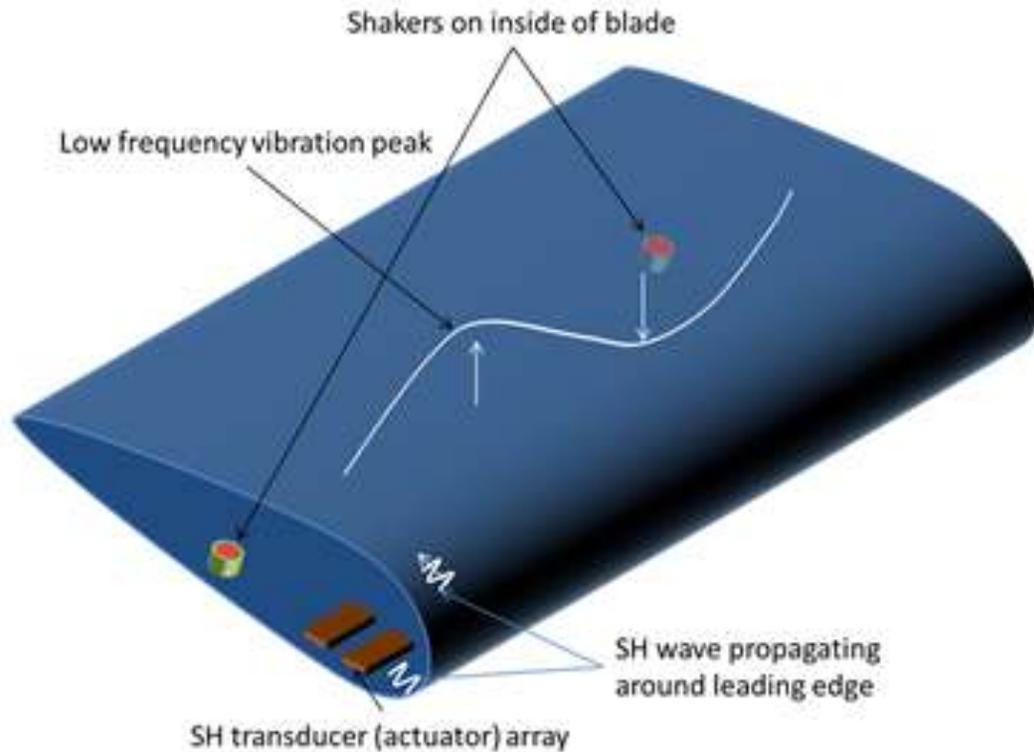


Figure 5: Principe du dégivrage ultrasonique (Delce-UT, 2014).

2.1.2.3 MÉTHODES THERMIQUES

Un moyen éprouvé pour empêcher la glace de s'accumuler est de maintenir la surface à protéger à une température supérieure au point de congélation. Ce procédé nécessite une source externe d'énergie, mais il comporte le risque que les éléments chauffants électriques (métal ou fibre de carbone) attirent la foudre (Dalili, et al., 2009).

a) Résistances chauffantes

Il existe trois configurations possibles pour la protection à l'aide de résistances chauffantes :

- À l'extérieur de la pale (Figure 6a) : les dispositifs de chauffage sont collés à la surface extérieure de la pale. Les performances de cette configuration sont intrinsèquement liées à la résistance mécanique et aux propriétés thermiques de la colle. Les essais montrent que ces propriétés peuvent être modifiées par la température, ce qui pourrait entraîner un détachement des dispositifs de chauffage et donc des coûts additionnels.

- À l'intérieur de la pale — à l'intérieur de la résine (Figure 6b) : cette configuration ne peut pas être adaptée à une pale de turbine éolienne existante. Aucune étude n'a été réalisée sur cette configuration, mais la grande incertitude est l'effet de la chaleur sur la résine elle-même. Toutefois, avec l'émergence de matériaux composites, c'est une avenue de recherche intéressante. Cette technologie a été utilisée dans le Boeing 787 Dreamliner.

- À l'intérieur de la pale — à l'extérieur de la résine (Figure 6c) : cette configuration est semblable à la précédente, mais l'idée est de trouver une méthode plus efficace que le système à air chaud. La conduite d'air chaud sur une longue distance occasionne de nombreuses pertes, donc le système d'air chaud d'Enercon présentera un long temps de latence. Par contre, un courant électrique pourrait être utilisé pour le transport de la chaleur, au lieu d'utiliser de l'air. Ceci peut être réalisé en plaçant des éléments chauffants résistifs dans le conduit d'air. C'est aussi un sujet intéressant pour de futures recherches.

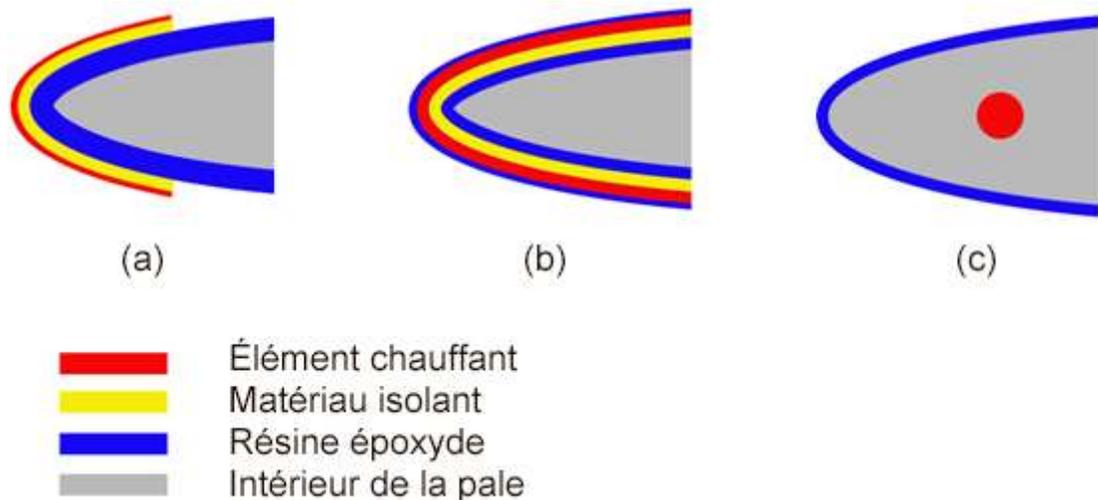


Figure 6: Différentes configurations de résistance thermique.

b) L'injection d'air chaud

De nombreuses tentatives ont été faites pour surmonter les problèmes et les dangers du givrage sur les avions. L'une des techniques d'antigivrage les plus communes est le soufflement d'air chaud dans la paroi adjacente à la zone de givrage. Le principe consiste à utiliser un flux d'air chaud pour chauffer le bord d'attaque des ailes de l'avion.

Cette technique a été adaptée aux éoliennes par Enercon depuis 2009, et plus récemment par Senvion et Vestas. La technologie de Vestas sert uniquement au dégivrage, tandis que celles de Enercon et Senvion peuvent être utilisées aussi bien pour le dégivrage que pour l'antigivrage. Il existe deux différences principales entre son application sur les éoliennes et sur les avions :

- Dans un avion, l'air chaud est extrait directement du moteur propulseur et n'a donc pas besoin d'être chauffé.
- Dans les éoliennes, le moteur électrique est situé au pied de pale et l'air chaud doit être transporté sur une longue distance avant d'atteindre le bout de pale (Figure 7), contrairement aux avions où le moteur est situé au milieu de l'aile.

Le système a été testé au site de Saint-Brais, en Suisse, et a donné de bons résultats (Cattin, 2012). Il semble que le système d'injection par air chaud consomme plus d'énergie et nécessite plus de temps pour être efficace lorsque les conditions météorologiques se dégradent ou que la taille de la pale est plus grande. Pour une turbine ENERCON E-82, la consommation d'énergie du système de chauffage est d'environ 85 kW. Pour une vitesse nominale du vent, les turbines produisent encore environ 96 % de l'énergie en mode de chauffage (Cattin, 2012). La perte de production annuelle est d'environ 3,5 % avec le chauffage et de 10 % sans le chauffage des pales (Cattin, 2012). La perte de production due aux arrêts des turbines était de 3 % de la production annuelle et l'énergie de chauffage représentait 0,5 % de la production annuelle (Cattin, 2012).

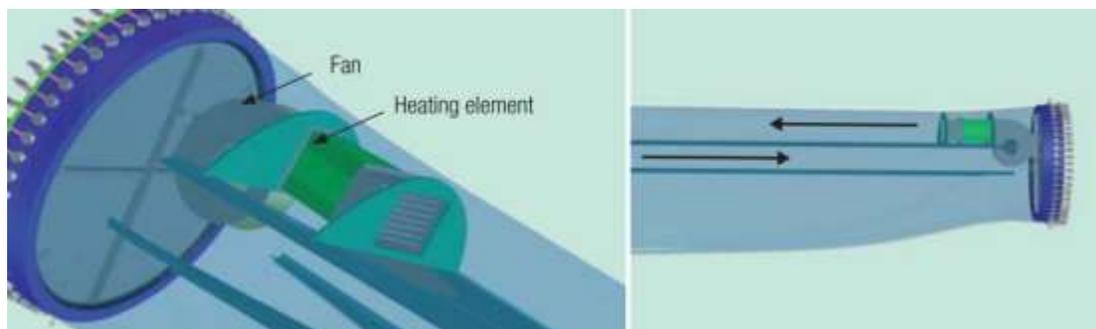


Figure 7: Principe de fonctionnement du système ENERCON (Enercon, 2011).

Certains modèles numériques démontrent que l'efficacité de cette technique (notamment en mode antigivrage) décroît avec l'augmentation de la sévérité du givrage et la taille des éoliennes (Battisti, 2015). Ceci s'explique également par le fait que faire circuler l'air chaud sur une longue distance (rayon de la pale) entraîne plus de pertes d'énergie. La température maximale acceptable à l'intérieur de la pale étant d'environ 72 °C, il n'est donc pas possible de chauffer l'air suffisamment pour garantir une protection efficace, au risque d'endommager l'intégrité de la pale. De plus, le système d'air chaud ne peut être installé sur des pales d'éoliennes existantes (retrofit). C'est la principale raison pour laquelle plus de recherches ont été faites sur la protection des éoliennes contre la glace à l'aide de résistances chauffantes.

c) Chauffage par micro-ondes

Le système de prévention de l'accumulation de glace par micro-ondes a été proposé par Hansman en 1982 (Hansman & Turnock, 1988). Il a breveté un système qui permet de chauffer les gouttelettes d'eau en surfusion en leur transmettant de l'énergie électromagnétique par micro-ondes. La fréquence des micro-ondes est choisie de manière à être absorbée principalement par l'eau liquide.

Ce système permet une distribution uniforme de la chaleur, consomme moins d'énergie que les résistances chauffantes et le système à air chaud, est facile d'entretien et ne comporte aucun risque lié à la foudre (Mayer, et al., 2007). Les seules préoccupations de cette technique sont les questions de sécurité, car toute être vivant aux alentours de l'éolienne est exposé aux micro-ondes lorsque le système est en fonctionnement. Ces micro-ondes, selon leur fréquence et la durée d'exposition, peuvent représenter un danger pour la santé. Une tentative d'adaptation de ce concept aux éoliennes a été réalisée par la société LM Glasfiber.

d) Chauffage par infrarouge

Il s'agit d'une technologie utilisée pour fournir de l'énergie à un objet loin de la source d'alimentation (Ryerson, 2011). Le principal avantage de cette technologie est que l'énergie

est transférée d'un émetteur à travers l'atmosphère. Il ne nécessite aucune installation sur les pales et donc ne cause pas de rugosité supplémentaire sur les pales. Il peut être utilisé pour le dégivrage ou l'antigivrage. La glace fond en absorbant les radiations, puis se détache.

La glace a un fort taux d'absorption du rayonnement infrarouge, mais les matériaux aussi, qui doivent être choisis avec soin afin de ne pas absorber la même gamme de rayonnements et ainsi éviter leur surchauffe et tout risque d'incendie. Ceci est difficile à réaliser. Par exemple, pour une longueur d'onde donnée, l'aluminium poli absorbe 10 % des radiations, tandis que les huiles en absorbent 90 %. Les lubrifiants, les huiles et de nombreux autres composants de la nacelle peuvent aussi rapidement surchauffer (Ryerson, 2012).

Cette technologie nécessite la prise de précautions de sécurité particulières.

2.1.2.4 CONTRÔLE D'ANGLE D'ATTAQUE

Une importante perte de production est occasionnée par le décrochage aérodynamique même après de courts événements givrants (Figure 8). Ceci est dû au fait que les dépôts de glace altèrent le profil de la pale, entraînant un décrochage aérodynamique prématuré. Cet impact est moindre lorsqu'il est possible de contrôler l'angle d'attaque des pales (IEA Wind, 2012).

Cette technique n'est pas une technique de protection contre le givrage au sens littéral, mais elle permet, dans certaines conditions, d'éviter les pertes de productions dues au givrage. La production d'énergie peut ainsi être maximisée, mais requiert une bonne connaissance de la variation du profil de la pale en fonction de la quantité de glace qui s'y accumule.

Cette méthode ignore les contraintes additionnelles dues à la présence de glace sur les structures et possède une plage d'efficacité limitée par les conditions météorologiques. De plus, son contrôle est laborieux, mais elle pourrait être optimisée en la combinant avec d'autres techniques de protection contre le givrage.

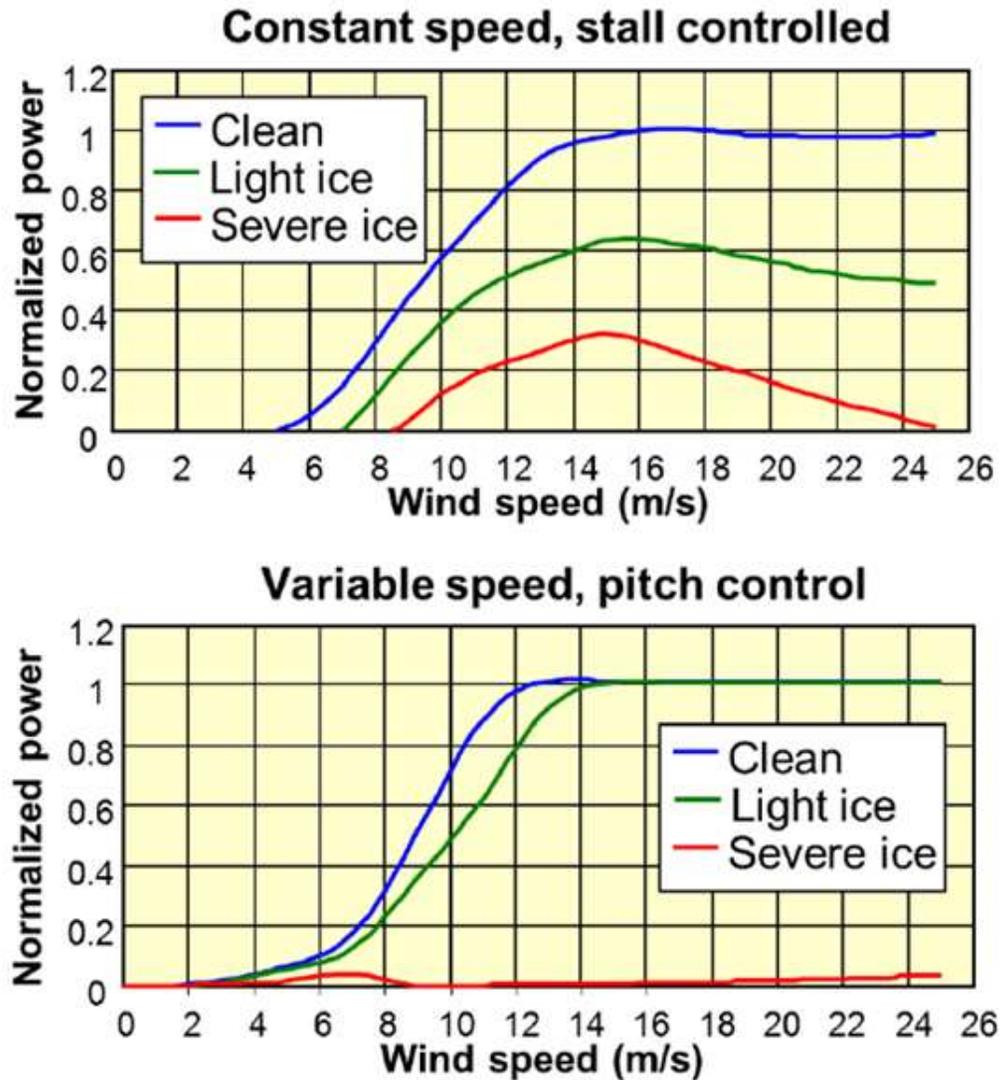


Figure 8: Impact du givrage sur les courbes de puissance des éoliennes à angle d'attaque non régulé (à gauche) comparé aux éoliennes à angle d'attaque régulé (à droite) sous différentes conditions de givrage. Source : VTT Finland (IEA Wind, 2012).

2.1.3 COMBINAISON DE TECHNIQUES

La synergie acquise à partir de la combinaison de différentes techniques peut se solder par une amélioration de la performance. C'est un champ d'étude intéressant qui a été largement ignoré jusqu'à présent.

Maissan a combiné des revêtements glaciophobes avec des peintures noires (Maissan 2002). Jusqu'à maintenant, les revêtements glaciophobes se sont révélés inefficaces comme protection des pales d'éoliennes contre le givrage. Cependant, la présence de peinture noire a positivement amélioré leur performance dans certains sites où les événements de givrage sont peu fréquents et sont suivis de températures au-dessus de 0 °C ou des sites ayant une intensité solaire élevée (Laakso, et al., 2003).

Plus récemment, des revêtements hydrophobes ont été combinés avec un système de chauffage électrothermique (Adomou, 2011). En mode antigivrage, les revêtements hydrophobes ont réduit de 7 % la consommation d'énergie tandis que les revêtements super-hydrophobes l'ont réduite de moitié (Anderson & Reich, 1997; Adomou, 2011). En mode dégivrage, la consommation d'énergie a été réduite de 15 % par la combinaison de résistances chauffantes et de revêtements super-hydrophobes (Adomou, 2011).

Antonini (Antonini, et al., 2011) a également démontré que la combinaison de revêtements super-hydrophobes avec une stratégie de dégivrage peut réduire de manière significative la puissance de chauffage nécessaire. Cette réduction serait due au fait que les dépôts de glace sur les surfaces hydrophobes ont une densité inférieure à la densité usuelle de la glace ; ce qui en facilite la rupture et la fonte (Antonini, et al., 2011).

Plus récemment, Enercon a présenté une nouvelle version de son système de dégivrage (Figure 9) qui combine l'injection d'air chaud et des revêtements thermiques placés à l'intérieur de la pale, comme le montre la figure ci-dessous.

Cette nouvelle architecture ne requiert pas la modification du profil de la pale, est peu coûteuse, facile à maintenir, très efficace et ne nécessite pas l'arrêt des éoliennes ; elle offre aussi l'avantage d'être à l'épreuve de la foudre (Jonsson & Site Assessment, 2012).

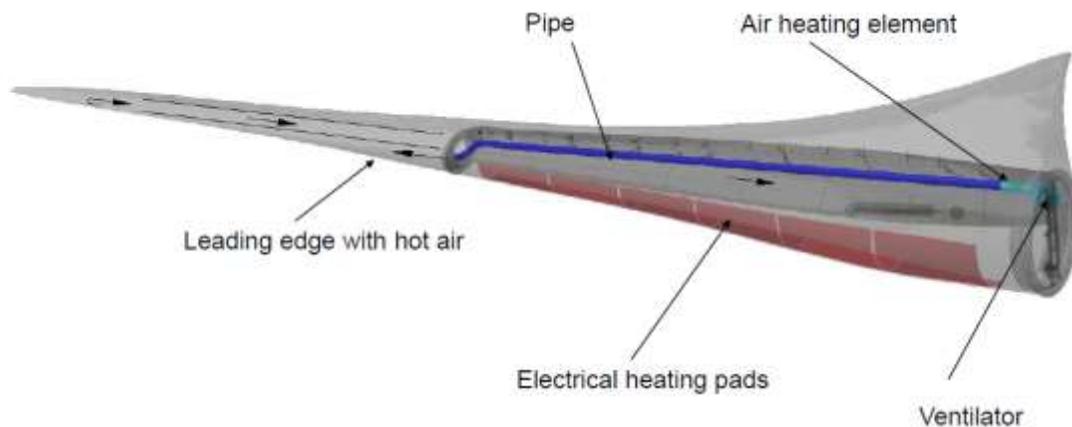


Figure 9: Représentation de la nouvelle version du dispositif de dégivrage d'Enercon. Source : (Jonsson & Site Assessment, 2012).

2.1.4 COMPARAISONS

2.1.4.1 ANALYSE DE MARCHÉ

Une analyse de marché a été réalisée afin de classer les fabricants de dispositifs de protection contre le givrage et le résultat est résumé dans le tableau ci-dessous (Fakorede, et al., 2016). Trois niveaux de maturité ont été définis :

- Commercial : le dispositif est disponible sur le marché (TRL égale à 9) ;
- Prototype : le dispositif est actuellement à l'essai sur un site, mais les systèmes ne sont pas encore disponibles sur le marché (TRL variant entre 7 et 8) ;
- En cours de développement : le dispositif est actuellement étudié en laboratoire (TRL variant entre 4 et 6).

Tableau 2: Analyse de marché.

Technique			Manufacturier			
Nom	Mode	Type de protection	Catégorie	Nom	Pays	Statut
Résistances chauffantes à l'extérieur de la pale	Actif	Dégivrage	Turbinier	Leitwind	Allemagne	Commercial
				LM-Wind Power ¹	Danemark	Prototype
			Spécialiste	Green Wind Global	Canada	Prototype
				KAT	Finlande	Arrêté en 2001
			Non-spécialiste	Kelly aerospace	É.-U.	Prototype
				Antolin	Espagne	Prototype
Résistances chauffantes à l'intérieur de la pale	Actif	Dégivrage/Antigivrage	Turbinier	Siemens	Suède	Commercial
				Nordex	Allemagne	Commercial
Injection d'air chaud	Actif	Dégivrage/Antigivrage	Turbinier	Enercon	Allemagne	Commercial
				Vestas	Danemark	Commercial
				Senvion ²	Allemagne	Prototype
Micro-ondes	Actif	Dégivrage	Turbinier	LM-Wind Power ¹	Danemark	En cours de développement
Pneumatique	Actif	Dégivrage	Non-spécialiste	UTC Aerospace System ³	É.-U.	En cours de développement
Électro-expulsif	Actif	Dégivrage	Non-spécialiste	UTC Aerospace System ³	É.-U.	En cours de développement
Ultrasonique	Actif	Dégivrage	Spécialiste	DeICE-UT	R.-U.	Prototype
Revêtements thermiques passifs	Passif	Antigivrage	Spécialiste	Polytech Services Company	É.-U.	Commercial
Arrêts préventifs	Passif	Antigivrage	Opérateur/Développeur	EDF-EN	France	Prototype

¹ Anciennement LM-Glasfiber² Anciennement REpower³ Anciennement Goodrich

2.1.4.2 COMPARAISONS DES TECHNIQUES DE PROTECTION CONTRE LE GIVRAGE

Un ensemble de techniques de protection contre le givrage sont comparés selon les critères suivants :

- La consommation d'énergie ;
- Le coût : opération et maintenance ;
- La rugosité de surface induite ;
- L'efficacité ;
- L'état de développement ;
- Le degré de difficulté du contrôle ;
- La nécessité de protection contre la foudre ;
- La capacité de mise à niveau ;
- Et le type de protection (dégivrage ou antigivrage).

Le bilan de cette comparaison est récapitulé dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3: Comparaison des techniques de protection contre le givrage.

Techniques	Type de protection	Mise à niveau	Nécessité de parafoudre	Difficulté du contrôle	Statut	Efficacité	Rugosité induite	Coût	Consommation énergétique
Revêtement hydrophobique	Antigivrage	Oui	Non	S.O.	Prototype	Limitée	Moyenne	Faible	S.O.
Revêtement glaciophobe	Antigivrage	Oui	Non	S.O.	Prototype	Limitée	Moyenne	Faible	S.O.
Revêtement visqueux (non soluble à l'eau)	Antigivrage	Oui	Non	S.O.	Prototype	Momentanée et diminuante	Moyenne	Faible	S.O.
Chimique	Antigivrage	Oui	Non	S.O.	En cours d'investigation	Momentanée et diminuante	Moyenne	Faible	Moyen
Peinture noire	Antigivrage	Oui	Non	S.O.	Prototype	Très limitée	Très faible	Très faible	S.O.
Pneumatique	Dégivrage	Non	Non	Moyenne	Opérationnel ⁽¹⁾	Très efficace	Très élevée	Élevé	Très faible
Expulsif	Dégivrage	Non	Non	Moyenne	Opérationnel ⁽¹⁾	Efficace	Élevée	Élevé	Très faible
Air chaud	Les deux	Non	Non	Élevée	Opérationnel	Efficace	S.O.	Très élevé	Moyenne — Élevée
Résistances chauffantes à l'extérieur	Les deux	Oui	Oui	Moyenne	Opérationnel	Efficace	Moyenne	Très élevé ⁽³⁾	Faible — Moyenne
Résistances chauffantes à l'intérieur de la résine	Les deux	Non	Oui	Moyenne	En cours d'investigation	Très efficace	S.O.	Élevé	Faible — Moyenne

Résistances chauffantes à l'intérieur de la pale (hors de la résine)	Les deux	Non	Oui	Moyenne	En cours d'investigation	Efficace	S.O.	Moyen	Faible — Moyenne
Micro-ondes	Dégivrage	Oui	Oui	Très élevée	En cours d'investigation	(2)	S.O.	Moyen	Faible
Infrarouge	Dégivrage	Oui	Oui	Très élevée	En cours d'investigation	-	S.O.	Moyen	-
Ultrason	Dégivrage	Oui	Non	Faible	En cours d'investigation	Très efficace	Très faible	Moyen	Faible
Contrôle d'angle d'attaque actif	Aucun	Oui	Non	Élevée	En cours d'investigation	Efficace	S.O.	S.O.	Faible
Arrêt préventif	Antigivrage	Oui	Non	Élevée	Prototype	Limitée	S.O.	S.O.	S.O.

(1) *En aéronautique.*

(2) *Problèmes relatifs aux micro-ondes à haute intensité.*

(3) *Faible durée de vie parce qu'elles se détachent après quelques utilisations.*

2.1.5 CONCLUSION

Il n'existe aucun produit de protection contre le givrage dans l'industrie éolienne qui soit éprouvé et commercialisé à l'échelle industrielle. Des investigations plus poussées seront nécessaires pour accroître la fiabilité de conception et la sécurité des systèmes d'antigivrage/de dégivrage.

Les revêtements glaciophobes/hydrophobes sont abordables, faciles à maintenir et n'ont pas besoin de protection contre la foudre (excepté pour certains matériaux glaciophobes). Toutefois, ils ne peuvent pas empêcher la formation de givrage à eux seuls. Ils doivent être combinés à des systèmes de chauffage.

Les produits chimiques sont également abordables, mais leur action est limitée dans le temps. Par conséquent, ils ont besoin de beaucoup d'entretien. En outre, la plupart des produits chimiques existants ne sont pas biodégradables.

Les méthodes thermiques sont actuellement recommandées et utilisées par de nombreuses entreprises. Ceci est principalement dû au fait que les méthodes thermiques, et en particulier les méthodes de type Joule, permettent de dégivrer de grandes sections et sont plus facile à mettre en œuvre. L'utilisation des résistances chauffantes semble être la technique la plus prometteuse parce qu'elle permet le retrofit, son installation est facile, le dispositif est efficace et également facile à contrôler.

Les résistances chauffantes sont souvent placées sur le bord d'attaque et parfois également sur le bord de fuite. Cet agencement est efficace en général, mais ne permet pas de prévenir complètement le givrage secondaire. Leur durée de vie est souvent réduite par le fait que les résistances chauffantes se détachent prématurément dans des conditions de givrage sévère. De plus, le mode antigivrage consomme beaucoup plus d'énergie que le mode dégivrage et, selon les conditions météorologiques, il pourrait donc être plus profitable d'opérer en mode dégivrage au lieu du mode antigivrage. Pour un résultat optimal, il faudrait associer

la technologie des résistances chauffantes à d'autres techniques, telles que la variation active de l'angle d'attaque, la peinture noire ou le positionnement des pales face au soleil, entre autres.

Un chauffage mal contrôlé peut affecter par inadvertance l'aérodynamique de la pale et augmenter le dépôt de glace, mais aussi déclencher des événements givrants qui ne sont pas censés se produire (Rindeskär, 2010). De plus, la chute de blocs de glace constitue un risque pour les installations et les êtres vivants aux alentours.

Si la protection contre le givrage sur une pale est défectueuse, cela pourrait sérieusement déséquilibrer l'éolienne et endommager ses composants. Des protocoles de sécurité supplémentaires doivent être ajoutés aux algorithmes de contrôle, principalement dans les régions soumises à d'intenses événements givrants.

2.2 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

2.2.1 LOGICIELS COMMERCIAUX

2.2.1.1 LEWICE

Le logiciel LEWICE contient un modèle analytique d'accrétion de la glace qui évalue la thermodynamique du processus de congélation qui se produit lorsque des gouttelettes en surfusion frappent un corps. Il tient compte des paramètres météorologiques, de température, de pression, de vitesse du vent, de teneur en eau liquide (LWC), de diamètre des gouttelettes et d'humidité relative pour déterminer la forme de l'accumulation de glace. Le logiciel se compose de quatre modules principaux :

- Le calcul du champ d'écoulement ;
- Le calcul de la trajectoire de la particule et de son impact ;
- Le calcul de la thermodynamique et de la croissance de la glace ;
- Et la modification de la géométrie par l'ajout de la glace.

Le module thermique de LEWICE peut modéliser n'importe quel nombre de dispositifs de chauffage, de longueurs quelconques et dans n'importe quel intervalle de temps souhaité. Les éléments de chauffage peuvent être démarrés ensemble, ou de manière périodique, et indépendamment les uns des autres. L'intensité de chauffage peut également être modifiée. En outre, l'utilisateur peut spécifier n'importe quel nombre de couches de matériaux et leurs épaisseurs. Il fournit également la quantité de chaleur et le temps nécessaire pour le dégivrage.

LEWICE comporte plusieurs améliorations par rapport aux versions précédentes en ce qui concerne le dégivrage et l'antigivrage. Ces améliorations comprennent des dispositifs de chauffage à température contrôlée, des dispositifs de givrage de type piccolo (injection d'air chaud), des dispositifs de chauffage à résistance variable, une stabilité accrue, ainsi que l'amélioration de la séparation de la glace et du givrage secondaire.

2.2.1.2 FENSAP-ICE

FENSAP-ICE est un logiciel de simulation du givrage en vol, développé par Newmerical Technologies International. Il a une architecture modulaire et se constitue des quatre modules suivants :

- FENSAP : utilisé pour le calcul de l'écoulement d'air et de la dégradation des performances due à la présence de la glace, en utilisant les équations de Navier-Stokes pour un fluide compressible (Habashi, 2009);
- DROP3D est un module qui permet de calculer la trajectoire des gouttelettes selon une méthode Eulérienne (Habashi, 2009);
- ICE3D permet de prédire la forme tridimensionnelle de la glace accumulée (Habashi, 2009). Il intègre la prise en compte des phénomènes de ruissellement ;
- CHT3D permet de calculer les transferts de chaleur en couplant les transferts de chaleur par convection avec les transferts de chaleur par conduction (Habashi, 2009). Il a la capacité de simuler l'antigivrage par air chaud (Pellissier, et al., 2011).

Chacun des modules résout ses équations de manière indépendante en utilisant lorsque requis des variables provenant des autres modules. L'intérêt de la modularité est de pouvoir remplacer l'un ou plusieurs des quatre modules classiques par des modules personnalisés. Par exemple, le module FENSAP peut être remplacé par ANSYS CFX (Hannat, 2009).

FENSAP-ICE a également été récemment utilisé pour simuler l'accrétion de glace et les pertes de performances sur une turbine éolienne (Switchenko, et al., 2014).

2.2.1.3 ANSYS CFD

ANSYS CFD n'est pas un logiciel dédié à la simulation de l'accrétion de glace, mais c'est le logiciel le plus rencontré dans notre revue de littérature pour la dynamique des fluides computationnelle. Il a été largement employé dans la recherche universitaire et largement validé. Le coffret ANSYS CFD comprend ANSYS Fluent et ANSYS CFX, qui peuvent être acquis séparément, et d'autres produits spécialisés supplémentaires.

ANSYS CFX est un outil numérique pour un usage général de la dynamique des fluides et a déjà été utilisé pour modéliser l'accumulation de glace (Martini et al, 2011) et la modélisation de l'antigivrage/dégivrage (Hannat, 2009). Il donne accès également à plusieurs modèles physiques qui peuvent convenir à de nombreuses applications.

ANSYS Fluent est le logiciel le plus connu pour la modélisation de l'écoulement, de la turbulence, du transfert de chaleur, et des réactions chimiques. Il est fiable pour une large gamme d'applications et est personnalisable. Il a été utilisé pour étudier l'accumulation de glace sur les pales (Sagol, et al., 2013; Villalpando, et al., 2012) ainsi que la simulation de l'antigivrage/dégivrage (Bu, et al., 2013; Velasco, et al., 2014; Balakrishna & Ketha, 2014).

Il existe de nombreux autres logiciels d'accrétion de glace, tels que ONERA, TRAJICE, CANICE, CIRA-LIMA, mais notre revue de littérature n'a pu identifier aucune utilisation récente

de ces logiciels. Ces logiciels semblent donc à priori moins avancés que LEWICE et FENSAP-ICE.

2.2.2 LOGICIELS GRATUITS

OpenFOAM est le seul logiciel libre de CFD qui a été référencé dans notre revue de la littérature pour les simulations de givrage. Il propose une large gamme de fonctionnalités pour résoudre divers problèmes, dont des flux complexes de fluides impliquant des réactions chimiques, de la turbulence et du transfert de chaleur. Il touche également à la dynamique des solides et à l'électromagnétisme. Il comprend des outils pour le maillage, notamment snappyHexMesh, un mailleur parallélisé pour géométries de conception assistée par ordinateur (CAO) complexes, et pour pré et post-traitement. Le maillage, le prétraitement et le post-traitement se déroulent presque tous en parallèle, permettant aux utilisateurs de tirer pleinement parti du matériel informatique à leur disposition. En étant libre, OpenFOAM offre une totale liberté de personnalisation et d'extension ses fonctionnalités existantes, soit par elles-mêmes ou grâce au soutien de la communauté OpenCFD (OpenFOAM, 2014). Il en résulte une conception de code très modulaire dans laquelle les collections de fonctionnalités (par exemple : les méthodes numériques, le maillage, les modèles physiques ...) sont compilées dans leur propre bibliothèque partagée (OpenFOAM, 2016).

OpenFOAM a été utilisé avec succès par Kinzel (Kinzel, et al., 2010) pour l'accumulation de glace sur un rotor tournant et par Son (Son, et al., 2012) pour l'accumulation de glace sur les pales. OpenFOAM offre beaucoup de fonctionnalités sans coût, mais il est plus difficile à manipuler que les trois logiciels précédents, car il nécessite des compétences complémentaires.

2.2.3 RECHERCHES ACADÉMIQUES

Très peu de ces recherches spécifiques à l'industrie de l'énergie éolienne ont été répertoriées. La section qui suit présente quelques sujets intéressants étudiés au cours des dix dernières années.

En 2008, Wang (Wang, 2008) a réalisé des études expérimentales sur le transfert de chaleur par convection et l'aérodynamique du givrage sur les éoliennes. Il a examiné les caractéristiques du transfert de chaleur de la pale avec et sans teneur en eau liquide (LWC) à divers angles d'attaque, les pertes d'énergie lorsqu'une éolienne fonctionne dans des conditions de givrage ainsi que les caractéristiques aérodynamiques d'un profil aérodynamique givré. Cette étude a été effectuée dans une soufflerie réfrigérée, avec un dispositif de chauffage relié à un générateur de courant continu et un profil NACA 63421. La formation de glace a été simulée par pulvérisation des gouttelettes d'eau en surfusion. Le coefficient de transfert de chaleur a été calculé avec le courant, la tension et la vitesse de rotation du générateur de courant continu ; les données ont été acquises avec LabVIEW. La principale contribution de cette étude est l'acquisition données expérimentales à des fins de validation applicables à d'autres modèles. Les résultats montrent que le givrage affecte la puissance de sortie. Les conclusions suivantes ont également été tirées :

- La puissance de sortie a augmenté à 214 % avec 8,5 mm d'épaisseur de glace et la vitesse de rotation de l'éolienne a augmenté à 125 % à une température de -30 °C ;
- L'aérodynamique d'une pale givrée a été peu affectée par les nombres de Reynolds élevés ;
- Lorsque la température est basse, l'épaisseur de la glace est plus grande ;
- Le nombre de Nusselt moyen d'un profil aérodynamique est inférieur à celle d'une plaque plane ou d'un cylindre pour le même nombre de Reynolds ;
- Le nombre de Nusselt moyen a varié en fonction de l'angle d'attaque, en raison du mouvement du point de transition et de la turbulence. Des facteurs de correction et des

corrélations modifiés ont été proposés comme outils de prédiction pour le transfert de chaleur par convection sur profils à différents angles d'attaque.

L'année suivante, Danyluk (Danyluk, 2009) a effectué une étude numérique des systèmes antigivrage pour les pales de turbine éolienne. Il a utilisé un modèle 2D développé dans ANSYS CFX 11,0 pour simuler le système antigivrage. Des éléments chauffants ont été placés sur la surface intérieure du NACA 4412 à différents angles d'attaque. L'écoulement a été modélisé par les équations de Navier-Stokes moyennées avec un modèle de turbulence $k-\omega$. Les trajectoires des gouttelettes ont été modélisées par l'approche de Lagrange. La modélisation du transfert de chaleur prend en compte la convection, les effets visqueux et la conduction. Cette étude donne un aperçu sur la conception d'éléments de chauffage électrothermique pour éoliennes.

Plus récemment, Bu (Bu, et al., 2013) a proposé un modèle mathématique et un code de simulation numérique pour un système de dégivrage thermique. Le code numérique comprend le champ d'écoulement extérieur modélisé avec ANSYS Fluent, le calcul de l'efficacité de captation en utilisant un modèle d'Euler multiphasique, la conservation de la masse et de l'énergie. Des conditions aux limites spécifiques sont utilisées, car le type de condition limite par défaut est de type WALL (sans glissement), ce qui ne convient pas pour ce type de modèle. La condition limite doit être de type WALL pour l'air et de type OUTLET pour les gouttelettes parce qu'elles doivent être éliminées lorsqu'elles frappent la surface afin d'assurer la convergence. La condition limite OUTLET a été mise en place en ajoutant une source négative à chaque cellule adjacente à la frontière, de telle manière à ce que ce terme source absorbe les gouttelettes. Le coefficient de transfert de chaleur est calculé en utilisant la méthode intégrale de la couche limite. Le profil est divisé en quatre régions : la stagnation (approximation de Smith et Spalding), l'écoulement laminaire (Ambrok : formule empirique), l'écoulement turbulent (Ambrok : approximation dérivée du nombre de Stanton) et la transition (nombre de Stanton combiné avec le facteur d'intermittence d'Abu-Ghannam et Shaw). Pour une entrée donnée de distribution de densité de la puissance électrique, le code numérique

est capable de calculer la température d'équilibre, la masse du ruissellement d'eau et la masse de glace. Les résultats numériques montrent que le modèle peut être utilisé pour la prédiction des performances d'un système d'antigivrage électrothermique (Bu, et al., 2013).

2.2.4 CONCLUSION

En général, la simulation numérique de l'antigivrage ou du dégivrage se compose principalement de cinq grandes étapes :

- Le calcul du flux d'air et des gouttelettes ;
- Le calcul de l'efficacité de la collection des gouttelettes ;
- L'évaluation des caractéristiques de la couche limite ;
- L'évaluation des taux d'accumulation de glace grâce à un modèle thermodynamique ;
- La modification de la géométrie.

Les outils numériques existants nécessitent de vastes validations expérimentales et ont besoin d'amélioration. Les imprécisions de ces outils sont principalement dues à l'utilisation de corrélations empiriques dans les modèles ; donc une étude plus approfondie des processus physiques est nécessaire. Il existe encore plusieurs phénomènes physiques qui doivent être inclus. Plus de données expérimentales sur l'accrétion de glace sont également nécessaires pour mieux comprendre ce phénomène et développer des outils appropriés. Actuellement, les modèles d'antigivrage et de dégivrage sont principalement utilisés dans des projets de recherche. La majorité de ces projets sont liés à l'aviation, mais peuvent être profitables à d'autres domaines.

Et, en raison de la nature très exclusive de la recherche, les logiciels LEWICE et FENSAP-ICE semblent être les seuls codes d'accrétion de glace disponibles au public, moyennant un coût de licence. Les solutions libres offrent la liberté d'utilisation, peuvent être utilisées pour n'importe quel projet, peuvent être modifiées pour s'adapter à un problème

spécifique, mais sont livrées sans aucune garantie. L'économie du coût de licence peut être annulée par les coûts associés à l'apprentissage et au temps d'utilisation du logiciel.

Ces principaux outils sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 4: Comparaison des logiciels pour la modélisation de l'antigivrage/dégivrage.

	Fiabilité	Prix (USD)	Difficulté d'utilisation	Possibilité de personnalisation
LEWICE	Élevée	Propriétaire	Moyenne	Faible
FENSAP-ICE	Élevée	?	Moyenne	Faible
ANSYS	Élevée	?	Moyenne	Moyenne
OpenFOAM	Élevée	0	Élevée	Élevée

2.3 PRINCIPALE MÉTHODES D'ANALYSE MULTICRITÈRE

L'analyse multicritères est un outil de prise de décision. Il permet d'effectuer un choix entre plusieurs solutions en décomposant un problème en plusieurs critères pondérés. La première étape d'une analyse multicritère consiste donc à l'identification des critères. Cette liste de critères doit être précise et exhaustive. Ensuite, à chaque critère est affecté un poids selon son importance relative. Plusieurs méthodes sont disponibles pour le choix de cette pondération. L'étape finale de l'analyse multicritères consiste à noter chaque solution selon les critères définis. Finalement, la comparaison de la somme pondérée permet alors de déterminer la meilleure solution. Dans le cadre de la présente thèse, une méthode d'analyse multicritère sera présentée pour aider les exploitants de parc éolien à effectuer le meilleur choix de système de protection contre le givre pour leur site.

2.3.1 LA THÉORIE DE L'UTILITÉ MULTI-ATTRIBUT (MAUT)

La méthode MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) a été conçue grâce aux travaux de Fishburn (Fishburn, 1970), puis de Keeney et Raiffa (Keeney & Raiffa, 1976). Cette méthode permet de gérer les compromis entre plusieurs objectifs. L'idée est donc d'attribuer à chaque action une utilité donnée. En utilisant le concept d'utilité, cette méthode est donc exempte de toute pondération. Toutefois, les méthodes de détermination de l'utilité des critères sont complexes ; elles peuvent faire intervenir des loteries et des extrapolations probabilistes qui jettent un doute sur cette méthode.

Tableau 5: Exemple d'application de la méthode MAUT.

	Action A	Action B	Action C
Utilité du critère 1	1	2	3
Utilité du critère 2	6	8	4
Utilité du critère 3	9	8	7
Utilité totale	16	18	14

Selon l'exemple ci-dessus (Tableau 5), l'action B prévaut sur l'action A, qui prévaut sur l'action C.

2.3.2 LA MÉTHODE DE LA SOMME PONDÉRÉE

La méthode de la somme pondérée est la méthode la plus simple. Elle consiste dans un premier temps à pondérer les critères. Ensuite, le décideur doit évaluer chaque action par rapport à chacun des critères en utilisant une même échelle. C'est cette technique qui est utilisée dans les écoles pour noter les élèves.

Selon l'exemple ci-dessous (Tableau 6), l'action C prévaut sur l'action A, qui prévaut sur l'action B.

Tableau 6: Exemple d'application de la méthode de la somme pondérée.

	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Total
Pondération du critère	5	3	7	
Action A	9	2	3	72
Action B	6	1	4	61
Action C	3	8	7	88

2.3.3 LES MÉTHODES ELECTRE

ELECTRE signifie ÉLimination Et Choix Traduisant la Réalité. Les méthodes de type ELECTRE appartiennent à la famille des méthodes dites de surclassement. Les méthodes de surclassement sont basées sur la comparaison d'actions deux à deux. ELECTRE I a été introduite par Bernard Roy en 1968 et fut la toute première méthode de surclassement. Elle a été améliorée au fil des années et de nos jours quatre principales méthodes de type ELECTRE sont distinguées :

- La méthode ELECTRE I (Roy, 1968), qui a été généralisée en 1987 en ELECTRE IS (Roy & Skalka, 1987);
- La méthode ELECTRE II (Roy & Bertier, 1971);
- La méthode ELECTRE III (Roy, 1978);
- La méthode ELECTRE IV (Roy & Hugonnard, 1982).

Les logiciels ELECTRE IS, ELECTRE III & IV sont disponibles gratuitement sur le site du Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision (LAMSAD) de l'Université Paris Dauphine.

2.3.4 LES MÉTHODES PROMETHEE

PROMETHEE signifie "Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations". Cette méthode a été développée par Jean-Pierre Brans et Philippe Vincke vers

1985 et appartient à la famille des méthodes de surclassement. L'objectif principal de cette méthode est d'être facile à comprendre pour le décideur tout en apportant une analyse plus fine (Brans & Vincke, 1985). Il existe principalement deux versions de la méthode PROMETHEE : PROMETHEE I et PROMETHEE II.

PROMETHEE I fournit des relations de classement partielles tandis que PROMETHEE II offre un classement complet de l'ensemble des actions possibles (Brans & Vincke, 1985). Le logiciel Visual PROMETHEE intégrant les deux méthodes PROMETHEE est disponible gratuitement pour les utilisations académiques et les utilisations à but non lucratif.

2.3.5 LA MÉTHODE D'ANALYSE MULTICRITÈRE HIÉRARCHIQUE AMCH (AHP)

C'est une méthode inventée par Thomas L. Saaty en 1980 (Saaty, 1980). Elle est basée sur la structuration hiérarchique des critères en sous-critères selon leur importance et les préférences du décideur. Elle permet donc d'établir les priorités et de prendre en compte l'interdépendance des éléments. La théorie mathématique derrière cette méthode est également facile à comprendre et à implémenter. De plus, elle fournit des formules permettant d'évaluer la cohérence des choix des poids des critères. Elle sera plus présentée en détail dans au chapitre 6 de ce document.

CHAPITRE 3

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

3.1 LA SOUFFLERIE RÉFRIGÉRÉE

La soufflerie du Laboratoire International des Matériaux Antigivre (LIMA) est une soufflerie réfrigérée, basse vitesse, en circuit fermé, capable de générer divers types de précipitations (Figure 10). Le système de réfrigération est capable de faire varier la température de l'air entre -20 °C et 20 °C grâce à un échangeur de chaleur alimenté par un compresseur et une pompe de glycol. La soufflerie est équipée d'un ventilateur permettant de varier les vitesses d'écoulements. Une rampe de gicleurs placée à l'intérieur de la soufflerie et capable d'osciller verticalement permet de régler la teneur en eau liquide dans l'écoulement.

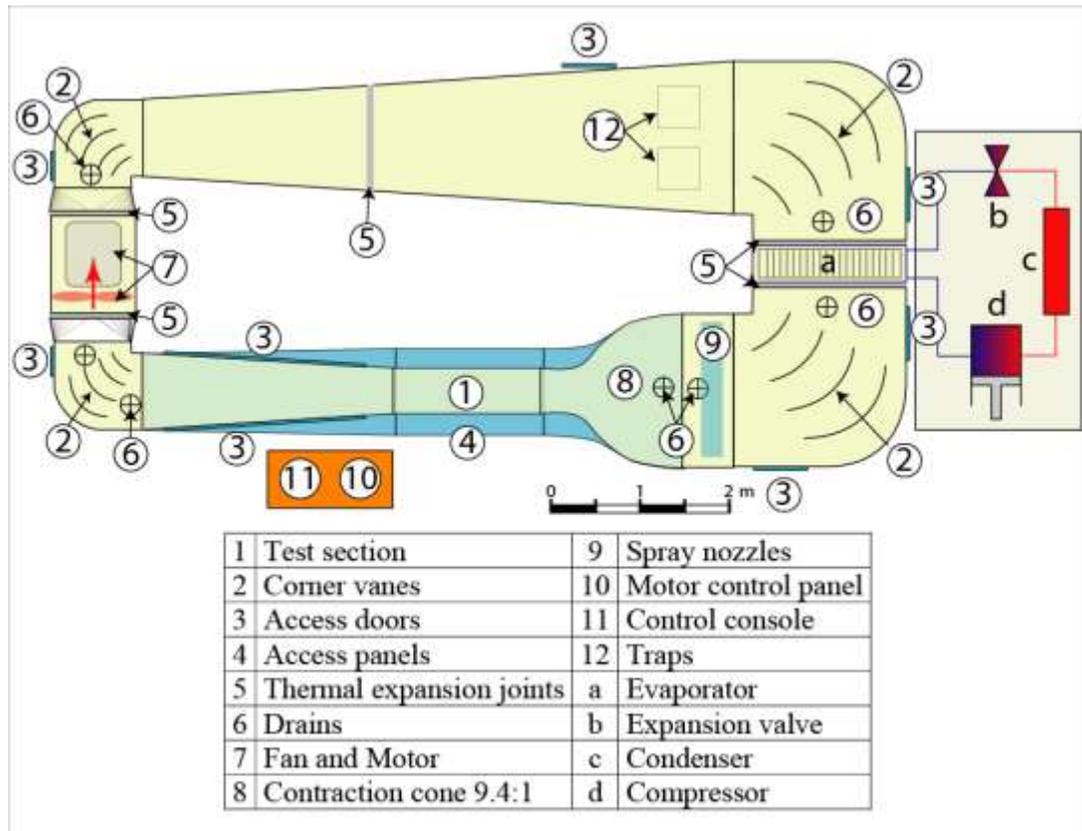


Figure 10: Représentation schématique de la soufflerie.

La soufflerie est constituée de deux sections d'essai. Une petite section d'une largeur de 0,5 m et d'une hauteur de 0,6 m permettant d'effectuer des expériences à des vitesses de vent allant jusqu'à 37 m/s à température ambiante. La grande section d'essai est d'une largeur de 0,91 m et d'une hauteur de 0,76 m ; elle permet d'atteindre des vitesses de vent allant jusqu'à 86 m/s à température ambiante.

3.1.1 CONTRÔLE DE LA VITESSE ET DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

La vitesse de l'air dans la soufflerie est contrôlée par ordinateur grâce à un algorithme de contrôle et une carte d'acquisition de données. L'ordinateur envoie au moteur la fréquence désirée pour l'écoulement de l'air. Au même moment, le différentiel de pression entre l'entrée convergente (8) et la section de mesure (1) est renvoyé au programme via la carte d'acquisition. La vitesse de l'air de la section d'essai est alors calculée à l'aide de l'équation de Bernoulli. L'erreur entre la consigne de vitesse et la vitesse réelle est alors calculée et le programme ajuste la fréquence en conséquence.

La température de l'air est également commandée par l'ordinateur. Le programme envoie un signal d'ouverture ou de fermeture de l'électrovanne qui commande l'écoulement de liquide réfrigéré dans l'échangeur de chaleur. Simultanément, la température de l'air est mesurée dans la section de mesure grâce à un thermocouple de type K et est renvoyée à l'ordinateur. Par analogie avec la vitesse, l'erreur entre la consigne et la valeur mesurée est directement calculée et le dispositif de commande corrige le signal.

3.1.2 CALIBRATION DE LA TENEUR EN EAU LIQUIDE

Le système de pulvérisation d'eau est composé d'une rampe de neuf gicleurs commandés individuellement à l'aide de rotamètres pour contrôler le débit d'eau (Figure 11). Des régulateurs et jauges de pression permettent de stabiliser la pression de l'air et une unité de refroidissement régule la température de l'eau utilisée pour produire le nuage de

gouttelettes en surfusion dont le diamètre médian volumétrique (MVD) peut varier de 10 μm à 40 μm et la teneur en eau liquide (LWC) de 0,11 g/m^3 à 8,88 g/m^3 .

L'eau utilisée est filtrée et nettoyée afin d'obtenir une eau osmotique déminéralisée distillée. Le système de pulvérisation est situé et centré en amont de la section de mesure et peut osciller verticalement sur la hauteur de la section. Le diamètre des gouttelettes d'eau est contrôlé grâce à la pression de l'air injecté dans le gicleur tandis que la teneur en eau liquide est contrôlée par le débit d'eau (rotamètres).



Figure 11: Rampe de gicleurs à l'entrée de la section.

Pour calibrer la teneur en eau liquide, la rampe est fixée de telle manière qu'elle soit centrée sur le profil de la pale. Un appareil de mesure de teneur en eau (LWC-200) est utilisé pour mesurer la teneur en eau le long du profil de la pale grâce à un bras mécanique qui se déplace horizontalement (Figure 12).

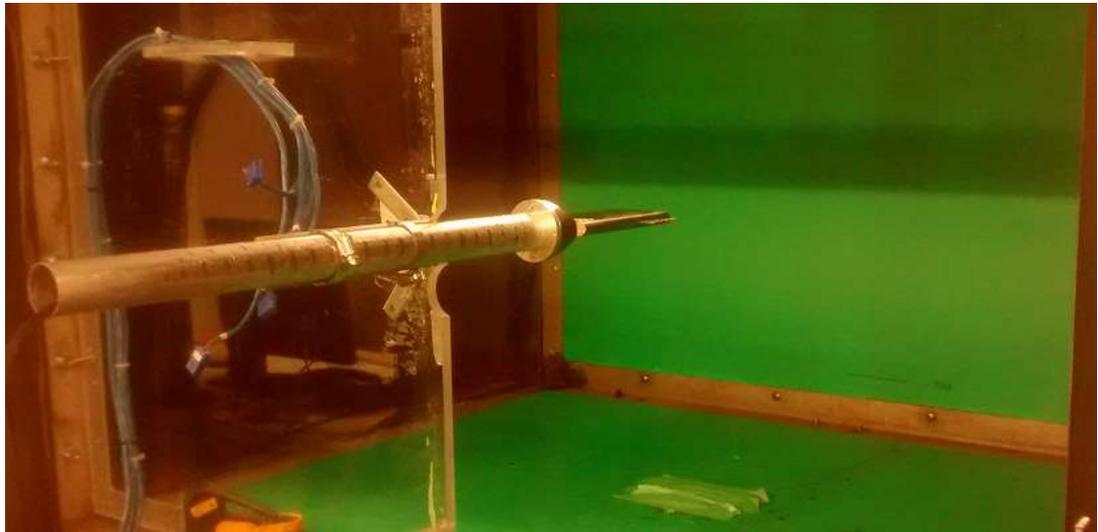


Figure 12: Montage expérimental pour la calibration de la teneur en eau avec l'appareil LWC-200

Notre première série d'expériences consistait à caractériser l'effet de chaque gicleur. La vitesse d'écoulement est fixée à 10 m/s et le rotamètre du gicleur étudié est fixé à 25 mm (les autres gicleurs étaient fermés). La distribution des valeurs de teneur en eau est représentée dans le graphique ci-dessous.

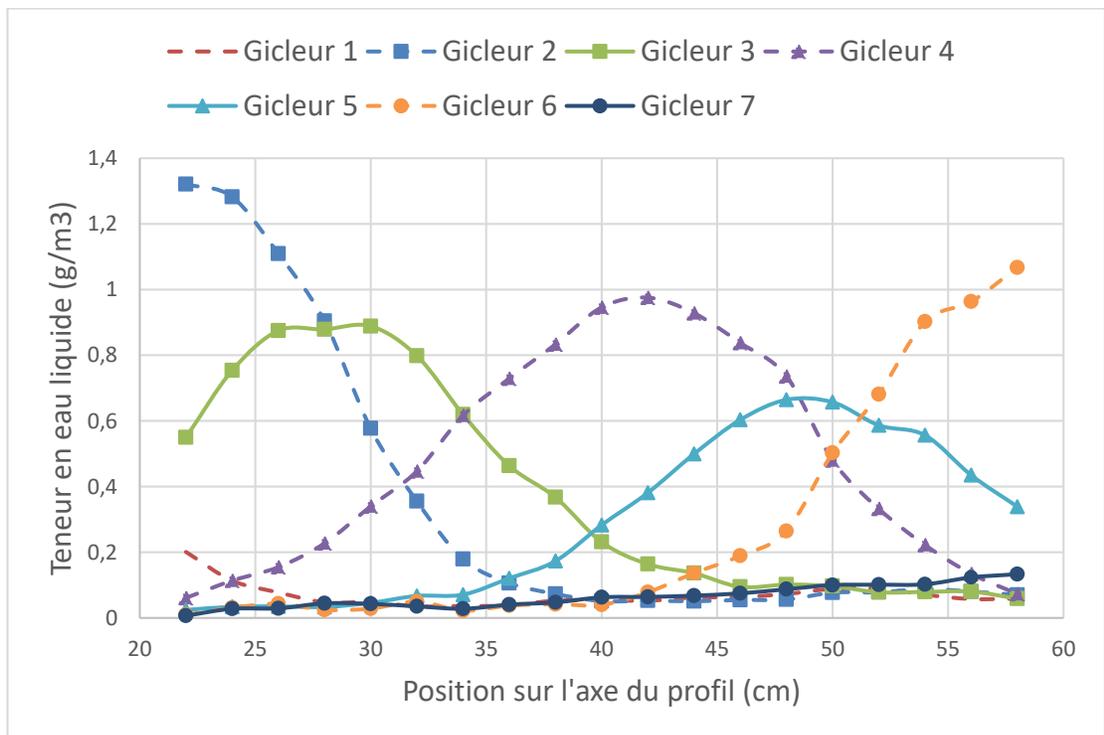


Figure 13: Courbe de caractérisation des gicleurs.

Les gicleurs 8 et 9 sont hors du champ délimité par le profil de la pale ; ils ont donc été retirés de cette figure. La comparaison de ces courbes montre que pour des valeurs de débit de rotamètres identiques, les gicleurs n'ont pas le même impact sur le profil de la pale. Ceci indique qu'en réglant les rotamètres à la même valeur, la teneur en eau liquide équivalente sur le profil ne sera pas uniforme. Deux essais supplémentaires avec les rotamètres réglés à 25 mm ont été réalisés afin de corroborer cette assertion ; le résultat est représenté à la Figure 14.

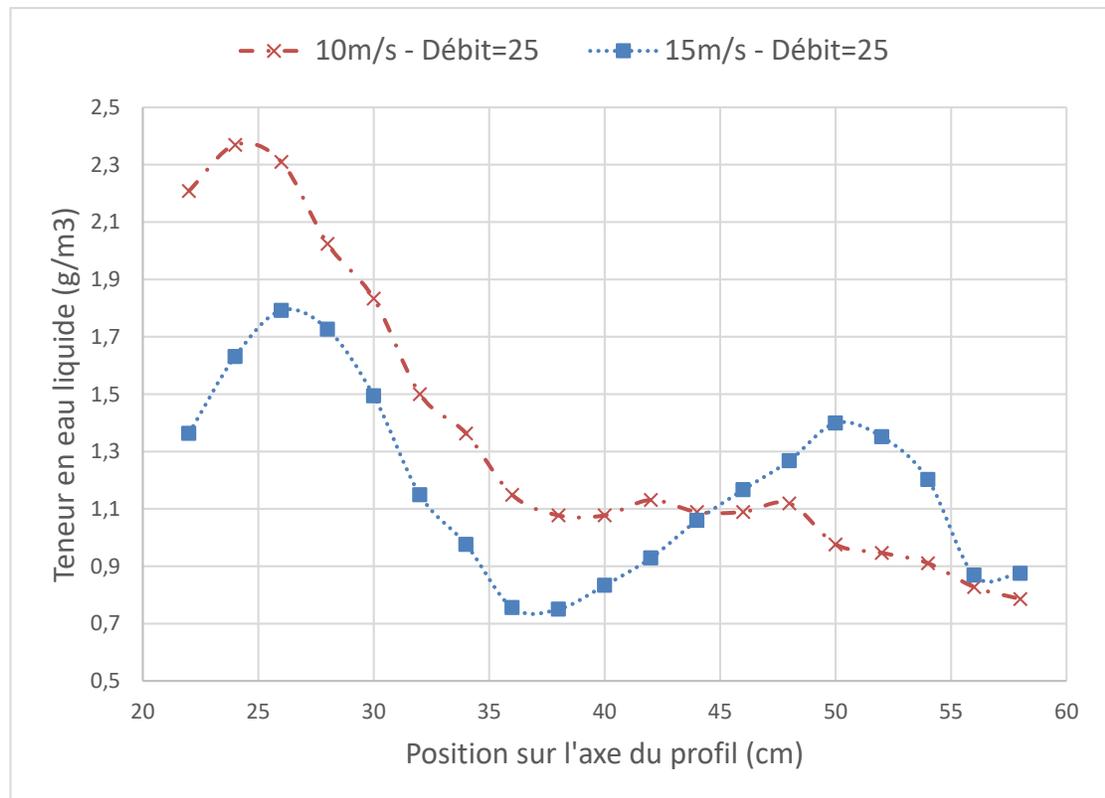


Figure 14: Distribution des teneurs en eau liquide sur le profil à 10 m/s et 15 m/s avec uniquement les rotamètres 2 et 3 ouverts à 25 mm.

Par conséquent, il était impossible de définir une valeur de consigne de teneur en eau et de la respecter uniformément le long du profil. À défaut de pouvoir définir des consignes de teneur en eau, dans la seconde série d'expériences, des réglages de rotamètre qui permettraient d'avoir une valeur constante de teneur en liquide le long du profil sont déterminés manuellement. Ainsi, après de nombreuses tentatives, des résultats intéressants sont obtenus

à des vitesses de vent de 10 m/s et 15 m/s. Ces résultats sont répertoriés dans le Tableau 7 ; ce tableau indique pour une vitesse de vent donnée, les réglages de rotamètres qu'il faut avoir pour obtenir la valeur moyenne de teneur en eau liquide inscrite dans la dernière colonne du tableau.

Tableau 7: Réglage manuel des rotamètres.

Vitesse	Gicleur 1	Gicleur 2	Gicleur 3	Gicleur 4	Gicleur 5	Gicleur 6	Gicleur 7	LWC _{moy}
10 m/s	13,5	12	21,5	22,5	16	23	19	0,93
10 m/s	0	10	10	10	10	0	0	0,3
15 m/s	20	10	22,5	24	20	17,5	30	0,61
15 m/s	21	3,5	16	16,5	13,5	11	0	0,26



Figure 15: Vérification des réglages déterminés pour les rotamètres.



Avant

Après

Figure 16: Vérification des réglages manuels des rotamètres afin d'obtenir une teneur en eau liquide constante le long du profil (cas étudié : 10 m/s).

La Figure 15 montre pour les valeurs inscrites dans le Tableau 7, la variation de la teneur en eau liquide tout le long du profil. L'objectif visé était d'avoir le moins de variations possible tout le long du possible afin d'assurer une accumulation uniforme et ces courbes indiquent que les réglages choisis rapprochent de cet objectif. La Figure 16 montre à gauche une photo de l'accumulation de glace sur le profil avant l'utilisation des réglages du Tableau 7 et à droite une photo l'accumulation de glace avec les valeurs du Tableau 7 à 10 m/s pour une teneur en eau liquide cible de 0.3 g/m^3 ; il ressort que l'accumulation est plus uniforme avec l'utilisation des réglages déterminés.

3.2 LE PROFIL DE PALE

3.2.1 FABRICATION DU PROFIL

Notre but est de construire une pale basée sur un profil NACA 0012 et ayant une structure similaire à celle des pales éoliennes. Les pales d'éoliennes sont généralement un assemblage de matériaux composites (fibre de verre et fibre de carbone). Pour lier les fibres ensemble, une résine thermodurcissable telle que la résine polyester ou la résine époxyde est utilisée. La résine époxyde est la plus répandue parce qu'elle demeure homogène et isotrope à des températures élevées (jusqu'à $170 \text{ }^\circ\text{C}$).



Figure 17: Moule de la pale basée sur un profil NACA 0012.

La fibre de verre et la résine époxyde sont utilisés d'une part pour obtenir une meilleure isolation thermique (la fibre de carbone est plus conductrice) et, d'autre part, parce que le procédé de fabrication ne permettait pas d'avoir une structure faite à la fois de fibre de verre et de fibre de carbone. Ce procédé de fabrication a consisté à disposer successivement dans un moule l'armature (fibre de verre) et la résine. Un débullage puis un lissage sont ensuite réalisés. Cette technique est manuelle, économe, mais ne permet pas d'obtenir d'excellentes propriétés mécaniques.

Le profil final obtenu a une section constante de 25,4 cm (10 pouces) sur 12,7 cm (15 pouces) (12,7 cm étant la longueur de l'intrados/extrados). L'épaisseur de la paroi du profil est de 2,54 mm (0,1 pouce).

3.2.2 INSTRUMENTATION DU PROFIL

Le profil est équipé de dix résistances chauffantes collées sur l'extrados. Un fluxmètre est placé au-dessus de chaque résistance pour mesurer le flux de chaleur sortant ; ces fluxmètres donnent également une indication de la température de surface. Un thermocouple

est centré entre chaque résistance chauffante et le profil. Un autre thermocouple est également collé sur la paroi interne du profil vis-à-vis du thermocouple de la paroi externe. Cet agencement permet de connaître la température à l'intérieur du profil afin de déclencher un dispositif de protection qui coupe l'alimentation lorsque cette température dépasse un seuil fixé à 50 °C. De plus, ces 20 thermocouples permettent d'estimer la valeur de l'énergie perdue par conduction et d'appuyer les lectures fournies par les fluxmètres.

Les bandes chauffantes utilisées sont de type Omega KH-105/10-P d'une longueur de 12,7 cm (5 pouces) et d'une épaisseur de 0,0254 cm (0,010 pouce) et d'une densité de puissance maximale de 10 W/pouce². Cinq des bandes chauffantes sont d'une largeur de 2,54 cm (1 pouce) et les cinq autres, de 5,08 cm (2 pouces). Au niveau du point de stagnation, une seule résistance de 5,08 cm est utilisée et couvre uniformément l'intrados et l'extrados afin d'épouser parfaitement la courbure du profil. L'arrangement des résistances est schématisé dans la Figure 19.

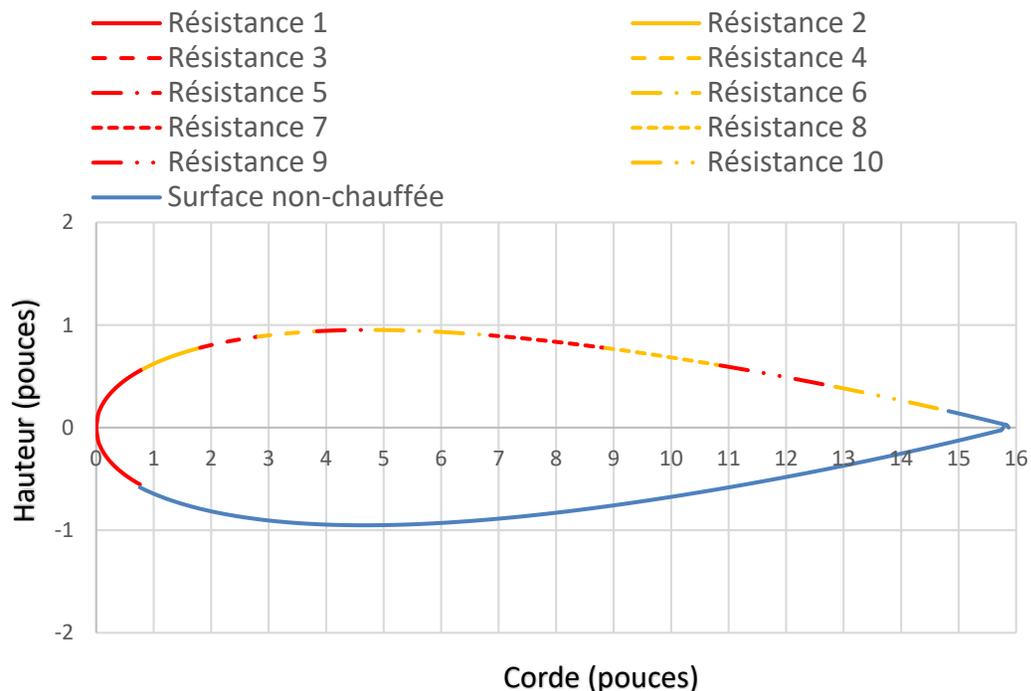


Figure 18: Arrangement des résistances chauffantes (représentées en jaune et rouge) sur l'extrados du profil.

Ces résistances sont légères, minces et flexibles. Leur plage de température d'opération varie entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Leur structure est constituée d'un film gravé de résistances, d'une épaisseur de $0,00127\text{ cm}$ ($0,0005\text{ pouce}$) ou de $0,000254\text{ cm}$ ($0,0001\text{ pouce}$), encapsulé entre deux films de polyimide et d'adhésif d'une épaisseur de $0,00508\text{ cm}$ ($0,002\text{ pouce}$). La Figure 20 montre une vue de dessus du profil avec les résistances installées.

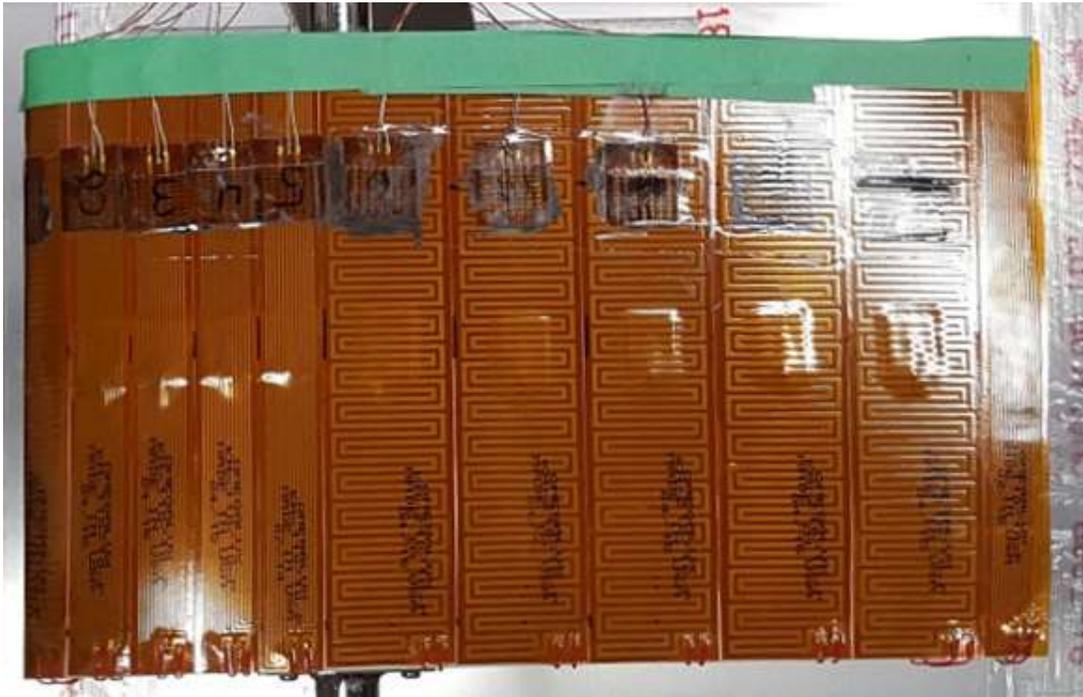


Figure 19: Profil NACA 0012 instrumenté.

Les résistances sont alimentées par 10 sources variables de type Tenma 72-110. Ces sources sont capables de fournir une tension alternative entre 0 V et 130 V avec un courant maximal de 10 A . Chaque source est équipée d'un voltmètre Tenma 72-7770 pour un affichage numérique de la tension aux bornes de chaque résistance.

Les fluxmètres utilisés sont de type Omega HFS-4 (Figure 21). Ils sont constitués de jonctions multiples de pellicules thermopiles. Leur plage de température varie de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ et, d'après leur constructeur, ils sont parfaits pour mesurer la convection, la conduction et le rayonnement, et peuvent être fixés sur n'importe quelle surface plane ou courbée.

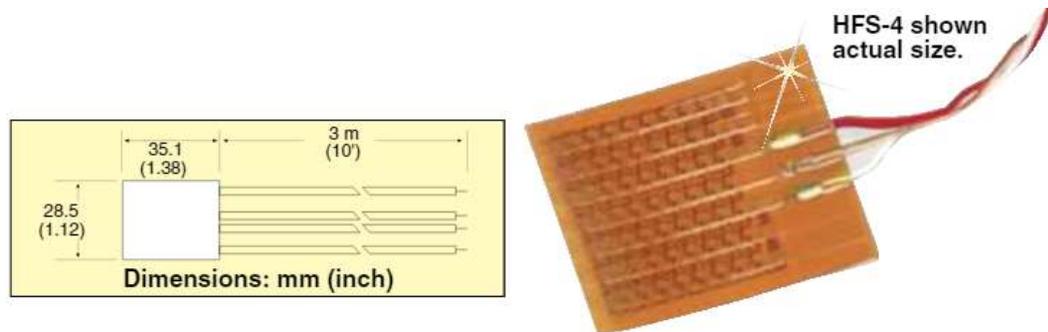


Figure 20: Fluxmètre Omega HFS-4 en taille réelle.

Le système d'acquisition de données est composé d'une carte National Instrument PCI-MIO16-XE-10 de 100 Ko/s à seize canaux et d'un microprocesseur AMD Sempron 3400 1,8 GHz. Le programme d'interface pour contrôler la soufflerie a été développé au LIMA en langage .NET. Cet équipement contrôle la vitesse du vent et la température. Un enregistreur de données GRAPHTEC midi LOGGER GL800 a été utilisé pour la lecture des températures et des flux de chaleur. La Figure 21 représente une photo du montage complet.

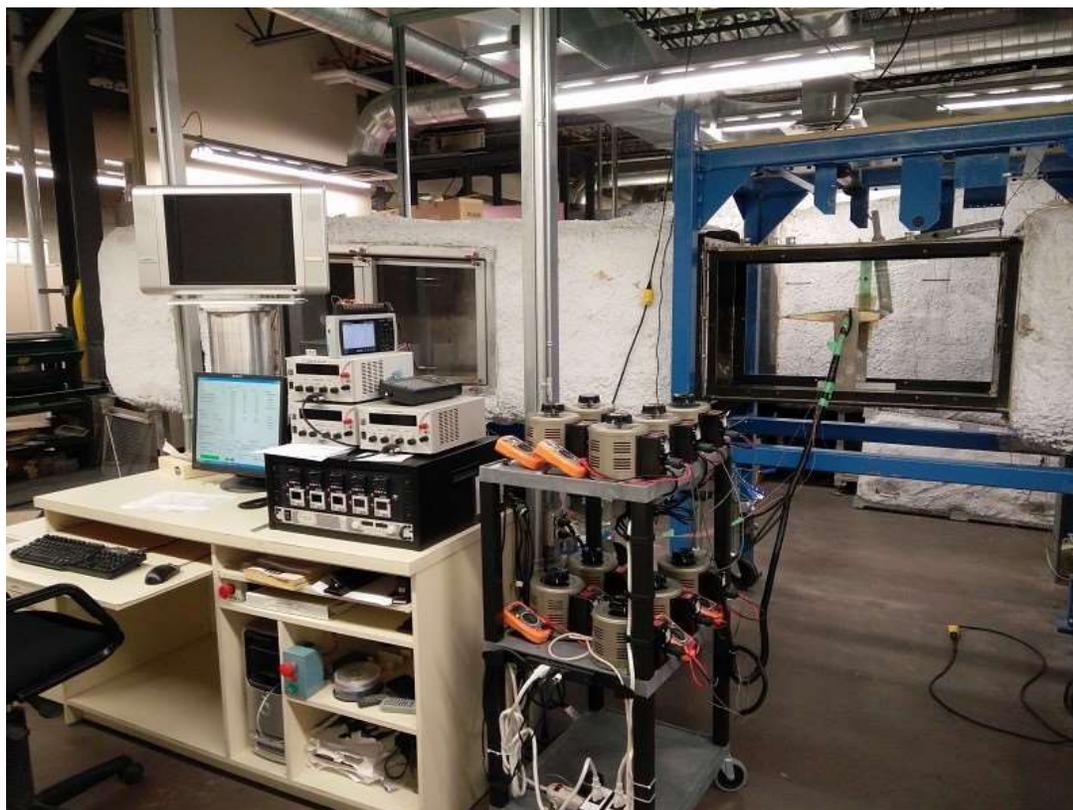


Figure 21: Montage expérimental installé dans la soufflerie réfrigérée.

CHAPITRE 4

ÉTUDE DE L'ANTIGIVRAGE

4.1 INTRODUCTION

Il existe deux principes de classification des systèmes d'antigivrage fonctionnant sur le principe des résistances chauffantes. Le premier principe consiste à chauffer la surface de la pale suffisamment pour faire évaporer les gouttelettes lorsqu'elles la touchent ; c'est l'antigivrage par évaporation. Cette technique nécessite beaucoup d'énergie et les effets de la chaleur sur la durée de vie de la pale demeurent inconnus à ce jour. La seconde approche consiste à chauffer suffisamment les gouttelettes pour éviter leur gel à l'impact et aussi pour éviter le givrage secondaire ; c'est l'antigivrage humide. La méthode utilisée dans cette étude est basée sur cette seconde approche.

4.2 PRINCIPES FONDAMENTAUX

4.2.1 HYPOTHÈSES

Plusieurs modèles analytiques et numériques ont été développés au cours des années pour simuler le transfert de chaleur et de masse lors de l'accumulation de glace sur les surfaces chauffées. Les modèles les plus performants s'appuient sur la dynamique des fluides computationnelle (CFD) et nécessitent de longues heures de simulation (dépendamment de la puissance de calcul informatique disponible) et du personnel qualifié. Il y a donc un compromis à faire entre la précision souhaitée et les moyens disponibles. Pour atteindre les objectifs fixés et concevoir un modèle analytique facile d'utilisation et qui fournit des résultats représentatifs de manière presque instantanée, des formules semi-empiriques sont utilisées et les hypothèses simplificatrices suivantes posées :

- Seuls les effets bidimensionnels seront considérés ;
- Le coefficient de transfert de chaleur par convection le long du bord d'attaque sera supposé constant ;

- Le fluide arrivant sur la surface de la pale ne pourra être constitué que d'air ou d'un mélange homogène d'eau et d'air ;
- L'écoulement sera incompressible et non visqueux ;
- La température des gouttelettes sera supposée égale à la température de surface T_S ;
- La conduction thermique à travers le revêtement chauffant sera négligée à cause de sa fine épaisseur ;
- Le ruissellement sera négligé ;
- L'intrados et l'extrados de la pale d'éolienne pourront être assimilés à des plaques planes de dimensions finies.

4.2.2 LA MASSE D'EAU COLLECTÉE

Le débit massique de gouttelettes impactant est la quantité d'eau par unité de temps et de surface qui peut être captée par la pale, également connu sous le nom d'intensité de l'accumulation de glace. Il peut être estimé conformément à la formule (Makkonen, 1981):

$$\dot{m}_{imp} = V_{\infty} \cdot LWC \cdot E \quad \text{Équation 1}$$

L'efficacité de collection locale E est le rapport entre la distance entre les trajectoires des gouttelettes et la distance entre les points d'impact (Nishio & Kato, 2004), comme indiqué à la Figure 23, ce qui donne une formule simplifiée pour le calcul de l'efficacité de collection :

$$E = \frac{dy_o}{ds} \quad \text{Équation 2}$$

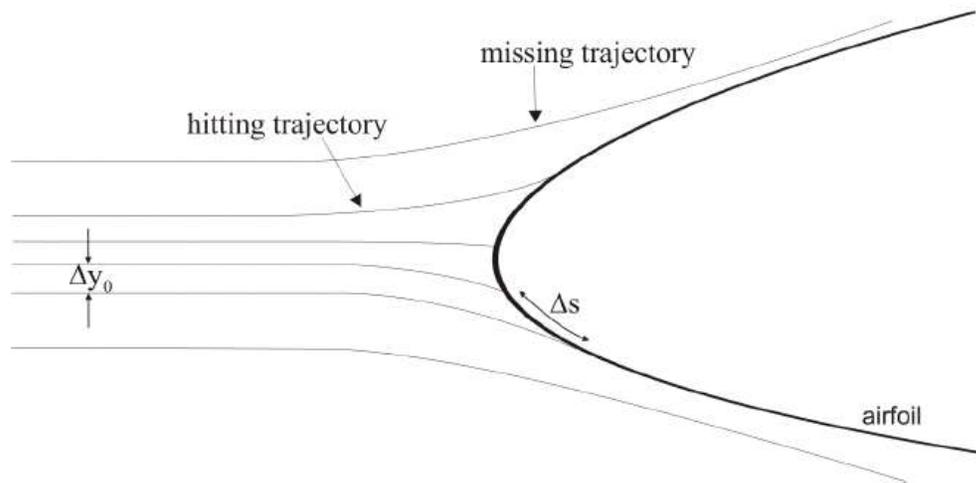


Figure 22: Calcul de l'efficacité de collection. Source : (Da Silveira, et al., 2003).

4.2.3 LA CHALEUR SENSIBLE

La chaleur sensible est l'énergie nécessaire pour chauffer la goutte impactant sur le profil, de sa température initiale à la température de surface T_s . D'après Meier (Meier & Scholz, 2010), pour une fraction givrante nulle :

$$\dot{q}_{sens} = \dot{q}_{imp} = \dot{m}_{imp} \cdot C_{p,w}(T_s - T_\infty) \quad \text{Équation 3}$$

Cette expression de la chaleur sensible ne prend pas en compte les effets du ruissellement.

4.2.4 LE RÉCHAUFFEMENT CINÉTIQUE

Le réchauffement cinétique est le gain d'énergie dû à la vitesse des gouttelettes et il s'exprime selon la formule suivante (Meier & Scholz, 2010):

$$\dot{q}_{kin} = \dot{m}_{imp} \frac{V_\infty^2}{2} \quad \text{Équation 4}$$

4.2.5 LA PERTE DE CHALEUR PAR CONVECTION

La perte de chaleur par convection est donnée par :

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad \text{Équation 5}$$

Lorsqu'une éolienne est en fonctionnement, la vitesse relative du vent V aux alentours de la pale est la résultante de la vitesse du vent non perturbé V_∞ en amont de l'éolienne (composante tangentielle) et de la vitesse de rotation $R\omega$ de l'éolienne (composante radiale). La valeur de cette vitesse en tout point proche de la pale est donnée par l'expression :

$$V(R) = \sqrt{V_\infty^2 + (R\omega)^2} \quad \text{Équation 6}$$

Cette vitesse relative est maximale en bout de pale, ce qui signifie également que le coefficient de convection est maximal à cet endroit. Le coefficient de convection local sera exprimé comme suit (Meier & Scholz, 2010):

$$h = N_u \frac{k_a}{R} \quad \text{Équation 7}$$

Avec
$$N_u = 0,0296 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Équation 8}$$

Et
$$Re = \frac{\rho R V}{\mu} = \frac{\rho R \sqrt{V_\infty^2 + (R\omega)^2}}{\mu} \quad \text{Équation 9}$$

4.2.6 LE RÉCHAUFFEMENT AÉRODYNAMIQUE

C'est l'échauffement dû au frottement entre les gouttelettes et l'air. Cette expression devrait être minimisée car elle constitue un apport de chaleur supplémentaire (Meier, 2010). Il s'exprime comme suit (Meier & Scholz, 2010):

$$\dot{q}_{aero} = h \frac{r_c V_\infty^2}{2C_{p,a}} \quad \text{Équation 10}$$

Où r_c , le facteur de recouvrement pour les fluides incompressibles, est approximé par (Cebeci, 2013):

$$r_c = \begin{cases} P_r^{\frac{1}{2}} & (\text{laminare}) \\ P_r^{\frac{1}{3}} & (\text{turbulent}) \end{cases} \quad \text{Équation 11}$$

Et :

$$P_r = \frac{C_{p,a}\mu}{k_a} \quad \text{Équation 12}$$

4.2.7 LA PERTE DE CHALEUR PAR ÉVAPORATION

Même si la méthode d'antigivrage mise au point dans le présent document ne consiste pas en une méthode par évaporation des gouttelettes, la chaleur à la surface de la pale est suffisamment élevée pour faire évaporer une partie de l'eau incidente. La perte de chaleur par évaporation peut être estimée par (Battisti, 2015):

$$\dot{q}_{evap} = \frac{0.622 \cdot h \cdot 2.5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{2/3} \cdot p_\infty^0} 27.03 \cdot (T_s - T_\infty) \quad \text{Équation 13}$$

4.2.8 LE BILAN D'ÉNERGIE

Le bilan énergétique est donné par (Meier & Scholz, 2010):

$$\dot{q}_{anti} = \dot{q}_{sens} + \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{evap} + \dot{q}_{kin} + \dot{q}_{aero} \quad \text{Équation 14}$$

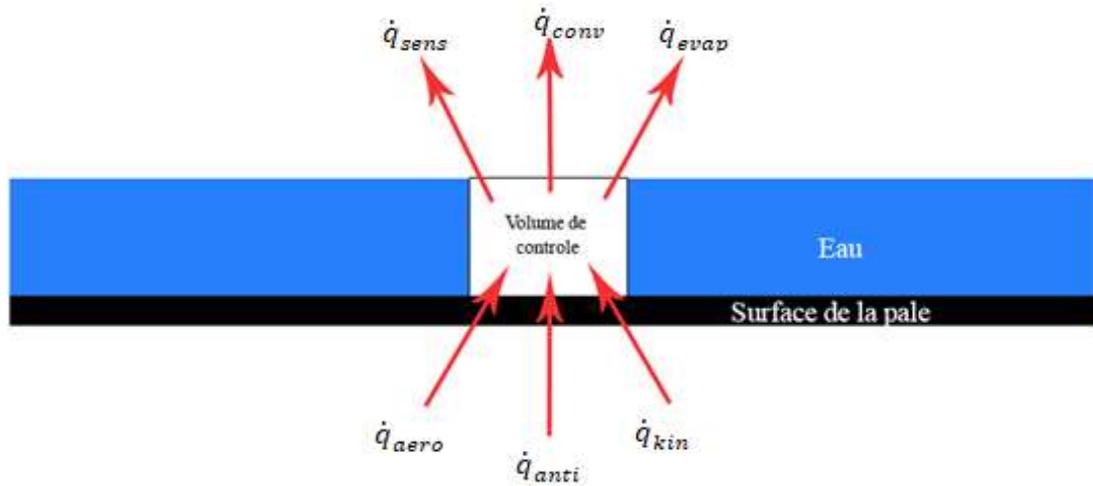


Figure 23: Bilan énergétique.

\dot{q}_{anti} : Chaleur fournie

\dot{q}_{sens} : Chaleur sensible

\dot{q}_{conv} : Perte de chaleur par convection

\dot{q}_{evap} : Perte de chaleur par évaporation

\dot{q}_{aero} : Réchauffement aérodynamique

\dot{q}_{kin} : Réchauffement cinétique

La Figure 23 montre les différents flux énergétiques avec leur direction (apport pour une flèche entrante et perte pour flèche sortante).

4.3 MODÉLISATION

4.3.1 DÉVELOPPEMENT

Le modèle analytique s'inspire des travaux de Kays et Crawford (Kays, et al., 2012) pour un écoulement d'air au-dessus d'une plaque semi-finie avec une température de surface arbitraire. Selon les mêmes hypothèses, leur travail sera étendu à un écoulement diphasique (eau et air). Pour un écoulement constant bidimensionnel d'un fluide incompressible et non visqueux, l'échange de chaleur entre une surface et un fluide peut être donnée par :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad \text{Équation 15}$$

Avec

- (u, v) respectivement les composantes de la vitesse selon (x, y) ,
- $\alpha = k/(\rho c)$, la diffusivité thermique du fluide.

Soit $\theta(\varepsilon, x, y)$ une solution de l'équation précédente, pour une condition aux limites telle que $T_0 = T_\infty$, quand $x < \varepsilon$ et $T_0 = \text{constante}$ quand $x > \varepsilon$. $\theta(\varepsilon, x, y)$ est définie par :

$$\theta(\varepsilon, x, y) = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_\infty} \quad \text{Équation 16}$$

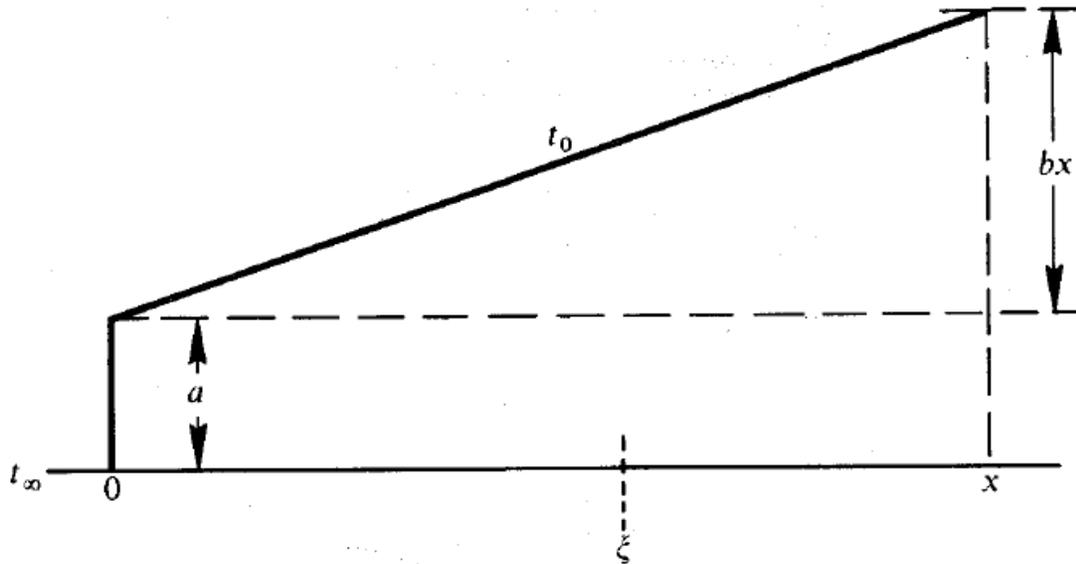


Figure 24: Exemple d'une distribution de la température à la surface sous forme de rampe.
Source : (Kays, et al., 2012).

Le flux de chaleur est donné par :

$$\begin{aligned} \dot{q} &= -k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \\ &= k \left[\int_0^x \theta_y(\varepsilon, x, 0) \left(\frac{dT_0}{d\varepsilon} \right) d\varepsilon \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^n \theta_y(\varepsilon_i, x, 0) \Delta t_{0,i} \right] \quad \text{Équation 17} \end{aligned}$$

En supposant que la fonction solution θ est un échelon unique (ce qui correspond à une température de surface constante) alors :

$$\frac{dT_0}{dx} = \frac{dT_0}{d\varepsilon} = b = 0 \quad \text{Équation 18}$$

Le flux de chaleur devient :

$$\dot{q} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = k\theta_y(\varepsilon_i, x, 0)(T_0 - T_\infty) \quad \text{Équation 19}$$

Comme la perte de chaleur est essentiellement par convection, chaleur sensible et qu'il existe des gains en énergie dus à l'énergie cinétique et au réchauffement aérodynamique (Cf. Équation 14) :

$$\begin{aligned} \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{sens} + \dot{q}_{evap} - \dot{q}_{kin} - \dot{q}_{aero} \\ = k\theta_y(\varepsilon_i, x, 0)(T_s - T_\infty) \end{aligned} \quad \text{Équation 20}$$

En remplaçant les différents flux par leurs expressions respectives:

$$\begin{aligned} h(\varepsilon, x)(T_s - T_\infty) + \dot{m}_{imp} \cdot C_{p,w}(T_s - T_\infty) \\ + \frac{0,622 \cdot h \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_\infty^0} 27,03 \cdot (T_s - T_\infty) \\ - \dot{m}_{imp} \frac{V_\infty^2}{2} - h(\varepsilon, x) \frac{r_c V_\infty^2}{2C_{p,a}} \\ = k\theta_y(\varepsilon_i, x, 0)(T_s - T_\infty) \end{aligned} \quad \text{Équation 21}$$

Donc,

$$\begin{aligned} \theta_y(\varepsilon_i, x, 0) = \frac{h(\varepsilon, x)}{k} \left[1 - \frac{r_c V_\infty^2}{2(T_s - T_\infty)C_{p,a}} \right. \\ \left. + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{2/3} \cdot p_\infty^0} \right] \\ + \frac{\dot{m}_{imp}}{k(T_s - T_\infty)} \left[C_{p,w}(T_s - T_\infty) \right. \\ \left. - \frac{V_\infty^2}{2} \right] \end{aligned} \quad \text{Équation 22}$$

Ou plus simplement

$$\theta_y(\varepsilon_i, x, 0) = \frac{h(\varepsilon, x)}{k} (1 - \gamma + \theta) + \delta \quad \text{Équation 23}$$

Avec

$$\gamma = \frac{r_c V_\infty^2}{2(T_s - T_\infty) C_{p,a}} \quad \text{Équation 24}$$

$$\theta = 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{2/3} \cdot p_\infty^0} \quad \text{Équation 25}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\dot{m}_{imp}}{k(T_s - T_\infty)} \left[C_{p,w}(T_s - T_\infty) - \frac{V_\infty^2}{2} \right] \\ &= \frac{V_\infty \cdot LWC \cdot E_m}{k(T_s - T_\infty)} \left[C_{p,w}(T_s - T_\infty) - \frac{V_\infty^2}{2} \right] \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Équation} \\ 26 \end{array}$$

Or,

$$\dot{q} = k \left[\int_0^x \theta_y(\varepsilon, x, y) \left(\frac{dT_s}{d\varepsilon} \right) d\varepsilon + \sum_{i=1}^n \theta_y(\varepsilon_i, x, y) \Delta t_{s,i} \right] \quad \text{Équation 27}$$

Supposant que la variation de température est sous la forme d'une rampe (linéarisation entre deux points) telle que :

$$T_s = T_\infty + a + bx \quad \text{Équation 28}$$

$$\frac{dT_s}{dx} = b = \frac{dT_s}{d\varepsilon} \quad \text{Équation 29}$$

Ainsi,

$$\begin{aligned}
\dot{q} &= k \int_0^x \left[\frac{h(\varepsilon, x)}{k} (1 - \gamma + \theta) + \delta \right] \left(\frac{dT_s}{d\varepsilon} \right) d\varepsilon \\
&\quad + k \sum_{i=1}^n \left[\frac{h(\varepsilon, x)}{k} (1 - \gamma + \theta) + \delta \right] \Delta t_{s,i} \\
&= (1 - \gamma + \theta) \dot{q}_{dry} \\
&\quad + \delta \left[k \int_0^x \left(\frac{dT_s}{d\varepsilon} \right) d\varepsilon + k \sum_{i=1}^n \Delta t_{0,i} \right] \\
&= (1 - \gamma + \theta) \dot{q}_{dry} + \delta k \left[\int_0^x b d\varepsilon + T_s - T_\infty \right]
\end{aligned}$$

Équation 30

Pour une couche limite laminaire :

$$\dot{q}_{wet,l} = (1 - \gamma + \theta) \dot{q}_{dry,l} + \delta k (bx + T_0 - T_\infty) \quad \text{Équation 31}$$

Et, pour une couche limite turbulente :

$$\dot{q}_{wet,t} = (1 - \gamma + \theta) \dot{q}_{dry,t} + \delta k (bx + T_s - T_\infty) \quad \text{Équation 32}$$

Sachant que d'après (Kays, et al., 2012):

$$\dot{q}_{dry,l} = \frac{0,332k}{x} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}} (1,612bx + a) \quad \text{Équation 33}$$

$$\dot{q}_{dry,t} = \frac{0,0287k}{x} Pr^{0.6} Re^{0.8} (1,134bx + a) \quad \text{Équation 34}$$

Considérons le cas $b = 0$ (température uniforme sur toute la surface):

$$T_s = T_\infty + a \quad \text{Équation 35}$$

Par suite :

$$\dot{q}_{wet,l} = (1 - \gamma + \theta) \frac{0,332ka}{x} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}} + \delta ka \quad \text{Équation 36}$$

$$\dot{q}_{wet,t} = (1 - \gamma + \theta) \frac{0,0287ka}{x} Pr^{0.6} Re^{0.8} + \delta ka \quad \text{Équation 37}$$

4.3.2 SYNTHÈSE

Le modèle analytique présenté est une extension du modèle développé par Kays & Crawford pour un écoulement d'air au-dessus d'une plaque plane chauffée arbitrairement. Les deux modèles seront comparés ici de manière synthétisée.

Le flux de chaleur échangé entre la plaque et l'écoulement pour une température de la plaque uniforme est donné par :

Cf. Équation 19
$$\dot{q} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = k \theta_y(\varepsilon_i, x, 0) (T_0 - T_\infty)$$

La valeur inconnue dans cette équation est θ_y et pour la déterminer, la méthode utilisée par Kays & Crawford est de remplacer le flux \dot{q} par son expression et d'ensuite déduire la valeur de θ_y . Dans le cas de Kays & Crawford, le flux est perdu uniquement par convection tandis que dans notre cas il est perdu par convection, chaleur sensible, évaporation, réchauffement cinétique et réchauffement aérodynamique ; ce qui revient à :

Kays et Crawford (Air)	Notre étude (Air + Eau)
$\dot{q} = h(T_0 - T_\infty)$ <p>Équation 38</p>	$\dot{q} = h(T_0 - T_\infty) + \dot{q}_{sens} + \dot{q}_{evap} - \dot{q}_{kin} - \dot{q}_{aero}$ <p>Équation 39</p>

$k\theta_y(\varepsilon_i, x, 0)(T_0 - T_\infty) = h(T_0 - T_\infty)$ <p style="text-align: center;">Équation 40</p>	$k\theta_y(\varepsilon_i, x, 0)(T_0 - T_\infty) = h(T_0 - T_\infty) + \dot{q}_{sens} + \dot{q}_{evap} - \dot{q}_{kin} - \dot{q}_{aero}$ <p style="text-align: center;">Équation 41</p>
$\theta_y(\varepsilon_i, x, 0) = \frac{h}{k}$ <p style="text-align: center;">Équation 42</p>	$\theta_y(\varepsilon_i, x, 0) = \frac{h}{k}(1 - \gamma + \theta) + \delta$ <p style="text-align: center;">Équation 43</p>

Les nouvelles constantes γ (Équation 24), θ (Équation 25) et δ (Équation 26) ont été décrites dans le paragraphe précédent. L'expression de θ_y ainsi déterminée comporte encore une inconnue qui est le coefficient de convection h . Une expression de h a été proposée par Kays & Crawford en modes laminaire et turbulent. En mode laminaire par exemple :

$$h = \frac{0,332k}{x} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}} \quad \text{Équation 44}$$

h est remplacé par son expression afin de déterminer θ_y et ensuite \dot{q} .

Kays et Crawford (Air)	Notre étude (Air + Eau)
$\theta_y(\varepsilon_i, x, 0) = \frac{h}{k} = \frac{0,332}{x} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}}$ <p style="text-align: center;">Équation 45</p>	$\theta_y(\varepsilon_i, x, 0) = \frac{h}{k}(1 - \gamma + \theta) + \delta = \frac{0,332}{x} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}}(1 - \gamma + \theta) + \delta$ <p style="text-align: center;">Équation 46</p>
$\dot{q} = k\theta_y(\varepsilon_i, x, 0)(T_0 - T_\infty) = \frac{0,332k}{x} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}}(T_0 - T_\infty)$ <p style="text-align: center;">Équation 47</p>	$\dot{q} = k\theta_y(\varepsilon_i, x, 0)(T_0 - T_\infty) = \left[\frac{0,332k}{x} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}}(1 - \gamma + \theta) + \delta \right] (T_0 - T_\infty)$ <p style="text-align: center;">Équation 48</p>

Ainsi, une formulation du flux de chaleur en tout point x de la surface de la plaque plane est proposée dans les deux cas étudiés.

4.4 VALIDATION EXPÉRIMENTALE

4.4.1 PLAN D'EXPÉRIENCE

Le but de ce plan d'expériences est d'estimer en soufflerie l'énergie nécessaire pour effectuer l'antigivrage sur un profil d'aile. À cet effet, 60 expériences sont réalisées à 5 différentes vitesses de vent (10 m/s ; 15 m/s ; 20 m/s ; 25 m/s et 30 m/s), quatre températures (0 °C ; -5 °C ; -10 °C et -15 °C) et 3 plages de valeurs de teneur en eau liquide (À sec : 0 g/m³ ; 0,2 à 0,3 g/m³ et 0,9 à 1 g/m³). La température de surface du profil est fixée dans chaque expérience à 5 °C et l'angle d'attaque à 0 degré. Chaque expérience se déroule selon la démarche suivante :

1. Nettoyage du montage et de l'intérieur de la soufflerie ;
2. Démarrage de l'ordinateur de contrôle et mise en marche du compresseur en choisissant une consigne de vitesse ;
3. Réglage de la consigne de température désirée à l'intérieur de la soufflerie ;
4. Réglage de la pression d'eau à 80 psi et ouverture des rotamètres à une valeur de 20 mm ;
5. Vérification de la stabilisation de la température ambiante, de la température à la surface du profil (doit être sensiblement égale à température ambiante) et de la vitesse de l'écoulement. L'écoulement est jugé stable lorsqu'après 15 minutes les variations de température ne dépassent pas 1 °C et les variations de vitesse ne dépassent pas 1 m/s ;
6. Allumage des sources de courant et réglage manuel afin d'obtenir une température de surface de 5 °C sur la plaque ;
7. Vérification de la stabilisation de la température de surface ;
8. Réglage des rotamètres aux valeurs requises pour avoir la teneur en eau désirée et ouverture des gicleurs ;

9. Réglage manuel des sources afin de maintenir la surface à 5 °C ;

10. Stabilisation de la température de surface et lecture des mesures de tension aux bornes de chaque résistance.

À la fin de chaque essai :

- Les gicleurs sont fermés ;
- Les sources sont éteintes ;
- Les rotamètres sont remis à 20 mm ;
- Le profil est refroidi jusqu'à la température ambiante ;
- Et les étapes 1 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 sont recommencées.

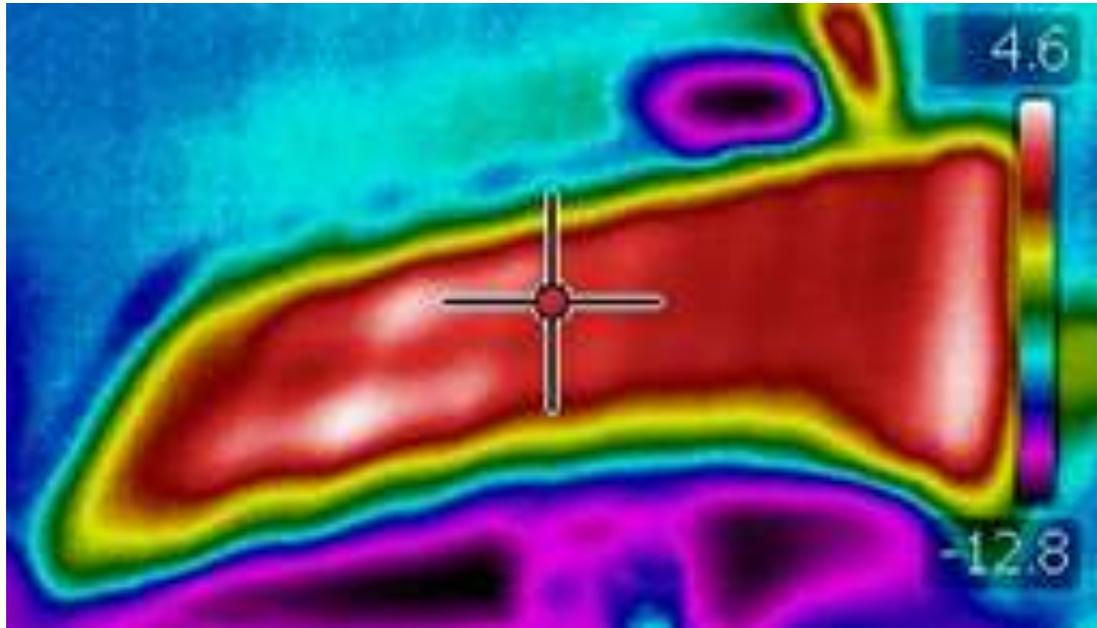


Figure 25: Extradados du profil expérimental NACA 0012 uniformément chauffé à 5 °C.

La dernière étape (10) de stabilisation consiste à s'assurer que sur une période d'approximativement 5 minutes, sans modifications des réglages des sources de chaleurs, la température à la surface du profil est uniforme (Figure 25) et qu'aucune glace n'est accumulée. La stabilisation est parfois difficile à réaliser parce que les températures de surface au niveau des sources oscillent significativement pour des teneurs en eau élevées et des températures ambiantes très faibles. De plus, dans ces cas, une couche de glace apparaît sur les bords du profil ainsi que la formation de cornes partant de l'intrados du profil car celui-ci n'est pas

chauffé. Un test de répétabilité a été effectué pour un échantillon d'expériences en répétant cinq fois chacune de ces expériences.

4.4.2 RÉPÉTABILITÉ

Afin de vérifier la répétabilité de nos expériences et de quantifier l'erreur des mesures effectuées, les expériences suivantes sont répétées cinq fois :

- Essai A : vitesse de 15 m/s ; température ambiante de -10 °C et teneur en eau liquide de 0 g/m³.
- Essai B : vitesse de 10 m/s ; température ambiante de -10 °C et teneur en eau liquide de 0,32 g/m³.
- Essai C : vitesse de 30 m/s ; température ambiante de -15 °C et teneur en eau liquide de 0,9 g/m³.

Ces tests ont été étalés sur cinq jours successifs. Les valeurs de tension mesurées aux bornes de chaque résistance sont regroupées dans les tableaux ci-dessous (les résistances sont nommées « élément (Elt) » dans les tableaux).

Tableau 8: Valeurs moyennes de température de chaque résistance pour les tests de répétabilité de l'Essai A.

	Température de surface (°C)				
	Test A1	Test A2	Test A3	Test A4	Test A5
Elt 1	5	5,2	5,1	5,1	5
Elt 2	5,1	5,2	5,1	5	5
Elt 3	5,1	5	5,1	5	4,9
Elt 4	4,9	5	5	5,1	5
Elt 5	5,1	5,1	5	5,1	5
Elt 6	4,8	5,2	5,1	5	5,1
Elt 7	5,3	5,3	5,1	5,2	5,1
Elt 8	5	5	5,1	5,2	4,9
Elt 9	5,3	5,1	5,2	5,1	5
Elt 10	5,2	5	5,2	5,1	5

Tableau 9: Valeurs moyennes de tensions aux bornes de chaque résistance pour les tests de répétabilité de l'Essai A.

	Tension de la source (V)				
	Test A1	Test A2	Test A3	Test A4	Test A5
Elt 1	39,7	39,6	40,5	41,4	40,9
Elt 2	22,4	21,4	21,9	22,1	21,9
Elt 3	22,2	21,9	20,8	21	20,6
Elt 4	22,6	22	21,2	21,9	21,2
Elt 5	27,8	23,6	23,4	24,1	22,8
Elt 6	29,8	27,6	29,7	30,7	29,4
Elt 7	30,1	27,9	32,1	33,4	33,8
Elt 8	28	26,4	28,6	29,6	32
Elt 9	28,3	26,7	29,7	30,2	28,1
Elt 10	29,9	29,8	31,4	32,1	32,8

Tableau 10: Valeurs moyennes de températures de chaque résistance pour les tests de répétabilité de l'Essai B.

	Température de surface (°C)				
	Test B1	Test B2	Test B3	Test B4	Test B5
Elt 1	5	5,1	4,9	5,2	5,1
Elt 2	5	5,2	5,1	4,8	5,2
Elt 3	5	5,2	5,1	5	5,1
Elt 4	5,1	5,2	4,9	5	5,3
Elt 5	5,1	4,9	4,9	5,2	5,2
Elt 6	5,2	5,2	4,8	5,3	5
Elt 7	5,2	5,3	4,9	5,2	5,1
Elt 8	4,9	5,2	4,8	5,2	4,9
Elt 9	5	5,4	5,3	5,2	5,3
Elt 10	5,1	5,1	4,8	5,1	4,9

Tableau 11: Valeurs moyennes de tensions aux bornes de chaque résistance pour les tests de répétabilité de l'Essai B.

	Tension de la source (V)				
	Test B1	Test B2	Test B3	Test B4	Test B5
Elt 1	46,1	45	45	47	46,9
Elt 2	19	21,5	19,2	20,5	21
Elt 3	20,9	20,1	21,2	20,8	21
Elt 4	18,2	19,7	19,9	20	20,7
Elt 5	20,2	21	20,9	20,4	21,1
Elt 6	22,5	21,8	23,6	23,7	24,1
Elt 7	26,1	24,1	25,2	25,3	25
Elt 8	23,2	25	24,4	24,4	24,6
Elt 9	24,6	24,2	25,1	24,1	25
Elt 10	23,5	24,3	23,6	23,1	23,3

Tableau 12: Valeurs moyennes de températures de chaque résistance pour les tests de répétabilité de l'Essai C.

	Température de surface (°C)				
	Test C1	Test C2	Test C3	Test C4	Test C5
Elt 1	5,2	5	5,1	4,9	5
Elt 2	5,1	5,1	5,3	5,2	5,1
Elt 3	5,2	4,9	5,2	5,1	5
Elt 4	5,4	4,8	5,2	5,1	4,9
Elt 5	5,5	5	5,4	5,1	5,1
Elt 6	5,4	4,8	5,2	5,1	4,9
Elt 7	5,3	4,9	5,4	5,2	4,8
Elt 8	5,4	5	5	5,3	4,9
Elt 9	5,4	5	5,3	5	5
Elt 10	5,3	5,1	5,3	4,9	4,9

Tableau 13: Valeurs moyennes de tensions aux bornes de chaque résistance pour les tests de répétabilité de l'Essai C.

	Tension de la source (V)				
	Test C1	Test C2	Test C3	Test C4	Test C5
Elt 1	77,6	77,9	74,4	75,4	79,2
Elt 2	54,8	55,2	57,1	55	53,2
Elt 3	50,2	50	48,4	52,5	50,4
Elt 4	45,8	43,4	44,3	46,8	47,6
Elt 5	44	43,6	46,8	43,2	45
Elt 6	42,1	41,2	42	43,6	42,5
Elt 7	40,8	40	42,9	39,5	38
Elt 8	39,9	39,1	38,9	41,2	39,4
Elt 9	39,7	39,2	40,9	38,5	40,2
Elt 10	38,8	37,8	39,7	37,5	40,2

Les tableaux 8 à 13 répertorient les températures et les tensions moyennes aux bornes de chaque résistante pour 5 tests de répétabilités réalisés pour les essais A, B et C. Ces résultats peuvent être regroupés en un tableau unique (Tableau 14) qui indiquera pour chacun des essais A, B et C :

- La valeur moyenne de la température sur chaque élément,
- L'écart maximal entre les températures mesurées et la température moyenne sur chaque élément (étendue de la température par élément),
- La valeur moyenne de la tension sur chaque élément,
- L'écart maximal entre les tensions mesurées et la moyenne de la tension sur chaque élément (étendue de la tension par élément).

Tableau 14: Récapitulatif des tests d'antigivrage.

	Test A				Test B				Test C			
	Tmoy	ΔT	Umoy	ΔU	Tmoy	ΔT	Umoy	ΔU	Tmoy	ΔT	Umoy	ΔU
Elt 1	5,08	0,06	40,42	0,62	5,06	0,09	46	0,80	5,04	0,09	76,9	1,60
Elt 2	5,08	0,06	21,94	0,25	5,06	0,13	20,24	0,91	5,16	0,07	55,06	0,87
Elt 3	5,02	0,06	21,3	0,60	5,08	0,06	20,8	0,28	5,08	0,10	50,3	0,92
Elt 4	5,00	0,04	21,78	0,46	5,10	0,12	19,7	0,60	5,08	0,18	45,58	1,38
Elt 5	5,06	0,05	24,34	1,38	5,06	0,13	20,72	0,34	5,22	0,18	44,52	1,10
Elt 6	5,04	0,11	29,44	0,75	5,10	0,16	23,14	0,79	5,08	0,18	42,28	0,62
Elt 7	5,20	0,08	31,46	1,97	5,14	0,11	25,14	0,47	5,12	0,22	40,24	1,29
Elt 8	5,04	0,09	28,92	1,50	5,00	0,16	24,32	0,45	5,12	0,18	39,7	0,68
Elt 9	5,14	0,09	28,6	1,08	5,24	0,11	24,6	0,36	5,14	0,17	39,7	0,68
Elt 10	5,10	0,08	31,2	1,08	5,00	0,12	23,56	0,31	5,10	0,16	38,8	0,92

Les valeurs en surbrillance dans le tableau ci-dessus sont les valeurs pour lesquelles l'erreur $\frac{\Delta U}{U}$ est maximale.

L'expression du flux est obtenue par la formule :

$$Q = \frac{U^2}{R_e} \quad \text{Équation 49}$$

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\Delta Q}{Q} \right\rangle &= 2 \left\langle \frac{\Delta U}{U} \right\rangle + \left\langle \frac{\Delta R_e}{R_e} \right\rangle \\ &= 2 \left(\frac{0,91}{20,24} \right) + 0,8 \% \\ &= 9,79 \% \end{aligned} \quad \text{Équation 50}$$

4.4.3 CALCUL THÉORIQUE DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Comme déterminé précédemment, le flux de chaleur nécessaire pour maintenir un point quelconque d'une plaque plane à une température donnée peut s'écrire :

- En mode laminaire :

Cf. Équation 36
$$\dot{q}_{wet,l} = 0,332(1 - \gamma + \theta)kaPr^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{1}{x}\right)^{\frac{1}{2}} + \delta ka$$

La vitesse étant constante tout le long de la surface, la valeur moyenne du flux pour une surface de largeur c (équivalent de la longueur de l'extrados sur un profil) équivaut à :

$$\begin{aligned}\dot{q}_{wet,l,moy} &= \frac{1}{c} \int_0^c \dot{q}_{wet,l} dx \\ &= 0,664(1 - \gamma \\ &\quad + \theta) \frac{kaPr^{\frac{1}{3}}}{c} \sqrt{\frac{\rho V_{\infty}}{\mu}} c + \delta ka\end{aligned}\quad \text{Équation 51}$$

- Et en mode turbulent, par analogie :

Cf. Équation 37
$$\dot{q}_{wet,t} = 0,0287(1 - \gamma + \theta)kaPr^{0,6}\left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu}\right)^{0,8} x^{-0,2} + \delta ka$$

Et,
$$\dot{q}_{wet,t,moy} = 0,035875(1 - \gamma + \theta) \frac{kaPr^{0,6}}{c} \left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu} c\right)^{0,8} + \delta ka \quad \text{Équation 52}$$

Dans les calculs, le coefficient de collection est pris comme la moyenne sur l'extrados des coefficients de collection locaux pour un profil NACA 00012 (Figure 26). Ces variations des coefficients de collection locaux le long de l'extrados (Tableau 15) ont été déduites des graphiques de Da Silveria (Da Silveira, et al., 2003) qui les a obtenus par simulation numérique avec le logiciel LEWICE.

Tableau 15: Distribution de l'efficacité de collection pour un profil NACA 0012 par le logiciel LEWICE (Approche Lagrangienne) (Da Silveira, et al., 2003)

	Position S (m)	Efficacité E
1	-0,06	0,01
2	-0,04	0,02
3	-0,03	0,05
4	-0,03	0,09
5	-0,02	0,17
6	-0,02	0,25
7	-0,01	0,35
8	-0,01	0,44
9	0,00	0,49
10	0,00	0,51
11	0,00	0,49
12	0,01	0,44
13	0,01	0,35
14	0,01	0,25
15	0,02	0,15
16	0,03	0,09
17	0,04	0,04
18	0,04	0,01
19	0,06	0,00

L'efficacité moyenne sur l'extrados est donnée par :

$$E_{moy} = \frac{\sum_{i=10}^{19} E_i}{10} = 0,234 \quad \text{Équation 53}$$

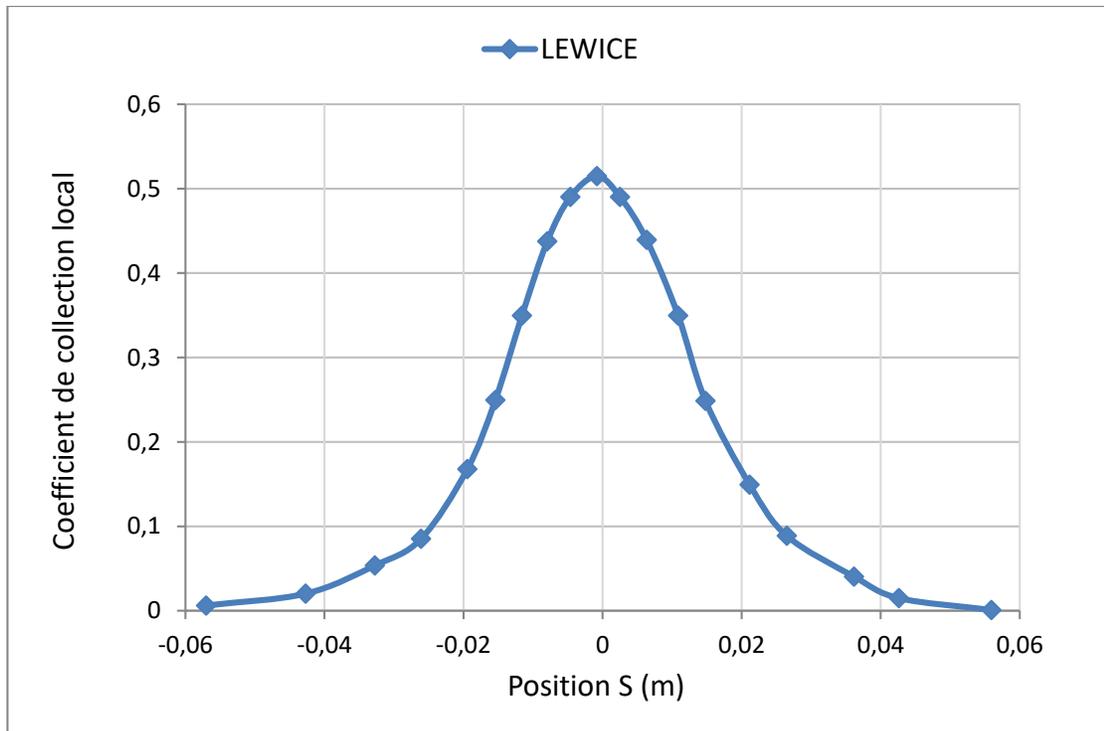


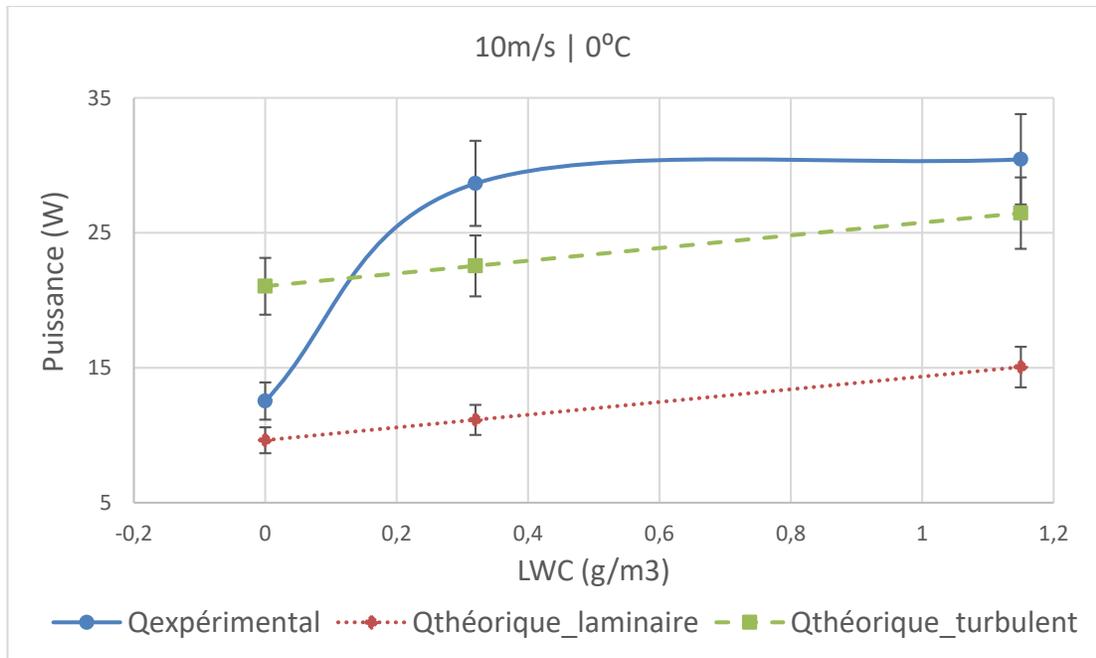
Figure 26: Efficacité de collection pour un profil NACA 0012 (Da Silveira, et al., 2003)

4.4.4 VALIDATION DU MODÈLE ANALYTIQUE

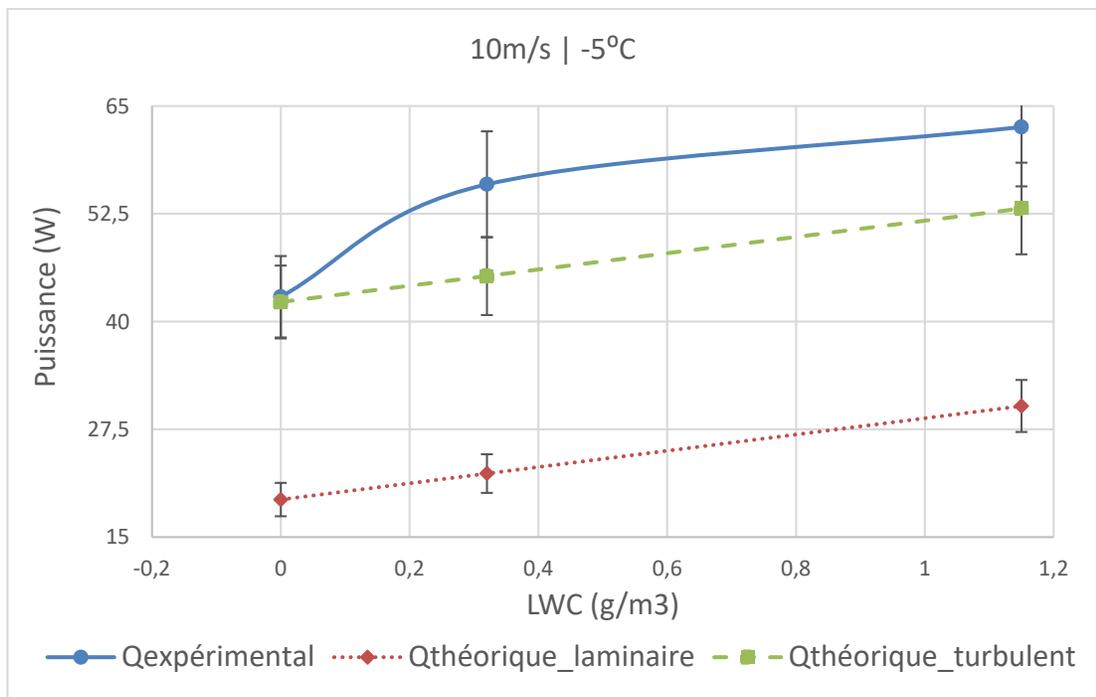
Le modèle analytique présenté ci-dessus sera appliqué aux conditions des expériences effectuées en soufflerie ; ce paragraphe comparera les résultats expérimentaux, la théorie laminaire et la théorie turbulente. Les graphiques représentent la puissance totale requise pour effectuer l'antigivrage en fonction de la teneur en eau liquide. L'intervalle de températures étudiée (-15°C à 0°C) a été étudiée car elle est celle dans laquelle les pertes dues aux givrages dans les parcs éoliens sont maximales (Parent & Ilinca, 2011).

4.4.4.1 ESSAIS À 10 M/S

La Figure 27 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 10 m/s et 0°C.



La Figure 28 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 10 m/s et -5°C.



La Figure 30 représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 10 m/s et -10°C.

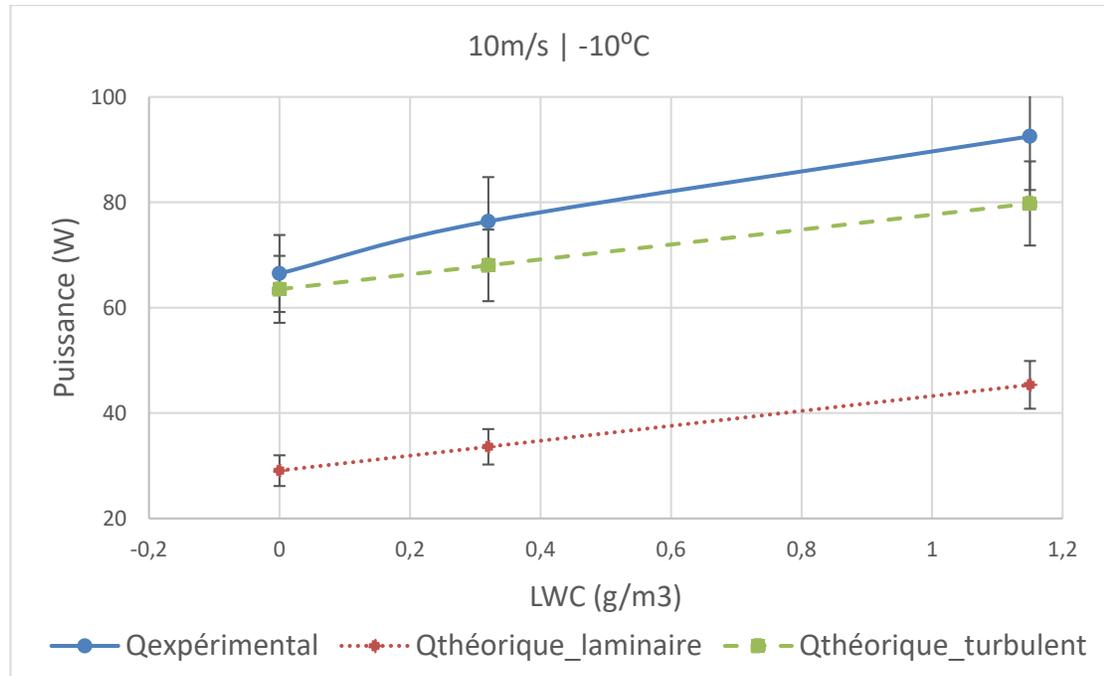


Figure 29: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 10 m/s et -10 °C.

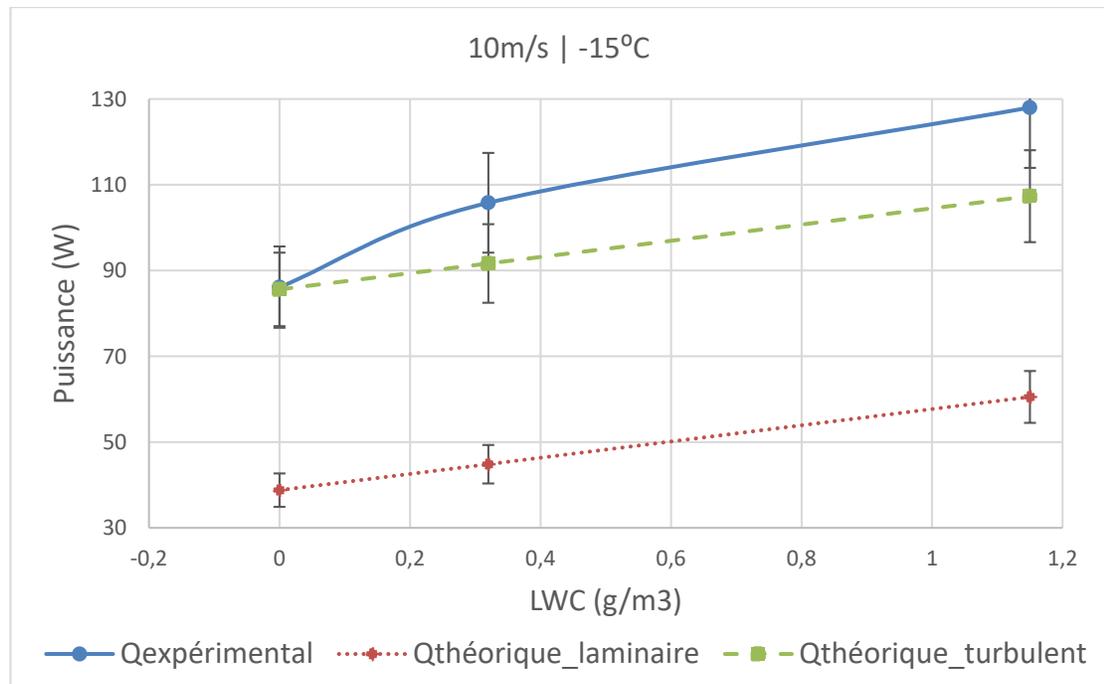


Figure 30: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 10 m/s et -15 °C.

La Figure 31 ci-dessus représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 10 m/s et -15°C.

4.4.4.2 ESSAIS À 15 M/S

La Figure 31 représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 15 m/s et 0°C.

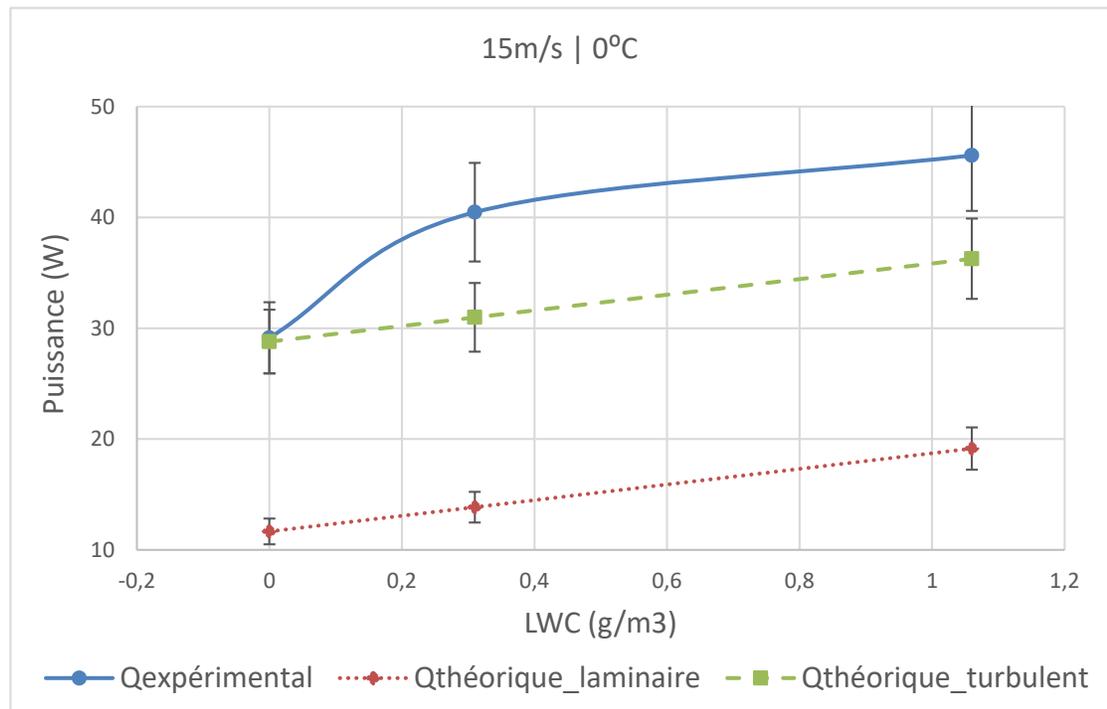


Figure 31: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 15 m/s et 0 °C.

La Figure 33 représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 15 m/s et -5°C.

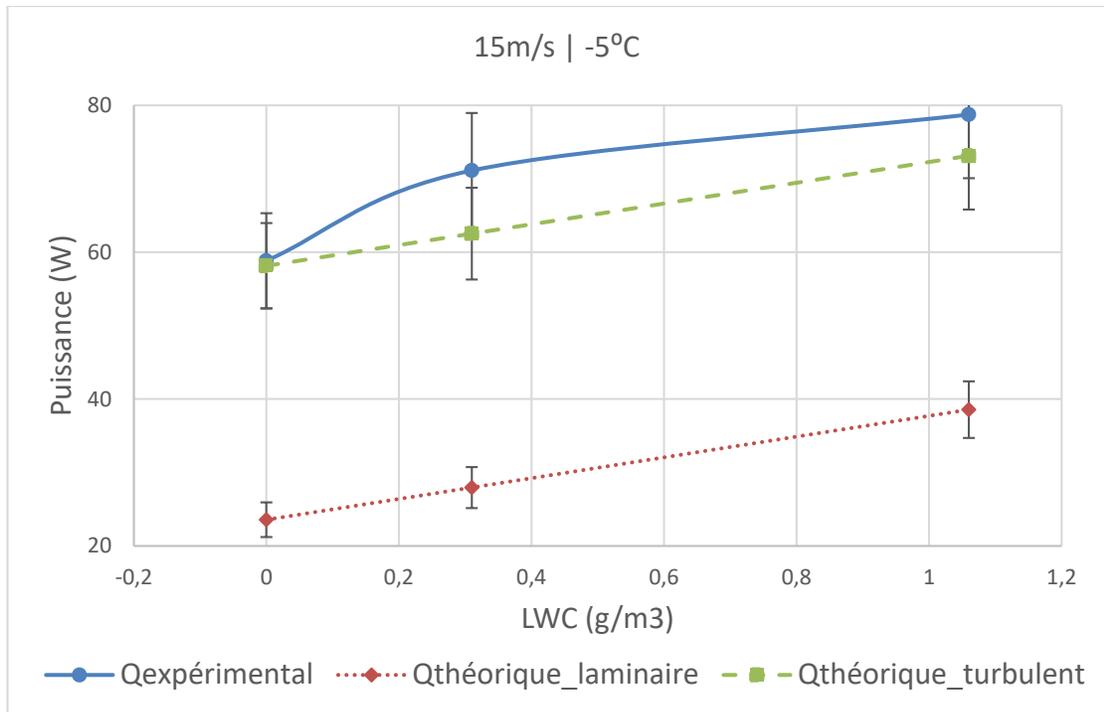


Figure 32: Comparisons entre résultats théoriques et expérimental à 15 m/s et -5 °C.

La Figure 34 représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 15 m/s et -10°C.

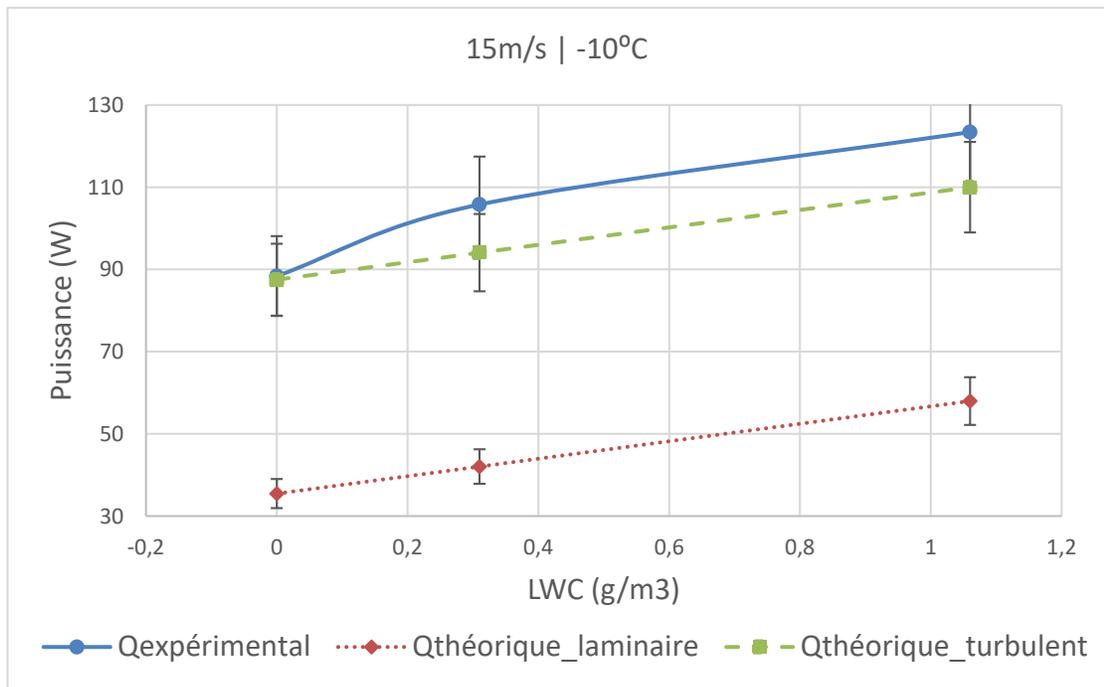


Figure 33: Comparisons entre résultats théoriques et expérimental à 15 m/s et -10 °C.

La Figure 35 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 15 m/s et -15°C.

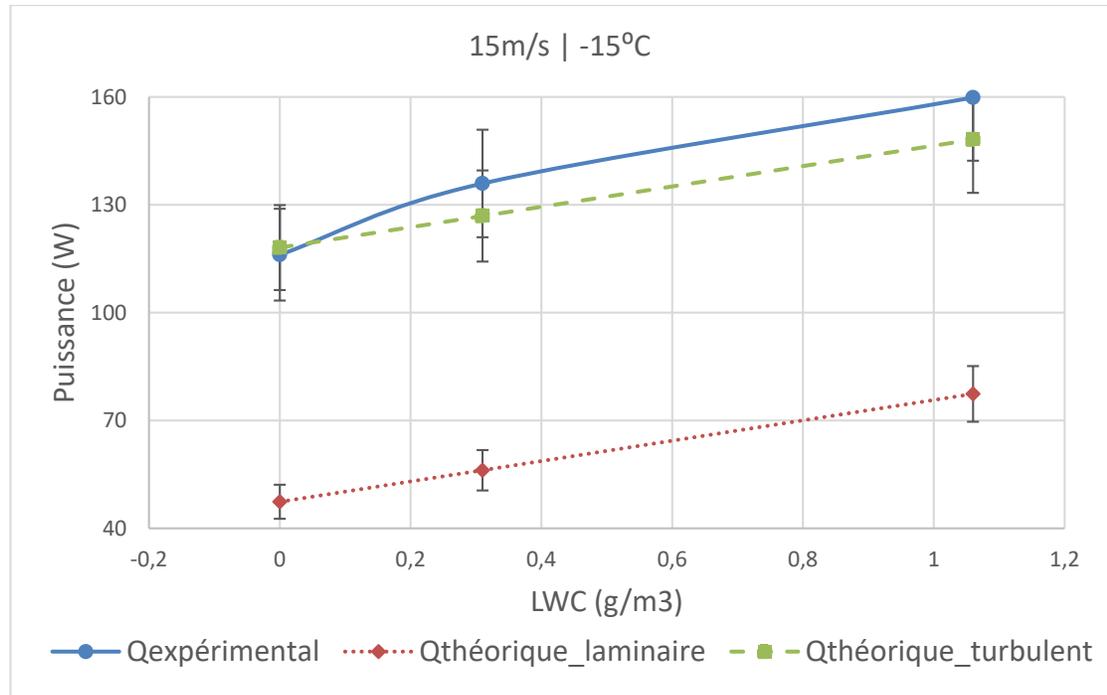


Figure 34: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 15 m/s et -15 °C.

4.4.4.3 ESSAIS À 20 M/S

La Figure 36 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 20 m/s et 0°C.

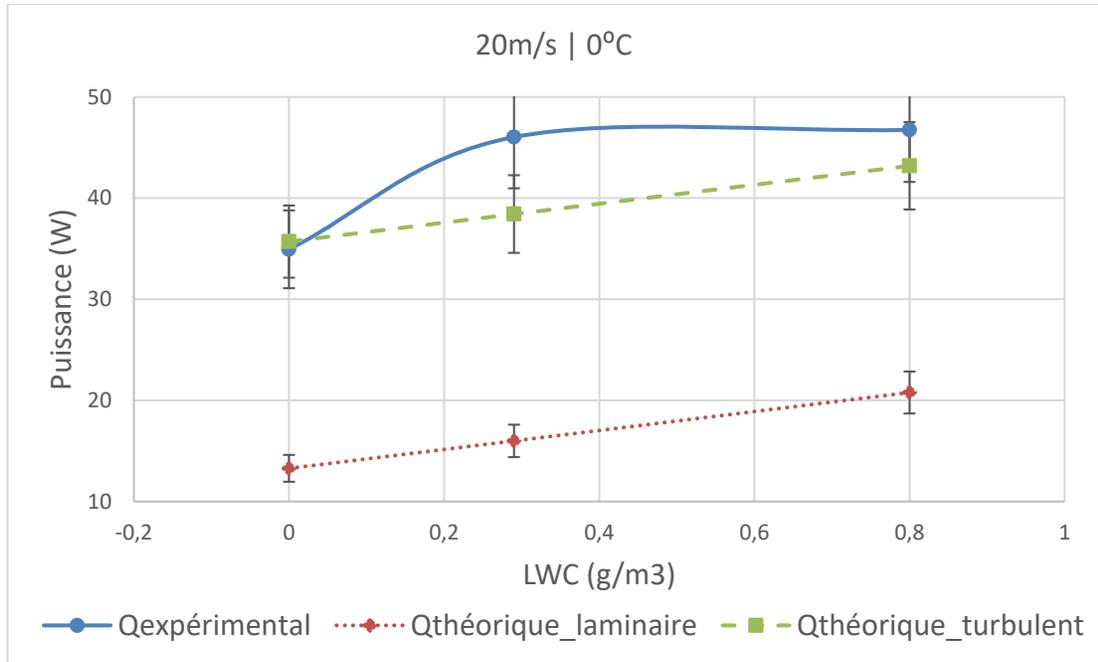


Figure 35: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 20 m/s et 0 °C.

La Figure 37 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 20 m/s et -5°C.

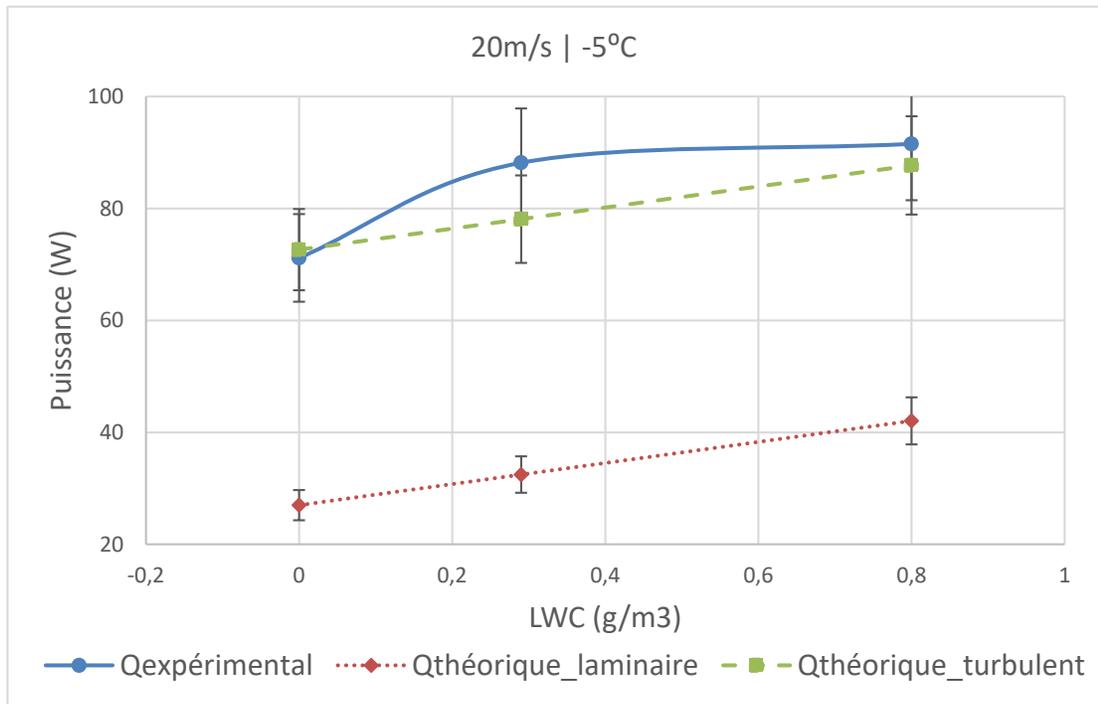


Figure 36: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 20 m/s et -5 °C.

La Figure 38 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 20 m/s et -10°C.

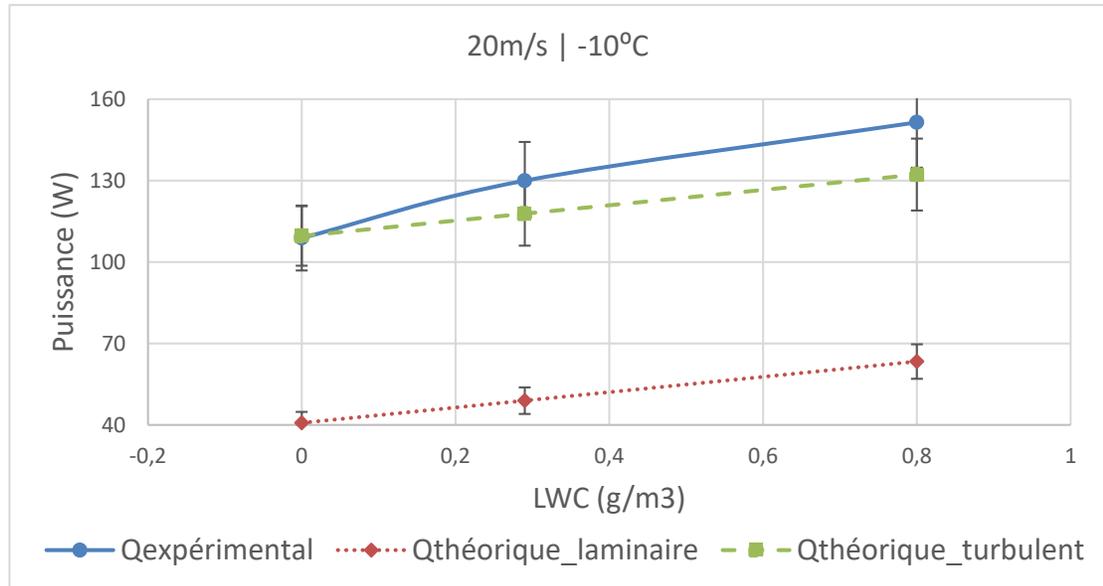


Figure 37: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 20 m/s et -10 °C.

La Figure 39 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 20 m/s et -15°C.

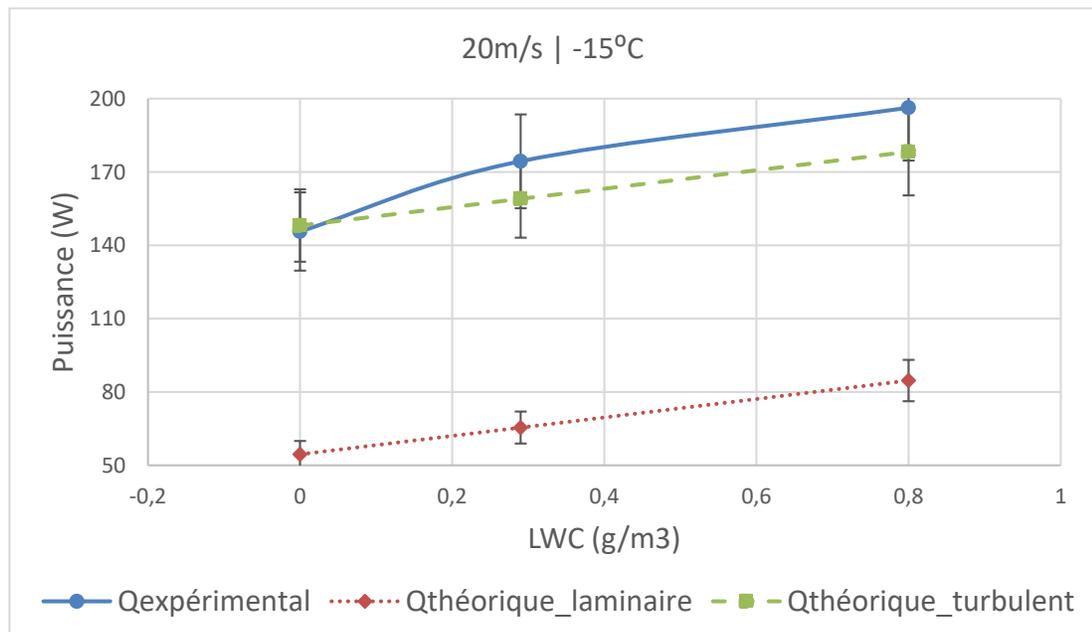


Figure 38: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 20 m/s et -15 °C.

4.4.4.4 ESSAIS À 25 M/S

La Figure 40 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 25 m/s et 0°C.

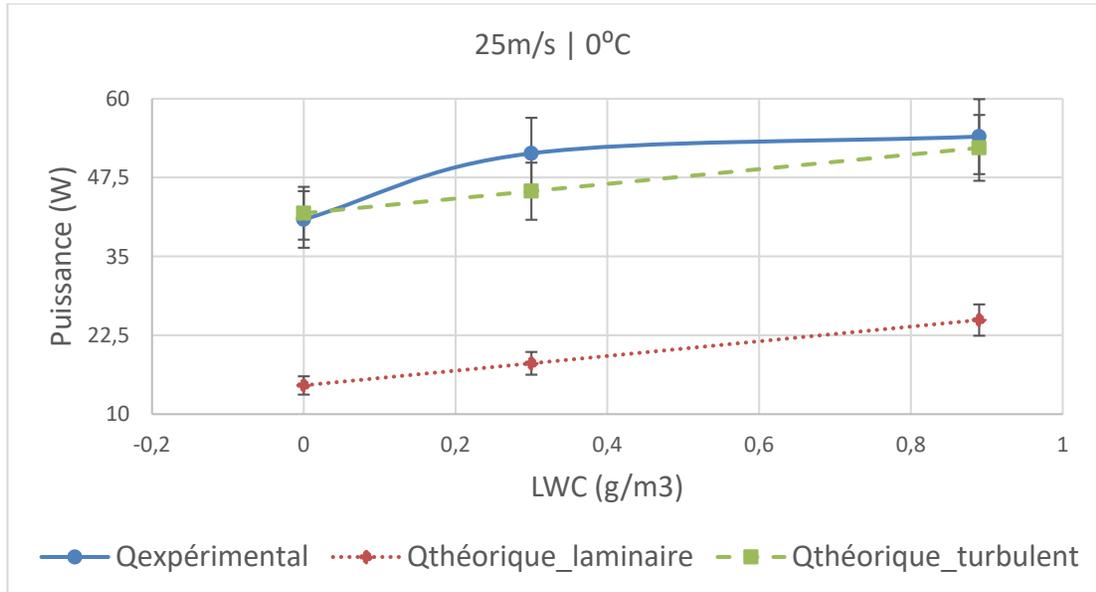


Figure 39: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 25 m/s et 0 °C.

La Figure 41 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 25 m/s et -5°C.

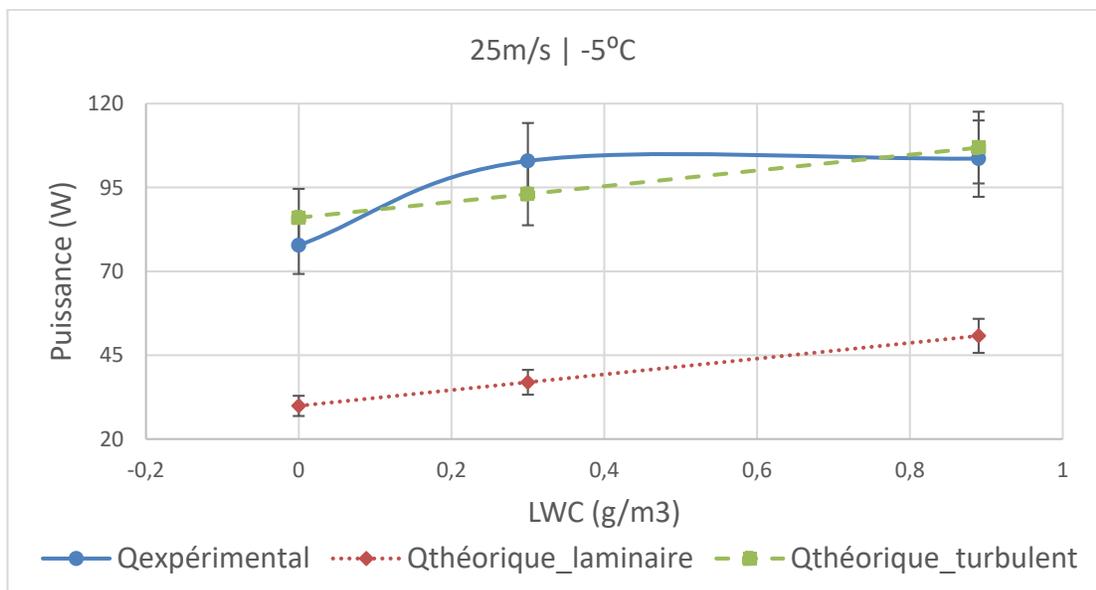


Figure 40: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 25 m/s et -5 °C.

La Figure 42 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 25 m/s et -10°C.

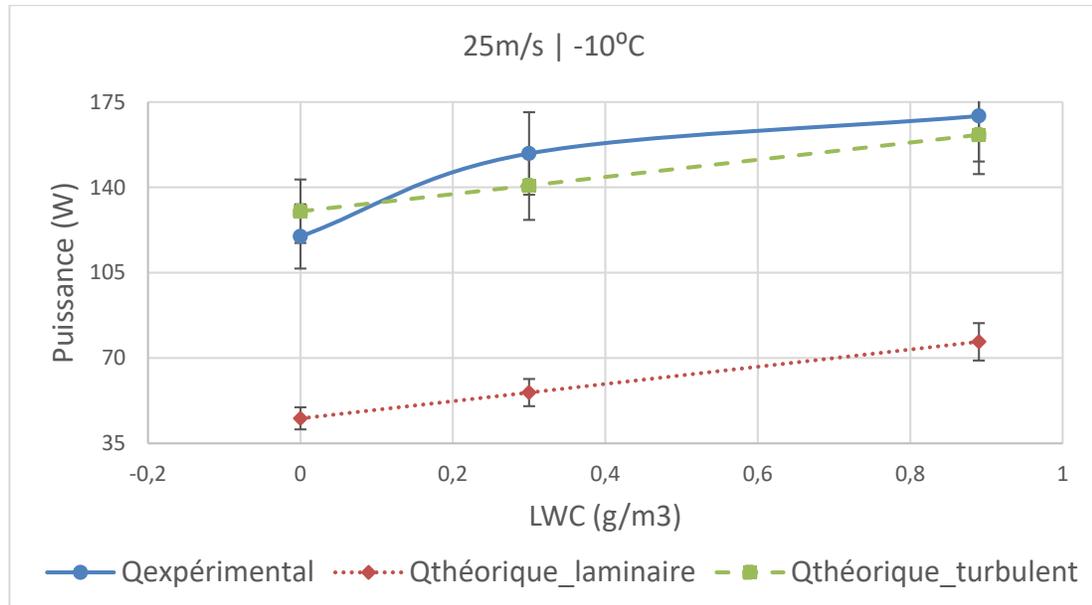


Figure 41: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 25 m/s et -10 °C.

La Figure 43 ci-dessous représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 25 m/s et -15°C.

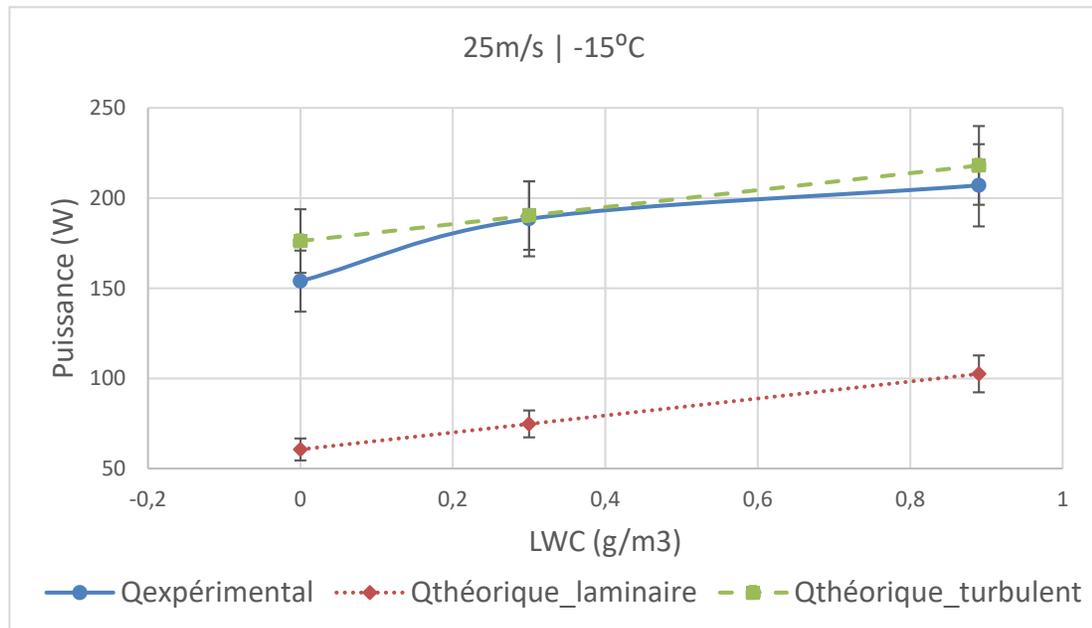


Figure 42: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 25 m/s et -15 °C.

4.4.4.5 ESSAIS À 30 M/S

La Figure 44 ci-dessus représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 30 m/s et 0°C.

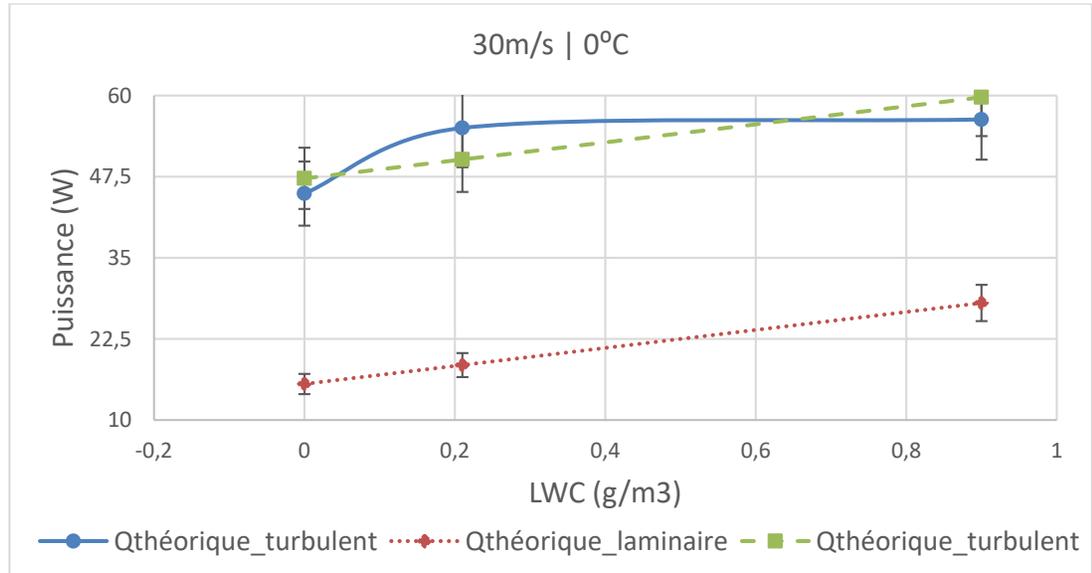


Figure 43: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 30 m/s et 0 °C.

La Figure 45 ci-dessus représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 30 m/s et -5°C.

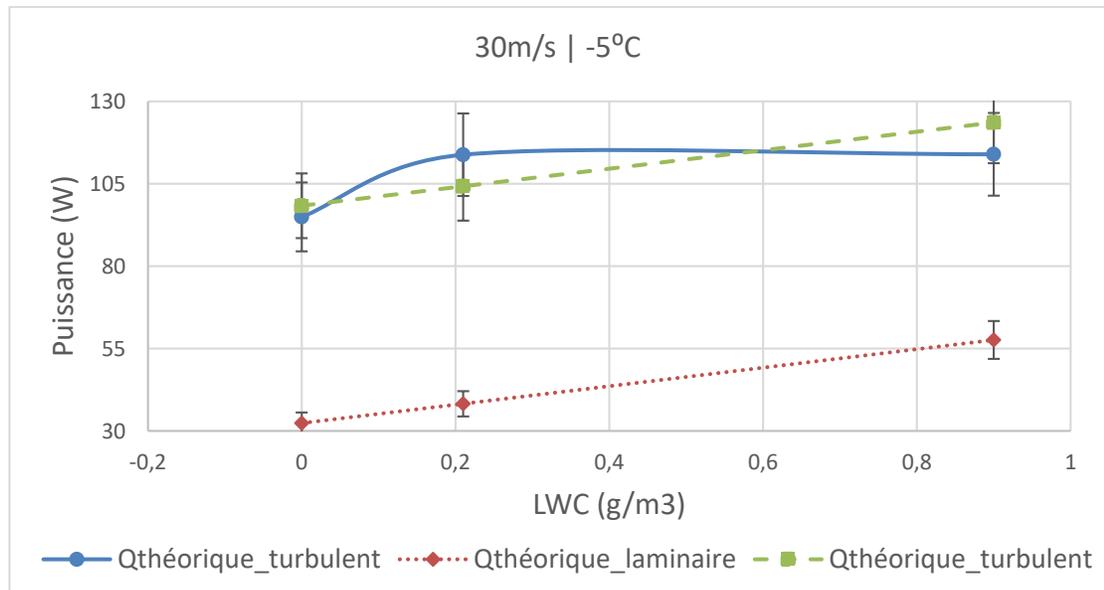


Figure 44: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 30 m/s et -5 °C.

La Figure 46 ci-dessus représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 30 m/s et -10°C.

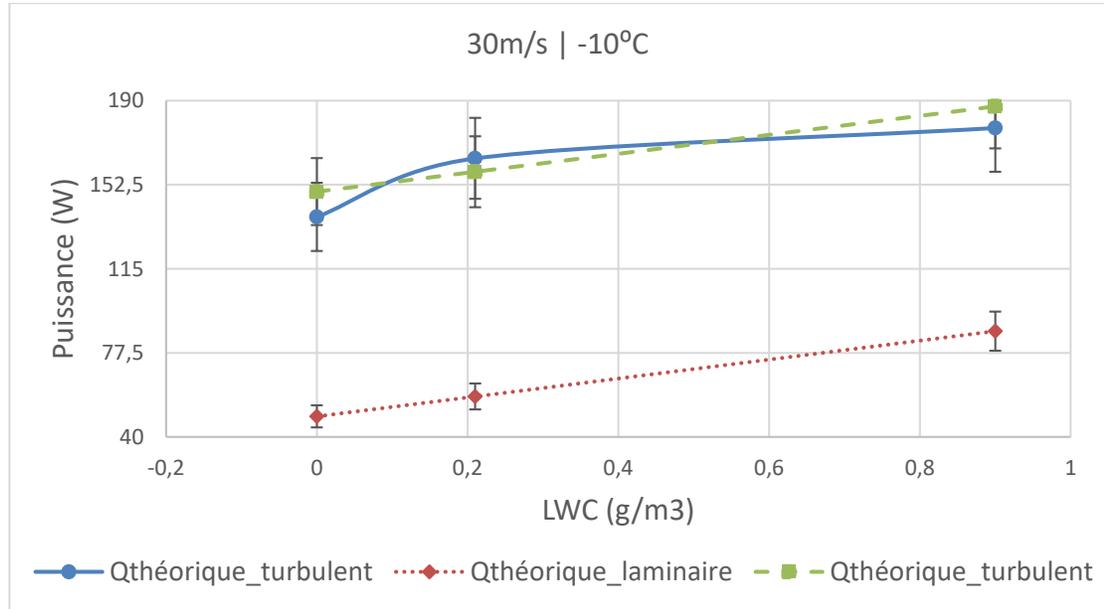


Figure 45: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 30 m/s et -10 °C.

La Figure 46 ci-dessus représente la comparaison entre les résultats théoriques (laminaire et turbulent) et expérimental à 30 m/s et -15°C.

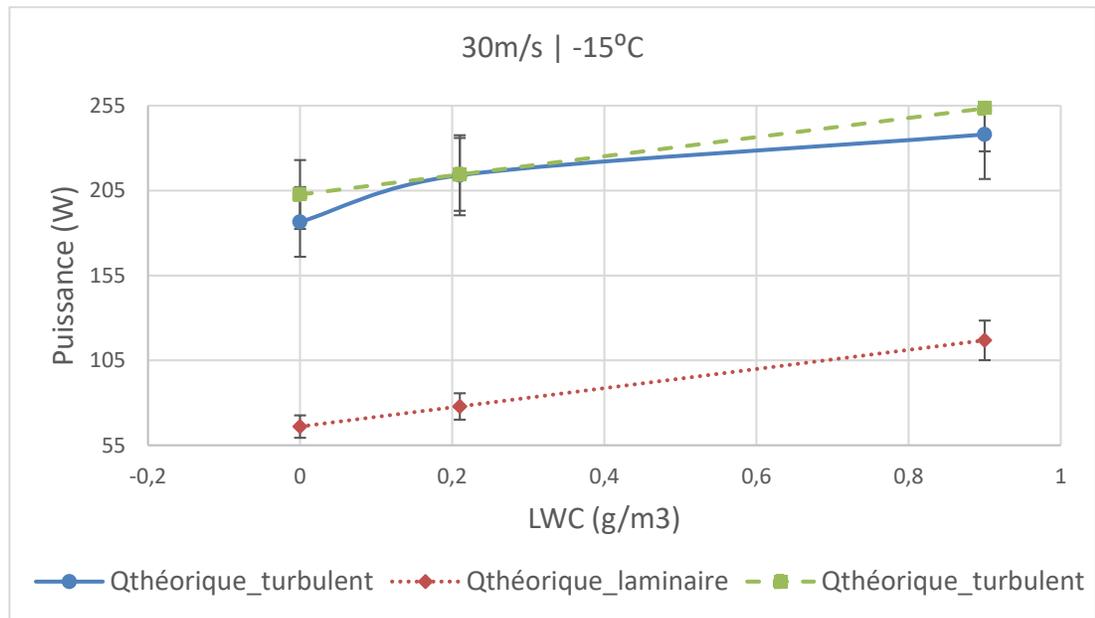


Figure 46: Comparaisons entre résultats théoriques et expérimental à 30 m/s et -15 °C.

4.4.4.6 CONCLUSION

Les graphiques précédents montrent que le modèle théorique en régime turbulent est celui qui s'approche le mieux des résultats expérimentaux mesurés. Les erreurs absolues moyennées calculées sont inscrites dans le tableau suivant :

Tableau 16: Récapitulatif des erreurs absolues moyennées.

	Théorie laminaire	Théorie turbulente
10 m/s	53 %	14 %
15 m/s	58 %	9 %
20 m/s	61 %	7 %
25 m/s	59 %	7 %
30 m/s	60 %	6 %

De plus, dans le cas 10 m/s, en retirant le premier test (0 °C à sec) qui semble ne pas suivre la même tendance que le reste des résultats, l'erreur pour le cas turbulent tombe à 12 %. Ces résultats tendent à prouver que l'écoulement dans la soufflerie est turbulent même pour des nombres de Reynolds en dessous de 500 000 (limite de transition sur une plaque plane).

4.4.5 COMPARAISON À DES ÉTUDES ANTÉRIEURES : EXPÉRIENCES SANS PRÉCIPITATION À TEMPÉRATURE DE SURFACE CONSTANTE

Très peu d'études ont été effectuées en ce qui concerne l'antigivrage par bandes chauffantes :

- Parce que ce cas ne s'applique pas au domaine de l'aéronautique d'où provienne la majorité des recherches sur la mitigation du givrage (c'est plutôt l'air chaud qui est largement utilisé en aéronautique) ;
- Et également parce que les premières observations tendent à prouver que c'est une technique énergivore ; ce qui fait douter de sa rentabilité dans les parcs éoliens.

Néanmoins, une comparaison qui consistait dans le cas des expériences à sec à tracer les variations du flux d'énergie nécessaire pour maintenir la surface du profil à 5 °C en fonction de la vitesse de l'écoulement, puis à trouver les courbes de tendances sous forme de fonction puissance et en conclure selon la littérature si le régime est laminaire (exposant égal à 0,5) ou turbulent (exposant égal à 0,8) a pu être effectuée (Figure 47). Les courbes de tendances suivantes ont été obtenues :

Tableau 17: Récapitulatif des courbes de tendances de la puissance de maintien de la surface à 5 °C en fonction de la vitesse pour les températures de 0 °C, -5 °C, -10 °C et -15 °C.

Température	Équation	R ²
0 °C	$Q = 1,1244 \cdot V^{1,12}$	0,905
0 °C (4 points)	$Q = 5,2598 \cdot V^{0,6329}$	0,998
-5 °C	$Q = 8,8403 \cdot V^{0,6911}$	0,989
-10 °C	$Q = 14,828 \cdot V^{0,6564}$	0,996
-15 °C	$Q = 18,311 \cdot V^{0,6782}$	0,985

La courbe de tendance à 0 °C est la moins précise, mais si le premier point est retiré (10 m/s : test précédemment signalé comme hors tendance), l'équation devient $Q = 5,2598 \cdot V^{0,6329}$ avec une régression de 0,998. Les coefficients de vitesse dans les courbes de tendances sont en général plus proches de 0,8 que 0,5 ; mais ne permettent pas de conclure si le régime d'écoulement est laminaire ou turbulent. Toutefois, ces coefficients permettent de conclure que toutes ces expériences ont le même régime d'écoulement. Or, parmi celles-ci, toutes les expériences effectuées à une vitesse de vent supérieure à 15 m/s sont en régime turbulent parce que leur nombre de Reynolds est supérieur à 5×10^5 ; par conséquent, il peut être conclu que toutes les expériences se sont déroulées en régime turbulent.

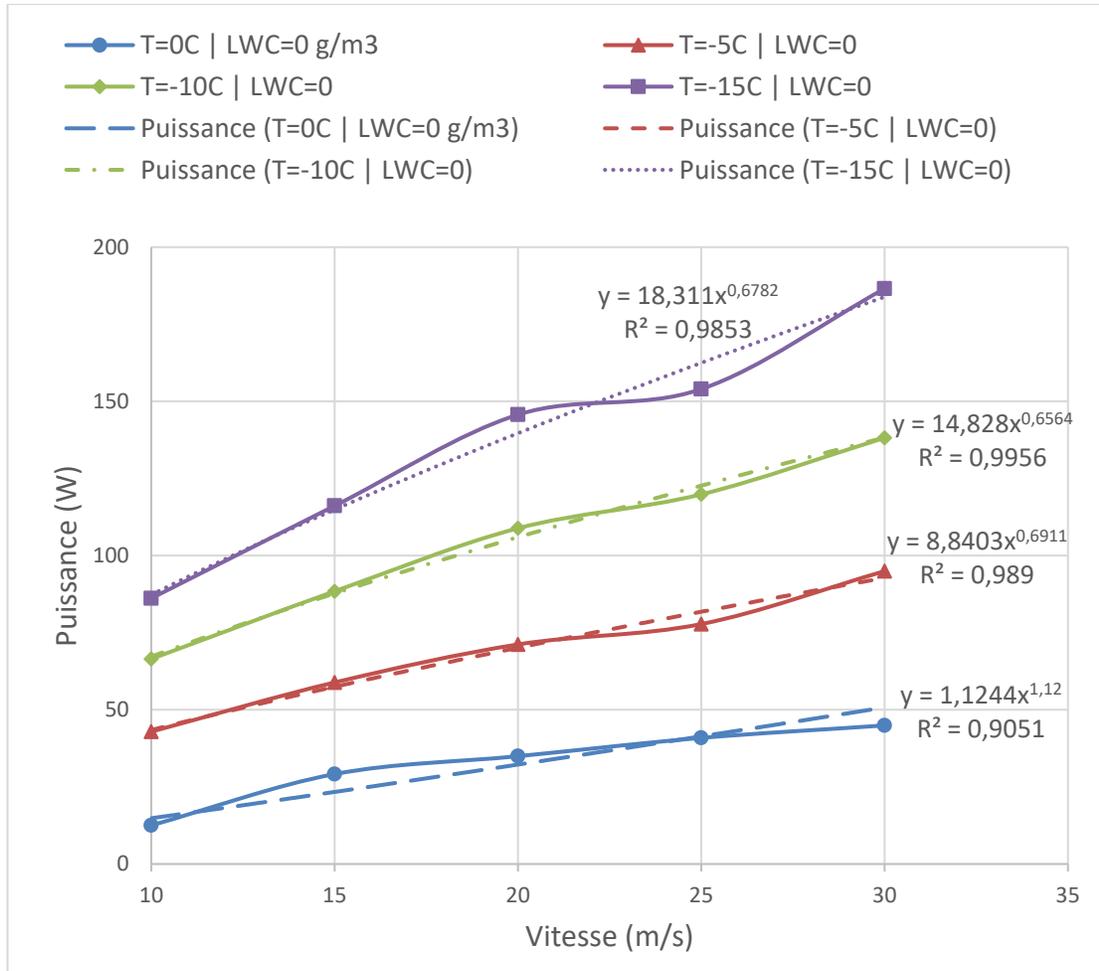


Figure 47: Puissance de maintien de la surface à 5 °C en fonction de la vitesse pour les températures de 0 °C, -5 °C, -10 °C et -15 °C.

4.5 EXTRAPOLATION À UNE ÉOLIENNE

4.5.1 CALCUL THÉORIQUE DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Contrairement à la section 3.2.3, le calcul du flux théorique moyen pour une éolienne réelle en fonctionnement doit prendre en compte la variation de la vitesse relative de l'écoulement le long de la pale. Rappelons que :

Cf. Équation 24

$$\gamma = \frac{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2}{2(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c$$

Cf. Équation 25
$$\theta = 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{2/3} \cdot p_{\infty}^0}$$

Cf. Équation 26
$$\delta = C_{p,w} \frac{LWC \cdot E_m}{k} \sqrt{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2} - \frac{LWC \cdot E_m}{k(T_s - T_{\infty})} \frac{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2}{2}$$

En remplaçant ces termes dans l'Équation 36 et l'Équation 37:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{wet,l} = & 0,332 \left(1 - \frac{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2}{2(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \right. \\ & + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{2/3} \cdot p_{\infty}^0} \left. \right) ka Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{x} \right)^{\frac{1}{2}} \\ & + \left(C_{p,w} \frac{LWC \cdot E_m}{k} \sqrt{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2} \right. \\ & \left. - \frac{LWC \cdot E_m}{k(T_s - T_{\infty})} \frac{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2}{2} \right) ka \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Équation} \\ 54 \end{array}$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_{wet,t} = & 0,0287 \left(1 - \frac{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2}{2(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \right. \\ & + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{2/3} \cdot p_{\infty}^0} \left. \right) ka Pr^{0,6} \left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu} \right)^{0,8} x^{-0,6} \\ & + \left(C_{p,w} \frac{LWC \cdot E_m}{k} \sqrt{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2} \right. \\ & \left. - \frac{LWC \cdot E_m}{k(T_s - T_{\infty})} \frac{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2}{2} \right) ka \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Équation} \\ 55 \end{array}$$

En réarrangeant les termes:

$$\begin{aligned}
\dot{q}_{wet,l} = & 0,332kaPr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu} \right)^{0.5} \left[1 - \frac{V_{\infty}^2}{2(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \right. \\
& + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_{\infty}^0} \\
& \left. - \left(\frac{\omega^2}{2(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \right) r^2 \right] x^{-0.5} + a \cdot LWC \\
& \cdot E_m \left(C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2} - \frac{(r\omega)^2}{2(T_s - T_{\infty})} \right. \\
& \left. - \frac{V_{\infty}^2}{2(T_s - T_{\infty})} \right)
\end{aligned} \tag{Équation 56}$$

Et :

$$\begin{aligned}
\dot{q}_{wet,t} = & 0,0287kaPr^{0.6} \left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu} \right)^{0.8} \left[1 - \frac{V_{\infty}^2}{2(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \right. \\
& + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_{\infty}^0} \\
& \left. - \left(\frac{\omega^2}{2(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \right) r^2 \right] x^{-0.2} + a \cdot LWC \\
& \cdot E_m \left(C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2} - \frac{(r\omega)^2}{2(T_s - T_{\infty})} \right. \\
& \left. - \frac{V_{\infty}^2}{2(T_s - T_{\infty})} \right)
\end{aligned} \tag{Équation 57}$$

Considérons à présent une portion élémentaire de l'extrados ou de l'intrados de la pale de forme trapézoïdale rectangle de petite base c_{i+1} (corde au rayon R_{i+1}), de grande base c_i (corde au rayon R_i) et de hauteur $R_{i+1} - R_i$. La corde x varie suivant la formule :

$$x = c_i + \frac{c_{i+1} - c_i}{R_{i+1} - R_i} (r - R_i) \tag{Équation 58}$$

- En mode laminaire, pour une section élémentaire i :

$$\begin{aligned} \dot{q}_{wet,l,i} = & 0,332kaPr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu} \right)^{0.5} \left(c_i + \frac{c_{i+1} - c_i}{R_{i+1} - R_i} (r - R_i) \right)^{-0.5} \left[1 \right. \\ & - \frac{V_{\infty}^2}{2(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_{\infty}^0} \\ & \left. - \left(\frac{\omega^2}{2(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \right) r^2 \right] + a \cdot LWC \\ & \cdot E_m \left[C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2} - \frac{1}{2(T_s - T_{\infty})} (r\omega)^2 \right. \\ & \left. - \frac{V_{\infty}^2}{2(T_s - T_{\infty})} \right] \end{aligned} \quad \text{Équation 59}$$

Le flux moyen sur la section élémentaire s'exprime par :

$$\begin{aligned} \dot{q}_{wet,l,moy,i} = & \frac{1}{R_{i+1} - R_i} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \dot{q}_{wet,l} dr \\ = & \frac{1}{R_{i+1} - R_i} \left[0,332kaPr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu} \right)^{0.5} r \left(c_i \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{c_{i+1} - c_i}{R_{i+1} - R_i} (r - R_i) \right)^{-0.5} \left[1 - \frac{V_{\infty}^2}{2(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \right. \right. \\ & \left. \left. + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_{\infty}^0} - \left(\frac{\omega^2}{6(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \right) r^2 \right] \right. \\ & \left. + a \cdot LWC \right. \\ & \left. \cdot E_m r \left[C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (r\omega)^2} - \frac{1}{6(T_s - T_{\infty})} (r\omega)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{V_{\infty}^2}{2(T_s - T_{\infty})} \right] \right] \begin{matrix} R_{i+1} \\ R_i \end{matrix} \end{aligned} \quad \text{Équation 60}$$

$$\dot{q}_{wet,l,moy,i} = 0,332kaPr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu c_{i+1}} \right)^{0.5} \frac{R_{i+1}}{R_{i+1} - R_i} \left[1 - \frac{3(V_{\infty}^2) + (R_{i+1}\omega)^2}{6(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_{\infty}^0} \right] + \frac{a \cdot LWC \cdot E_m}{R_{i+1} - R_i} \left[R_{i+1} C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (R_{i+1}\omega)^2} - R_i C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (R_i\omega)^2} - \frac{(R_{i+1}^3 - R_i^3)\omega^2 + 3(R_{i+1} - R_i)V_{\infty}^2}{6(T_s - T_{\infty})} \right]$$

Équation 61

Pour obtenir la quantité de chaleur consommée dans cette section élémentaire, le flux moyen est multiplié par l'aire de surface de l'élément:

$$q_{wet,l,moy,i} = 0,332ka \frac{R_{i+1}}{2} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho V_{\infty}}{\mu c_{i+1}} \right)^{0.5} \left[1 - \frac{3(V_{\infty}^2) + (R_{i+1}\omega)^2}{6(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_{\infty}^0} (c_{i+1} + c_i) + \frac{a \cdot LWC \cdot E_m}{2} \left[R_{i+1} C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (R_{i+1}\omega)^2} - R_i C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (R_i\omega)^2} - \frac{(R_{i+1}^3 - R_i^3)\omega^2 + 3(R_{i+1} - R_i)V_{\infty}^2}{6(T_s - T_{\infty})} \right] (c_{i+1} + c_i) \right]$$

Équation 62

Finalement, la quantité de chaleur totale est la somme des quantités de chaleur élémentaires :

$$\begin{aligned}
q_{wet,l,moy} = & 0,332kaPr^{\frac{1}{3}} \sum_n \left[\frac{R_{i+1}}{2} \left(\frac{\rho V_\infty}{\mu c_{i+1}} \right)^{0.5} (c_{i+1} + c_i) \left[1 \right. \right. \\
& + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_\infty^0} - \frac{3(V_\infty^2) + (R_{i+1}\omega)^2}{6(T_s - T_\infty)C_{p,a}} r_c \left. \left. \right] \right. \\
& + \frac{a \cdot LWC \cdot E_m}{2} \sum_n \left[(c_{i+1} \right. \\
& + c_i) \left[R_{i+1}C_{p,w} \sqrt{V_\infty^2 + (R_{i+1}\omega)^2} \right. \\
& - R_iC_{p,w} \sqrt{V_\infty^2 + (R_i\omega)^2} \\
& \left. \left. - \frac{(R_{i+1}^3 - R_i^3)\omega^2 + 3(R_{i+1} - R_i)V_\infty^2}{6(T_s - T_\infty)} \right] \right]
\end{aligned}$$

Équation 63

- Par analogie, en mode turbulent :

$$\begin{aligned}
\dot{q}_{wet,t,i} = & 0,0287kaPr^{0.6} \left(\frac{\rho V_\infty}{\mu} \right)^{0.8} \left(c_i + \frac{c_{i+1} - c_i}{R_{i+1} - R_i} (r - R_i) \right)^{-0.5} \left[1 \right. \\
& - \frac{V_\infty^2}{2(T_s - T_\infty)C_{p,a}} r_c + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_\infty^0} \\
& \left. - \left(\frac{\omega^2}{2(T_s - T_\infty)C_{p,a}} r_c \right) r^2 \right] + a \cdot LWC \\
& \cdot E_m \left[C_{p,w} \sqrt{V_\infty^2 + (r\omega)^2} - \frac{(r\omega)^2}{2(T_s - T_\infty)} - \frac{V_\infty^2}{2(T_s - T_\infty)} \right]
\end{aligned}$$

Équation 64

Le flux moyen sur la section élémentaire s'exprime par :

$$\begin{aligned}
\dot{q}_{wet,t,moy,i} &= \frac{1}{R_{i+1} - R_i} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \dot{q}_{wet,t} dr \\
&= 0,0287kaPr^{0.6} \left(\frac{\rho V_\infty}{\mu} \right)^{0.8} (c_{i+1})^{-0.2} \frac{R_{i+1}}{R_{i+1} - R_i} \left[1 \right. \\
&\quad \left. - \frac{3(V_\infty^2) + (R_{i+1}\omega)^2}{6(T_s - T_\infty)C_{p,a}} r_c + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_\infty^0} \right] \\
&\quad + \frac{a \cdot LWC \cdot E_m}{R_{i+1} - R_i} \left[R_{i+1} C_{p,w} \sqrt{V_\infty^2 + (R_{i+1}\omega)^2} \right. \\
&\quad \left. - R_i C_{p,w} \sqrt{V_\infty^2 + (R_i\omega)^2} \right. \\
&\quad \left. - \frac{(R_{i+1}^3 - R_i^3)\omega^2 + 3(R_{i+1} - R_i)V_\infty^2}{6(T_s - T_\infty)} \right]
\end{aligned} \tag{Equation 65}$$

La quantité de chaleur consommée dans cette section élémentaire s'exprime par :

$$\begin{aligned}
q_{wet,t,moy,i} &= 0,0287ka \frac{R_{i+1}}{2} Pr^{0.6} \left(\frac{\rho V_\infty}{\mu} \right)^{0.8} (c_{i+1})^{-0.2} \left[1 \right. \\
&\quad \left. - \frac{3(V_\infty^2) + (R_{i+1}\omega)^2}{6(T_s - T_\infty)C_{p,a}} r_c \right. \\
&\quad \left. + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_\infty^0} \right] (c_{i+1} + c_i) \\
&\quad + \frac{aE_m LWC}{2} \left[R_{i+1} C_{p,w} \sqrt{V_\infty^2 + (R_{i+1}\omega)^2} \right. \\
&\quad \left. - R_i C_{p,w} \sqrt{V_\infty^2 + (R_i\omega)^2} \right. \\
&\quad \left. - \frac{(R_{i+1}^3 - R_i^3)\omega^2 + 3(R_{i+1} - R_i)V_\infty^2}{6(T_s - T_\infty)} \right] (c_{i+1} + c_i)
\end{aligned} \tag{Equation 66}$$

Et la quantité de chaleur totale par :

$$\begin{aligned}
 q_{wet,t,moy} = & 0,0287kaPr^{0.6} \sum_n \left[\frac{R_{i+1}}{2} \left(\frac{\rho V_\infty}{\mu} c_{i+1} \right)^{0.8} \left(\frac{c_{i+1} + c_i}{c_{i+1}} \right) \left[1 \right. \right. \\
 & + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_\infty^0} - \frac{3(V_\infty^2) + (R_{i+1}\omega)^2}{6(T_s - T_\infty)C_{p,a}} r_c \left. \left. \right] \right] \\
 & + \frac{aE_m LWC}{2} \sum_n \left[c_{i+1} \right. \\
 & + c_i \left[R_{i+1} C_{p,w} \sqrt{V_\infty^2 + (R_{i+1}\omega)^2} \right. \\
 & - R_i C_{p,w} \sqrt{V_\infty^2 + (R_i\omega)^2} \\
 & \left. \left. - \frac{(R_{i+1}^3 - R_i^3)\omega^2 + 3(R_{i+1} - R_i)V_\infty^2}{6(T_s - T_\infty)} \right] \right]
 \end{aligned}
 \tag{Équation 67}$$

4.5.2 DISCRÉTISATION DE LA PALE

Le modèle mathématique présenté au paragraphe précédent permet d'estimer la quantité d'énergie nécessaire à l'antigivrage sur une pale en rotation en discrétisant sa surface sous forme de trapèzes rectangles. Dans la réalité, les informations sur la conception des pales ne sont pas disponibles. Pour pallier ce manque d'information, une pale de référence dont les caractéristiques sont disponibles dans la littérature a servi de modèle pour estimer la surface de pale de n'importe quelle turbine en fonction de son rayon. Ce modèle de pale est la turbine de référence NREL 5MW (Jonkman, et al., 2009). La définition normalisée de la corde utilisée dans cette étude se définit comme suit :

Tableau 18: Discrétisation normalisée de la corde de la pale.

	r/R	Corde/R
-	0,00E+00	2,44E-02
Zone 1 (moyeu)	2,44E-02	2,44E-02
Zone 2	4,66E-02	5,76E-02
Zone 3	1,91E-01	7,41E-02
Zone 4	2,58E-01	7,56E-02
Zone 5	9,58E-01	3,39E-02
Zone 6	1,00E+00	2,31E-02

r représente la position le long de l'axe du rayon de la pale et R représente le rayon total de la pale. r varie donc de 0 à R .

La figure suivante représente le profil de pale obtenu lorsque la distribution normalisée décrite ci-dessus est utilisée pour représenter une pale ayant une corde d'une longueur d'un mètre.

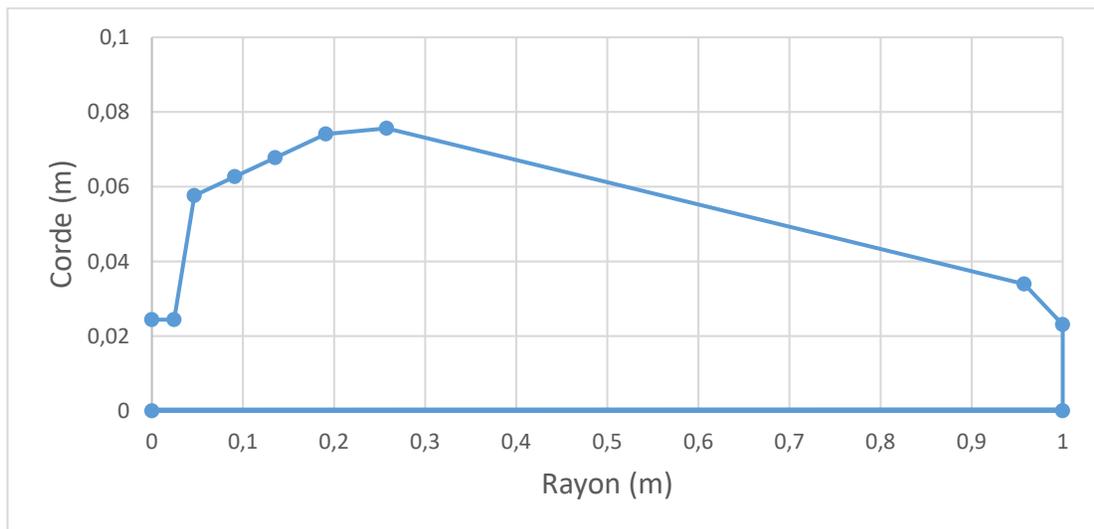


Figure 48: Distribution de la corde le long du profil d'une pale mesurant un mètre de long.

Dans la suite, les pales d'éolienne étudiées seront supposées avoir été conçues suivant ce modèle.

4.5.2 APPLICATION

4.5.2.1 ÉTUDE DE CAS : VESTAS V90-3MW

La VESTAS V90-3.0 MW est une turbine éolienne conçue pour être peu coûteuse et facile à installer. La technologie de sa boîte de vitesse a permis de réduire le poids de sa nacelle. Ses pales également sont plus légères à cause d'une combinaison optimisée de fibre de verre et de fibre de carbone. Le poids de la tour a aussi été réduit en utilisant des aimants au lieu de soudures pour rattacher certains éléments à la tour. Cette turbine offre des performances exceptionnelles et un rendement élevé, et peut être fournie dans une variété de hauteurs de moyeu (65 m à 105 m) pour répondre aux besoins spécifiques du site.

La première étape de cette étude de cas consiste à discrétiser les pales de la VESTAS V90-3.0 MW. Le rayon de pale est de 45 m. En utilisant la discrétisation proposée au paragraphe précédent, les zones ci-dessous sont obtenues :

Tableau 19: Discrétisation de la pale d'une VESTAS V90-3.0 MW.

	Théorie		Application pour R = 45 m		
	r/R	Corde/R	r (m)	Corde (m)	Aire (m ²)
-	0,00E+00	2,44E-02	0,00	1,10	
Zone 1 (moyeu)	2,44E-02	2,44E-02	1,10	1,10	1,20
Zone 2	4,66E-02	5,76E-02	2,10	2,59	1,84
Zone 3	1,91E-01	7,41E-02	8,60	3,33	19,26
Zone 4	2,58E-01	7,56E-02	11,60	3,40	10,11
Zone 5	9,58E-01	3,39E-02	43,10	1,53	77,65
Zone 6	1,00E+00	2,31E-02	45,00	1,04	2,44

La pale obtenue est représentée à la Figure 49.

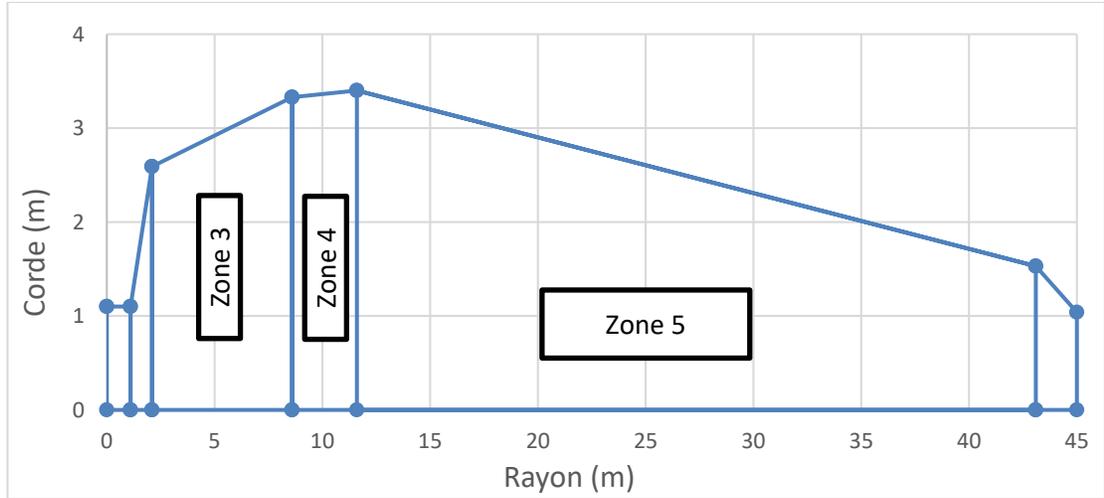


Figure 49: Représentation graphique de la discrétisation de la VESTAS V90-3.0 MW.

La deuxième étape consiste à estimer le flux de chaleur moyen dans chaque zone selon les formulations proposées en mode laminaire :

Cf. Équation
62

$$\begin{aligned}
 q_{wet,l,moy,i} = & 0,332ka \frac{R_{i+1}}{2} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{V_{\infty}}{\nu \cdot c_{i+1}} \right)^{0.5} \left[1 \right. \\
 & - \frac{3(V_{\infty}^2) + (R_{i+1}\omega)^2}{6(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \\
 & + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_{\infty}^0} \left. \right] (c_{i+1} + c_i) \\
 & + \frac{a \cdot LWC \cdot E_m}{2} \left[R_{i+1} C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (R_{i+1}\omega)^2} \right. \\
 & - R_i C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (R_i\omega)^2} \\
 & \left. - \frac{(R_{i+1}^3 - R_i^3)\omega^2 + 3(R_{i+1} - R_i)V_{\infty}^2}{6(T_s - T_{\infty})} \right] (c_{i+1} \\
 & + c_i)
 \end{aligned}$$

Et en mode turbulent :

Cf. Équation
66

$$\begin{aligned}
 q_{wet,t,moy,i} = & 0,0287ka \frac{R_{i+1}}{2} Pr^{0.6} \left(\frac{V_{\infty}}{\nu}\right)^{0.8} (c_{i+1})^{-0.2} \left[1 \right. \\
 & - \frac{3(V_{\infty}^2) + (R_{i+1}\omega)^2}{6(T_s - T_{\infty})C_{p,a}} r_c \\
 & + 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{\frac{2}{3}} \cdot p_{\infty}^0} \left. \right] (c_{i+1} + c_i) \\
 & + \frac{aE_m LWC}{2} \left[R_{i+1} C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (R_{i+1}\omega)^2} \right. \\
 & - R_i C_{p,w} \sqrt{V_{\infty}^2 + (R_i\omega)^2} \\
 & \left. - \frac{(R_{i+1}^3 - R_i^3)\omega^2 + 3(R_{i+1} - R_i)V_{\infty}^2}{6(T_s - T_{\infty})} \right] (c_{i+1} \\
 & + c_i)
 \end{aligned}$$

La température de surface est fixée à 0 °C, le coefficient de collection E_m à un, la vitesse nominale du vent à 10 m/s et le facteur Tip Speed Ratio (TSR) servira à évaluer la vitesse de rotation de l'éolienne. Pour cette éolienne, le TSR est égal à 5,05. Les constantes de l'écoulement sont prises selon le Tableau 20.

$$\omega = \frac{TSR \cdot V_{\infty}}{R} = 5,05 \frac{V_{\infty}}{R} = 5,05 \frac{10}{45} = 1,12 \text{ rad/s} \quad \text{Équation 68}$$

Cf. Équation 28

$$a = T_s - T_{\infty}$$

Afin d'être précis dans les calculs, il sera pris en compte la variation des constantes des équations ci-dessus en fonction de la température. Leurs valeurs corrigées pour chacune des températures étudiées sont les suivantes :

Tableau 20: Valeurs des constantes d'écoulement en fonction de la température ambiante.

T_{∞} (°C)	ν (m ² /s)	Pr	k (W/K)	$C_{p,w}$ (J/kgK)	$C_{p,a}$ (J/kgK)	$r_{c,lam}$	$r_{c,tur}$
0	1,25E-05	0,715	0,023296	4180	1004	8,46E-01	8,94E-01
-5	1,25E-05	0,7166	0,023296	4180	1004	8,47E-01	8,95E-01
-10	1,25E-05	0,7181	0,023296	4180	1004	8,47E-01	8,95E-01
-15	1,20E-05	0,7196	0,022903	4180	1004	8,48E-01	8,96E-01

En remplaçant les variables par leur valeur pour chacune des zones discrétisées, pour des valeurs données de teneur en eau liquide et de température ambiante, la consommation en mode antigivre est obtenue.

Tableau 21, Tableau 22 et Tableau 23 indiquent respectivement les consommations en antigivrage pour une éolienne de type Vestas V90-3.0 MW à -5 °C, -10 °C et -15 °C.

Tableau 21: Consommation en mode antigivrage de la VESTAS V90-3.0 MW à -5 °C.

	Application pour R = 45 m		$T_{\infty} = -5 \text{ °C}$			
			LWC = 0,3 g/m ³		LWC = 0,9 g/m ³	
	R (m)	Corde (m)	$q_{wet,l,moy}$ (W)	$q_{wet,t,moy}$ (W)	$q_{wet,l,moy}$ (W)	$q_{wet,t,moy}$ (W)
-	0,00	1,10				
Zone 1 (moyeu)	1,10	1,10	1,17E+02	2,46E+02	2,69E+02	3,98E+02
Zone 2	2,10	2,59	4,30E+02	5,80E+02	6,72E+02	8,23E+02
Zone 3	8,60	3,33	4,42E+03	4,68E+03	8,06E+03	8,32E+03
Zone 4	11,60	3,40	5,57E+03	5,86E+03	8,56E+03	8,86E+03
Zone 5	43,10	1,53	3,46E+04	4,30E+04	9,45E+04	1,03E+05
Zone 6	45,00	1,04	3,22E+03	9,10E+03	6,24E+03	1,21E+04
SOMME PAR PALE			4,84E+04	6,35E+04	1,18E+05	1,33E+05

Tableau 22: Consommation en mode antigivrage à de la VESTAS V90-3.0 MW à -10 °C.

	Application pour R = 45 m		$T_{\infty} = -10\text{ °C}$			
			LWC = 0,3 g/m ³		LWC = 0,9 g/m ³	
	R (m)	Corde (m)	$q_{wet,l_{moy}}$ (W)	$q_{wet,t_{moy}}$ (W)	$q_{wet,l_{moy}}$ (W)	$q_{wet,t_{moy}}$ (W)
-	0,00	1,10				
Zone 1 (moyeu)	1,10	1,10	2,34E+02	4,94E+02	5,38E+02	7,98E+02
Zone 2	2,10	2,59	8,62E+02	1,17E+03	1,35E+03	1,65E+03
Zone 3	8,60	3,33	8,88E+03	9,41E+03	1,62E+04	1,67E+04
Zone 4	11,60	3,40	1,12E+04	1,18E+04	1,72E+04	1,78E+04
Zone 5	43,10	1,53	6,96E+04	8,71E+04	1,89E+05	2,07E+05
Zone 6	45,00	1,04	6,59E+03	1,89E+04	1,26E+04	2,50E+04
SOMME PAR PALE			9,73E+04	1,29E+05	2,37E+05	2,69E+05

Tableau 23: Consommation en mode antigivrage à de la VESTAS V90-3.0 MW à -15 °C.

	Application pour R = 45 m		$T_{\infty} = -15\text{ °C}$			
			LWC = 0,3 g/m ³		LWC = 0,9 g/m ³	
	R (m)	Corde (m)	$q_{wet,l_{moy}}$ (W)	$q_{wet,t_{moy}}$ (W)	$q_{wet,l_{moy}}$ (W)	$q_{wet,t_{moy}}$ (W)
-	0,00	1,10				
Zone 1 (moyeu)	1,10	1,10	3,51E+02	7,47E+02	8,08E+02	1,20E+03
Zone 2	2,10	2,59	1,30E+03	1,77E+03	2,02E+03	2,50E+03
Zone 3	8,60	3,33	1,33E+04	1,42E+04	2,43E+04	2,52E+04
Zone 4	11,60	3,40	1,68E+04	1,79E+04	2,58E+04	2,69E+04
Zone 5	43,10	1,53	1,05E+05	1,32E+05	2,84E+05	3,11E+05
Zone 6	45,00	1,04	9,97E+03	2,90E+04	1,90E+04	3,81E+04
SOMME PAR PALE			1,46E+05	1,95E+05	3,56E+05	4,05E+05

4.5.2.2 ÉTUDE DE CAS ÉLARGIE

Les différentes étapes de l'étude de cas précédente sont appliquées à six autres turbines éoliennes (Meier & Scholz, 2010; Butterfield, et al., 2009; Gipe, 2009; Vestas, 2009; Vestas, 2002). Ces estimations sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 24, Tableau 25 et Tableau 26 indiquent respectivement les consommations en antigivrages pour des éoliennes de type ENERCON E40, Vestas V47, Vestas V66, Vestas V80, Vestas V90 et Vestas V120 à -5 °C, -10 °C et -15 °C.

Tableau 24: Puissance requise pour l'antigivrage à -5 °C.

	Rayon (m)	Tip Speed Ratio	Sortie (kW)	Laminaire		Turbulent	
				LWC	LWC	LWC	LWC
				0,3 g/m3	0,9 g/m3	0,3 g/m3	0,9 g/m3
				Puissance d'antigivrage (kW)			
ENERCON E40	20	5,8	600	27,17	74,53	43,17	90,54
Vestas V47	23,5	4,3	660	30,32	79,42	51,50	100,60
Vestas V66	33	4,6	1650	67,53	170,74	100,97	204,18
Vestas V80	40	4,66	2000	105,11	258,62	146,47	299,98
Vestas V90	45	5,05	3000	145,06	354,87	190,35	400,16
Vestas V100	50	4,68	2750	175,78	416,63	224,56	465,40
Vestas V120	60	6,5	4500	331,02	807,29	376,12	852,39

Tableau 25: Puissance requise pour l'antigivrage à -10 °C.

	Rayon (m)	Tip Speed Ratio	Sortie (kW)	Laminaire		Turbulent	
				LWC	LWC	LWC	LWC
				0,3 g/m3	0,9 g/m3	0,3 g/m3	0,9 g/m3
				Puissance d'antigivrage (kW)			
ENERCON E40	20	5,8	600	54,55	149,31	88,10	182,85
Vestas V47	23,5	4,3	660	60,87	159,07	104,45	202,65
Vestas V66	33	4,6	1650	135,73	342,18	204,90	411,34
Vestas V80	40	4,66	2000	211,42	518,50	297,20	604,29
Vestas V90	45	5,05	3000	292,04	711,75	386,71	806,42
Vestas V100	50	4,68	2750	353,91	835,69	455,52	937,30
Vestas V120	60	6,5	4500	668,91	1621,70	767,78	1720,57

Tableau 26: Puissance requise pour l'antigivrage à -15 °C.

	Rayon (m)	Tip Speed Ratio	Sortie (kW)	Laminaire		Turbulent	
				LWC	LWC	LWC	LWC
				0,3 g/m3	0,9 g/m3	0,3 g/m3	0,9 g/m3
				Puissance d'antigivrage (kW)			
ENERCON E40	20	5,8	600	81,95	224,09	133,74	275,89
Vestas V47	23,5	4,3	660	91,42	238,74	158,36	305,67
Vestas V66	33	4,6	1650	203,97	513,65	310,60	620,29
Vestas V80	40	4,66	2000	317,79	778,44	450,44	911,10
Vestas V90	45	5,05	3000	439,11	1068,72	586,16	1215,76
Vestas V100	50	4,68	2750	532,16	1254,88	690,23	1412,95
Vestas V120	60	6,5	4500	1007,01	2436,32	1164,58	2593,89

4.5.2.3 ANALYSE DES RÉSULTATS

Ces tableaux montrent que les résultats en modes laminaire et turbulent se rapprochent lorsque les températures baissent ; la consommation énergétique augmente avec la taille de la pale, ce qui est une observation prévisible. Les effets de la chaleur sensible sont très supérieurs à ceux de la convection. Dans la suite, seuls les cas en mode turbulent uniquement seront considérés, car représentant les plus fortes consommations énergétiques.

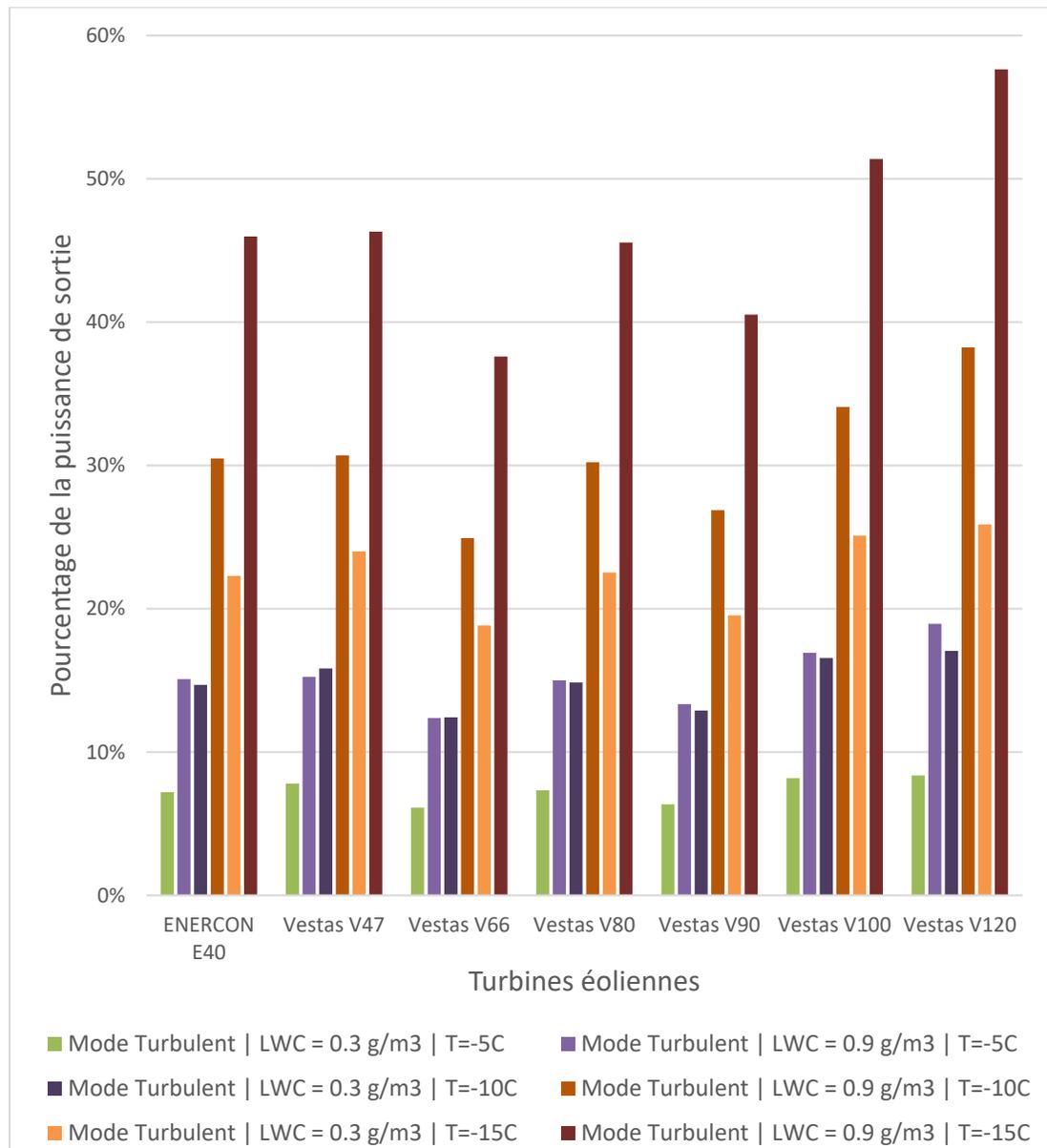


Figure 50: Histogramme comparatif des puissances consommées en antigivrage par rapport aux puissances produites.

La figure précédente renseigne sur le pourcentage d'énergie que représente la consommation en antigivrage par rapport à la production de l'éolienne. Cette comparaison permet, à partir d'un simple coup d'œil, de dégager une idée du rendement de l'antigivrage. La consommation en antigivrage croît avec la teneur en eau liquide et la baisse de la température ; c'est une observation qui correspond également aux résultats attendus. Dans le pire cas observé dans nos simulations, la consommation en antigivrage représente 58 % de la production de l'éolienne. Bien que ce résultat soit prometteur, il doit être pris en compte que :

- Les pertes de chaleur vers l'intérieur du profil ont été négligées dans cette estimation ;

- La température de surface fixée à 0 °C est une limite critique, car comme observé lors des expériences en soufflerie, à 0 °C il y a quand même formation de glace sur le profil. Ce n'est qu'à partir de 5 °C qu'un profil propre a été obtenu, quelle que soit la durée de l'événement givrant ;

- Le coefficient de collection a été pris arbitrairement et sans tenir compte de l'influence de l'angle d'attaque.

Il y a également un aspect implicite sur l'optimisation dans notre approche à l'antigivrage. Étant donné que notre profil était couvert de plusieurs résistances chauffantes alimentées indépendamment, la température de surface a pu être fixée sur chacune de ces résistances chauffantes. La surface délimitée par chaque résistance chauffante est donc assimilable à une surface élémentaire.

La Figure 51 montre les variations de la puissance de chauffage par élément chauffant pour une teneur en eau liquide de 0,3 g/m³ et une température de -15 °C à diverses vitesses d'écoulement. Il existe un important écart entre les puissances de chauffage maximale et minimale atteintes. Or, les résistances chauffantes existantes pour les pales d'éoliennes ne peuvent être alimentées que par une seule source ; il n'est donc pas possible de faire un chauffage graduel comme dans notre expérience. Cela implique qu'il faudrait chauffer plus que nécessaire afin d'assurer que la surface du profil soit au moins à la température ciblée en tout

point. En supposant que la surchauffe n'endommage pas la pale, les pertes seraient néanmoins considérables.

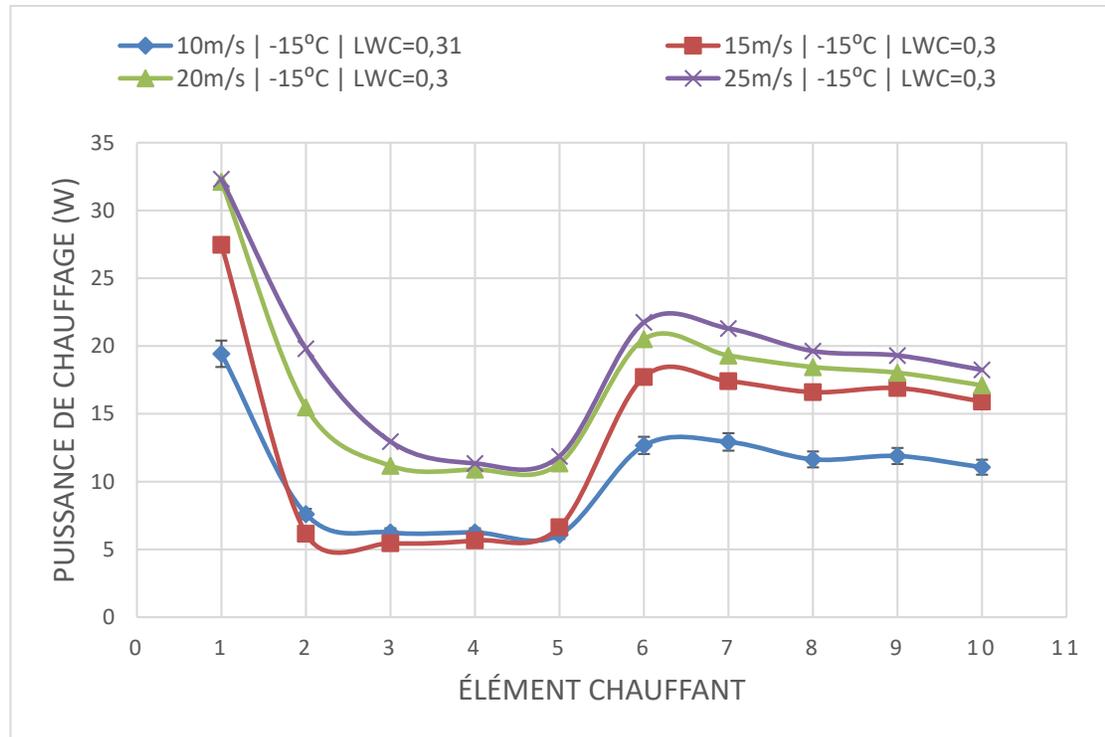


Figure 51: Répartition de la puissance de chauffage par élément chauffant pour LWC = 0,3 g/m³ à -15 °C.

Toutefois, même avec notre méthode de chauffage par élément, les puissances estimées pour l'antigivrage sont tout de même significatives et, étant donné que les éoliennes sont construites de manières plus robuste afin de pouvoir supporter d'importantes charges de glace, le dégivrage semble être une stratégie plus prometteuse du point de vue de la consommation énergétique.

CHAPITRE 5

ÉTUDE DU DÉGIVRAGE

5.1 L'ACCRÉTION DE GLACE

5.1.1 DESCRIPTION

Lorsque les gouttelettes d'eau en surfusion frappent une surface, elles se solidifient et forment des dendrites de glace. Le taux de solidification dépend de la quantité de chaleur latente de solidification qui est absorbable par l'air et par le substrat avant l'arrivée d'une autre gouttelette. Lorsque ce taux est suffisant, toutes les gouttelettes gèlent à l'impact. Dans le cas contraire, la gouttelette gèle partiellement et une certaine quantité d'eau est emprisonnée à l'intérieur de la glace ; cette glace est dite spongieuse. Le type de glace dépend des conditions météorologiques et atmosphériques.

La formation de givre survient lorsque toutes les gouttelettes gèlent instantanément à l'impact et qu'il n'y a pas de ruissellement ; c'est le régime thermodynamique sec. Le givre est opaque, de couleur blanche due à la présence de bulles d'air emprisonnées dans sa structure cristalline. Sa température est inférieure à 0 °C.

La formation de verglas survient lorsque les gouttelettes ne gèlent pas totalement ; c'est le régime thermodynamique humide. Le verglas a une surface lisse, opaque et transparente à cause des gouttelettes d'eau emprisonnées à l'intérieur de la glace. Sa température avoisine la température de solidification de l'eau.

Les pertes de production dues au givrages sont maximales entre -15°C et 0°C (Parent & Ilinca, 2011).

5.1.2 PARAMÈTRES INFLUENÇANT L'ACCRÉTION DE LA GLACE

L'accrétion de la glace est donc un phénomène physique complexe qui dépend de plusieurs paramètres environnementaux. Dans le cas des parcs éoliens, les principaux paramètres à considérer sont :

- La température extérieure : qui indique le degré de surfusion ;
- La teneur en eau liquide : qui indique la quantité d'eau dans l'écoulement ;
- La vitesse de l'écoulement : dont dépend la quantité d'eau collectée par le profil ;
- La position de la pale : dont dépend également la quantité d'eau collectée ;
- La durée de l'événement givrant : qui influe sur l'épaisseur de glace qui se forme.

Ces paramètres influent de manière interdépendante sur la quantité et le type de dépôt de glace accumulée.

5.2 MODÉLISATION

5.2.1 MODÈLE ANALYTIQUE

Dans ce paragraphe, un modèle analytique pour un système de dégivrage à résistances chauffantes installées sur la surface extérieure de la pale développé par Wadham-Gagnon (Wadham-Gagnon, et al., 2014) sera présenté. D'après cette étude, à la suite d'un événement givrant ayant entraîné la formation d'une couche de glace directement à la surface de la résistante chauffante, lorsque la résistance est alimentée, un flux de chaleur est généré qui :

- Traverse la glace par conduction ; ce flux s'exprime pour un flux unidirectionnel suivant l'expression (Wadham-Gagnon, et al., 2014) :

$$k_g \frac{d^2 T_s}{dx^2} = \rho_g C_{p,g} \frac{dT_s}{dt} \quad \text{Équation 69}$$

- Traverse l'interface entre la glace et l'air par convection ; il est estimé suivant la formule (Wadham-Gagnon, et al., 2014) :

$$Q_{g,conv} = h \frac{(T_s - T_{air})}{V_g} \quad \text{Équation 70}$$

Avec :
$$h = S_t \rho_a C_{p,a} V \quad \text{Équation 71}$$

En mode laminaire (Wadham-Gagnon, et al., 2014):

$$S_{t,lam} = 0,418 \frac{\nu^{0,5} V^{0,435}}{\left(\int_0^x V^{1,87} dx\right)^{0,5}} \quad \text{Équation 72}$$

Et, en mode turbulent (Wadham-Gagnon, et al., 2014):

$$S_{t,tur} = \frac{0,5C_f}{0,9 + \frac{\sqrt{0,5C_f}}{0,8Pr^{-0,44} \left(L_{rug} \frac{V\sqrt{0,5C_f}}{\nu} \right)}} \quad \text{Équation 73}$$

Où, le coefficient de friction est (Wadham-Gagnon, et al., 2014):

$$0,5C_f = \frac{0,168}{\left[\ln \left(864 \frac{\theta_t}{L_{rug}} \right) \right]^2} \quad \text{Équation 74}$$

Avec l'épaisseur de la quantité de mouvement turbulent donnée par (Wadham-Gagnon, et al., 2014):

$$\theta_t = \left[\frac{0,0156}{V^{4,11}} \int_0^x V^{3,86} dx \right]^{0,8} + \theta_l \quad \text{Équation 75}$$

En négligeant les pertes thermiques par évaporation, rayonnement et réchauffement aérodynamique, le bilan d'énergie s'écrit alors (Wadham-Gagnon, et al., 2014):

$$k_g \frac{d^2 T_s}{dx^2} - \rho_g C_{p,g} \frac{dT_s}{dt} + h \frac{(T_s - T_{air})}{V_g} = -Q_{degivrage} \quad \text{Équation 76}$$

L'épaisseur de glace à fondre pour atteindre la séparation se situe à 40 mm (Wadham-Gagnon, et al., 2014).

5.2.2 RÉSULTATS DE SIMULATIONS

Des simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel SolidWorks pour une température ambiante de -5 °C, une vitesse d'écoulement de 15 m/s et un angle d'attaque de 5°. Le givre accumulé est supposé uniforme avec une épaisseur de 4 cm et le flux thermique appliqué est de 4000 W/m². La durée de la simulation est de 30 min et les résultats obtenus sont répertoriés dans le Tableau 27 ci-dessous.

Tableau 27: Variations de la durée de la fonte en fonction de l'épaisseur de la glace (Terreux, et al., 2012).

Épaisseur de glace	0 mm	15,9 mm	31,5 mm	47,5 mm	63,5 mm
Durée de la fonte	10 s	4 min 10 s	10 min 40 s	20 min 30 s	Fonte non atteinte

Pour étudier l'influence du vent, les simulations précédentes ont été également effectuées pour d'autres vitesses de vent (5 m/s, 10 m/s, 20 m/s et 25 m/s). Les résultats sont présentés au Tableau 28 ci-dessous.

Tableau 28 : Variations de la durée de la fonte en fonction de l'épaisseur de la glace pour différentes vitesses d'écoulement (Terreaux, et al., 2012).

Épaisseur de glace	15,9 mm	31,5 mm	47,5 mm	63,5 mm	95,5 mm
Durée de la fonte — 5 m/s	4 min 10 s	10 min 30 s	19 min 40 s	30 min	Fonte non atteinte
Durée de la fonte — 10 m/s	4 min 10 s	10 min 40 s	20 min 10 s	Fonte non atteinte	Fonte non atteinte
Durée de la fonte — 15 m/s	4 min 10 s	10 min 40 s	20 min 30 s	Fonte non atteinte	Fonte non atteinte
Durée de la fonte — 20 m/s	4 min 10 s	10 min 40 s	20 min 40 s	Fonte non atteinte	Fonte non atteinte
Durée de la fonte — 20 m/s	4 min 10 s	10 min 40 s	20 min 50 s	Fonte non atteinte	Fonte non atteinte

Finalement, la sensibilité à l'angle d'attaque a été étudiée (Tableau 29), les simulations précédentes ont été effectuées pour des angles d'attaque de 0°, 5°, 10°, 15° et 20°.

Tableau 29: Variations de la durée de la fonte en fonction de l'épaisseur de la glace pour différents angles d'attaque (Terreaux, et al., 2012).

Épaisseur de glace	15,9 mm	31,5 mm	47,5 mm	63,5 mm
Durée de la fonte — 0°	4 min 10 s	10 min 40 s	20 min 10 s	Fonte non atteinte
Durée de la fonte — 5°	4 min 10 s	10 min 40 s	20 min 10 s	Fonte non atteinte
Durée de la fonte — 10°	4 min 10 s	10 min 40 s	20 min 30 s	Fonte non atteinte
Durée de la fonte — 15°	4 min 10 s	10 min 40 s	20 min 40 s	Fonte non atteinte
Durée de la fonte — 20°	4 min 10 s	10 min 40 s	20 min 50 s	Fonte non atteinte

5.2.3 CONCLUSIONS

Les résultats obtenus par ce modèle indiquent qu'une stratégie de dégivrage électrothermique permettrait de réduire les pertes dues aux givrages dans les parcs éoliens. D'une autre part, ces simulations montrent que l'influence de la vitesse du vent n'est pas significative sur la consommation

du dégivrage. Cette conclusion avait été également obtenue dans une étude précédente (Patreau, 1998). Idem pour l'influence de l'angle d'attaque, qui est inexistante pour des angles d'attaques allant de 0 à 20 degrés. Néanmoins, cette étude comporte certaines insuffisances, telles que :

- L'épaisseur du film d'eau nécessaire pour faire chuter la glace : la valeur utilisée a été prise de manière arbitraire et conservatrice (40 mm) ;
- L'effet du type de glace : en effet, dans ces simulations, la conductivité est considérée égale à 2,3453 W/mK (conductivité de la glace à -10 °C), mais cette valeur varie en fonction des conditions météorologiques lors de la formation de la glace.
- L'inclinaison du profil a un effet minime sur la durée de la fonte.

Ces insuffisances du modèle ne peuvent être déterminées que par une méthode expérimentale.

5.3 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

5.3.1 PLAN D'EXPÉRIENCE

Le but de ce plan d'expériences est de mesurer la durée nécessaire au dégivrage en fonction de la quantité de chauffage, de l'épaisseur de glace accumulée et de la température ambiante. À cet effet, 50 expériences ont été réalisées à une teneur en eau fixe de 0,3 g/m³, une vitesse d'écoulement lors de l'accrétion de 10 m/s, une vitesse constante d'écoulement lors du dégivrage de 5 m/s et quatre températures (-5 °C ; -10 °C ; -15 °C et -20 °C) ; ces conditions sont celles les plus souvent rencontrées dans les parcs éoliens. La température ambiante est gardée constante au cours du givrage et du dégivrage. Seule la résistance chauffante au niveau du point de stagnation est chauffée et l'angle d'attaque du profil est maintenu constant à 0 degré lors de l'accrétion de glace et à 5 degrés lors du dégivrage. Cet angle d'inclinaison a été choisi arbitrairement dans le but de réduire les effets de la gravité, qui tendent à accélérer la séparation de la glace, et ceux de la capillarité, qui tendent au contraire à la ralentir. D'autre part, sur un plan technique, la soufflerie limitait le degré d'inclinaison

qu'il était possible d'appliquer sans influencer l'écoulement, car plus le profil est incliné, plus grande est la section qu'il occupe dans la soufflerie et donc plus important est l'obstacle qu'il représente face à l'écoulement. Ceci aurait pour conséquence d'accroître la turbulence de l'écoulement.

Chaque expérience se déroule selon la démarche suivante :

1. Nettoyage du montage et de l'intérieur de la soufflerie ;
2. Démarrage de l'ordinateur de contrôle et mise en marche du compresseur en choisissant une consigne de vitesse ;
3. Réglage de la consigne de température désirée à l'intérieur de la soufflerie ;
4. Réglage de la pression d'eau à 80 psi et ouverture rotamètres à une valeur de 20 mm tout en gardant les gicleurs fermés afin d'éviter le gel de l'eau à l'intérieur des rotamètres ;
5. Vérification de la stabilisation de la température ambiante, de la température à la surface du profil (doit être sensiblement égale à température ambiante) et de la vitesse de l'écoulement. L'écoulement est jugé stable lorsque qu'après 15 minutes les variations de température ne dépassent pas 1 °C et les variations de vitesse ne dépassent pas 1 m/s ;
6. Réglage des rotamètres aux valeurs requises pour avoir la teneur en eau désirée ; ouverture des gicleurs et démarrage du chronomètre ;
7. Une fois la durée visée atteinte, fermeture des gicleurs, les rotamètres sont remis à 20 mm et la vitesse d'écoulement est baissée à 5 m/s ;
8. Inclinaison du profil à 5° ;
9. Démarrage de l'enregistrement vidéo ;
10. Allumage de la source de courant et réglage manuel afin d'obtenir le flux désiré. Les variations de température sont enregistrées tout au long du processus de dégivrage à raison de 5 données par secondes. Chacune des données est une moyenne de 20 mesures ;
11. Après la chute de la glace, les enregistrements des données et de la vidéo sont arrêtés. La source de courant est éteinte. Les morceaux de glace sont ramassés, numérotés et stockés afin d'être traités ultérieurement.

5.3.2 TRAITEMENT DES MORCEAUX DE GLACES RAMASSÉS

Les morceaux de glace ramassés à la fin de chaque test sont ensuite traités dans une chambre froide selon les étapes suivantes :

1. La mesure de l'épaisseur : la moyenne de la mesure de l'épaisseur en 5 endroits différents ;
2. La pesée : permet de calculer la densité de la glace accumulée ;
3. La mesure de la densité : les morceaux de glace ramassés sont disposés dans un bécher placé sur une balance haute précision. Le poids du bécher et de la glace sont connus. La balance est tarée et dans le bécher est versée de l'huile de densité également connue jusqu'à la barre des 100 ml. Le poids du mélange est noté et le poids de l'huile totale qui a été versée en est déduit. En se servant de ce poids calculé et de la densité de l'huile, le volume d'huile retranché du total de 100 ml est calculé pour connaître le volume de glace. En ayant ainsi la masse de glace et son volume, sa densité peut être estimée.

5.3.3 TRAITEMENT DES PHOTOGRAPHIES

Les différentes photos prises du profil à la fin des précipitations givrantes permettent avec une mise à l'échelle d'estimer l'épaisseur de la glace et son volume :

1. L'épaisseur de la glace : la moyenne de la mesure de l'épaisseur en 5 points différents ; à savoir, la vue de profil gauche (une mesure), la vue de profil droite (une mesure) et la vue de dessus (trois mesures) ;
2. La surface latérale de la glace : la surface vue sur les deux vues de profil. Chacune des vues de profil gauche et droite pour chaque test est imprimée. La surface délimitée par la glace est découpée et pesée sur une balance haute précision. Ensuite une surface de 10 cm² du même type de papier est découpée et pesée. Par une règle de trois, la surface à laquelle équivaut le poids de la

découpe de la glace est alors déduite. Et, finalement avec une mise à l'échelle, la surface réelle de la glace vue de ce côté du profil est estimée. La surface de la glace pour chaque expérience est la moyenne de la surface du profil gauche et celle du profil droit ;

3. Le volume de glace : est obtenu en multipliant la surface de la glace par la largeur du profil ;

4. Masse de glace accumulée : est obtenue en multipliant le volume de glace par la densité calculée.

5.4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

5.4.1 MESURE DU FILM D'EAU NÉCESSAIRE POUR ATTEINDRE LA SÉPARATION

5.4.1.1 ESSAIS À -5°C

Dans la première série d'expériences, un événement givrant à une température de -5 °C avec une teneur en liquide de 0,3 g/m³ a été étudiée. Ces tests consistent à varier la durée de l'accrétion et à mesurer les temps de récupération (chute de la glace) en fonction de la quantité d'énergie fournie pour le chauffage du profil. Les temps d'accrétion étudiés étaient de 30 min, 60 min et 120 min avec les 4 puissances de chauffage suivantes : 1250 W/m², 2500 W/m², 4000 W/m² et 5000 W/m². Une partie de la chaleur fournie pour le dégivrage est perdue à l'intérieur du profil et est prise en compte dans notre analyse en soustrayant le flux moyen perdu par conduction du flux de chaleur total fourni. Cette série est composée de 16 tests expérimentaux et la phase de dégivrage dans chacune d'elles est caractérisée par une vitesse d'écoulement de 5 m/s et une inclinaison du profil d'un angle de 5°.

Tableau 30: Variation de l'épaisseur de glace fondue en fonction de la durée d'accrétion et de la puissance de chauffage à une température de -5 °C.

	Température d'accrétion (°C)	Durée d'accrétion (hh:mm)	Vitesse de vent au dégivrage (m/s)	Flux de chauffage (W/m ²)	Durée du dégivrage (hh:mm)	Épaisseur de glace initiale (mm)	Épaisseur des morceaux de glace (mm)	Épaisseur de glace fondue (mm)
1	-5	00:30	5	1208	00:07	3,90	2,08	1,82
2	-5	00:30	5	1827	00:03	3,80	1,87	1,93
3	-5	00:30	5	2411	00:02	3,40	2,08	1,32
4	-5	00:30	5	2909	00:01	3,80	2,12	1,68
5	-5	00:30	5	3898	00:00	4,00	2,17	1,84
6	-5	00:30	5	4899	00:00	3,20	-	-
7	-5	01:00	5	1201	00:12	6,00	3,13	2,87
8	-5	01:00	5	1837	00:05	6,40	3,53	2,87
9	-5	01:00	5	2399	00:02	6,40	3,48	2,92
10	-5	01:00	5	2896	00:01	7,40	4,84	2,56
11	-5	01:00	5	3874	00:00	6,60	4,11	2,49
12	-5	01:00	5	4881	00:00	7,00	4,02	2,98
13	-5	02:00	5	1159	00:18	11,70	7,22	4,48
14	-5	02:00	5	2359	00:01	12,50	8,44	4,06
15	-5	02:00	5	3834	00:00	12,90	8,36	4,54
16	-5	02:00	5	4856	00:00	13,00	8,38	4,62

Le Tableau 30 indique que l'épaisseur du film d'eau (glace fondue) augmente avec la durée d'accrétion ou l'épaisseur de glace accumulée. La puissance de chaleur fournie lors du dégivrage ne semble avoir aucun impact sur l'épaisseur du film d'eau nécessaire pour atteindre la séparation. Les erreurs de mesures de ces expériences sont répertoriées dans le Tableau 31. Les durées de dégivrage de 00:00 dans ce tableau signifient que le délestage est survenu en moins de 60 secondes.

Tableau 31: Estimation des erreurs de mesure pour les expériences à une température de -5 °C.

Temp. d'accrét. (°C)	Durée d'accrét. (hh:mm)	Épaisseur de glace initiale			Épaisseur de glace fondue		
		Moy. (mm)	Dispersion (mm)	Erreur relative (%)	Moy. (mm)	Dispersion (mm)	Erreur relative (%)
-5	00:30	3,78	±0,20	5 %	1,72	±0,21	12 %
-5	01:00	6,63	±0,41	6 %	2,78	±0,17	6 %
-5	02:00	12,53	±0,59	5 %	4,43	±0,25	6 %

5.4.1.2 ESSAIS À -15°C

De manière analogue au paragraphe précédent, la même série de 16 tests expérimentaux est effectuée à une température de -15 °C.

Tableau 32: Variation de l'épaisseur de glace fondue en fonction de la durée d'accrétion et de la puissance de chauffage à une température de -15 °C.

	Température d'accrétion (°C)	Durée d'accrétion (hh:mm)	Vitesse de vent au dégivrage (m/s)	Flux de chauffage (W/m ²)	Durée du dégivrage (hh:mm)	Épaisseur de glace initiale (mm)	Épaisseur des morceaux de glace (mm)	Épaisseur de glace fondue (mm)
1	-15	00:30	5	1176	01:20	6,40	3,69	2,71
2	-15	00:30	5	1807	00:19	5,20	2,50	2,70
3	-15	00:30	5	2305	00:08	7,00	4,73	2,27
4	-15	00:30	5	2848	00:03	5,30	3,24	2,07
5	-15	00:30	5	3808	00:02	6,50	4,11	2,40
6	-15	00:30	5	4689	00:01	7,70	4,11	3,29
7	-15	01:00	5	1176	01:39	14,10	9,77	4,33
8	-15	01:00	5	1752	00:36	13,90	10,88	3,02
9	-15	01:00	5	2295	00:13	14,60	11,13	3,47
10	-15	01:00	5	2717	00:05	14,40	9,96	3,44
11	-15	01:00	5	3647	00:03	13,10	10,55	2,55
12	-15	01:00	5	4697	00:01	14,30	11,18	3,12
13	-15	02:00	5	1182	01:56	24,70	18,58	6,12
14	-15	02:00	5	2312	00:18	22,40	17,46	4,94
15	-15	02:00	5	3665	00:02	25,00	19,78	5,22
16	-15	02:00	5	4733	00:01	22,70	17,43	5,27

Les constatations dans le Tableau 32 sont identiques au cas précédent : l'épaisseur du film d'eau augmente avec la durée d'accrétion ou l'épaisseur de glace accumulée et la puissance de chauffage ne semble avoir aucun effet sur l'épaisseur requise pour le film d'eau. Toutefois, les épaisseurs de glace accumulées sont plus importantes que celles obtenues à une température ambiante de -5 °C. Les erreurs sont également répertoriées comme précédemment (Tableau 33).

Tableau 33: Estimation des erreurs de mesure pour les expériences à une température de -15 °C.

Temp. d'accrét. (°C)	Durée d'accrét. (hh:mm)	Épaisseur de glace initiale			Épaisseur de glace fondue		
		Moy. (mm)	Dispersion (mm)	Erreur relative (%)	Moy. (mm)	Dispersion (mm)	Erreur relative (%)
-15	00:30	6,35	±0,79	12 %	2,57	±0,35	14 %
-15	01:00	14,07	±0,43	3 %	3,32	±0,49	5 %
-15	02:00	23,70	±1,34	6 %	5,39	±0,51	9 %

5.4.1.3 ESSAIS À DURÉE CONSTANTE

Afin d'observer une éventuelle tendance dans la variation de l'épaisseur de glace fondue, quatre tests additionnels sont réalisés à -10 °C pour un événement givrant d'une durée d'une heure. Toutes les autres conditions sont identiques à celles des expériences précédentes. Il est ainsi possible de comparer les tests d'une durée d'accrétion d'une heure pour les températures de -5 °C, -10 °C et -15 °C.

Tableau 34: Variation de l'épaisseur de glace fondue pour une durée d'accrétion d'une heure en fonction de la température et de la puissance de chauffage.

	Température d'accrétion (°C)	Durée d'accrétion (hh:mm)	Vitesse de vent au dégivrage (m/s)	Flux (W/m ²)	Durée du dégivrage (hh:mm)	Épaisseur de glace initiale (mm)	Épaisseur des morceaux de glace (mm)	Épaisseur de glace fondue (mm)
1	-5	01:00	5	1201	00:12	6,00	3,13	2,87
2	-5	01:00	5	1837	00:05	6,40	3,53	2,87
3	-5	01:00	5	2399	00:02	6,40	3,48	2,92
4	-5	01:00	5	4881	00:00	7,00	4,02	2,98
5	-10	01:00	5	1184	01:36	9,64	6,04	3,60
6	-10	01:00	5	1743	00:13	10,27	6,36	3,91
7	-10	01:00	5	2304	00:03	9,11	6,68	2,93
8	-10	01:00	5	4797	00:00	9,23	6,49	2,94
9	-15	01:00	5	1176	01:39	14,10	9,77	4,33
10	-15	01:00	5	1752	00:36	13,90	10,88	3,02
11	-15	01:00	5	2295	00:13	14,60	11,13	3,47
12	-15	01:00	5	4697	00:01	14,30	11,18	3,12

Les épaisseurs observées pour le film d'eau (Tableau 34) croissent légèrement en fonction de la température. Cette série de tests tend à montrer que l'épaisseur du film d'eau est très peu dépendante de la température, mais varie plus en fonction de la durée d'accrétion. Mais, il n'y a pas assez de données à notre disposition pour tirer cette conclusion.

5.4.1.4 ANALYSE DES RÉSULTATS

L'analyse des résultats obtenus indique que :

- L'épaisseur du film d'eau nécessaire pour faire chuter la glace ne dépend pas de la puissance de chauffage ;

- L'épaisseur du film d'eau augmente avec l'épaisseur de glace accumulée. Cela s'explique par le fait que la durée et la température d'accrétion influent sur le type de la glace et, par conséquent, sur sa conductivité thermique. L'épaisseur suffisante du film d'eau n'a pu être déterminée dans les présents travaux ;

- Pour des épaisseurs de glace identiques, mais à des températures ambiantes différentes, l'épaisseur du film d'eau nécessaire pour la séparation semble croître avec la température ; c.-à-d. qu'à -5 °C, l'épaisseur du film d'eau requise sera supérieure à celle requise à -15 °C pour des quantités de glace accumulée équivalentes (voir tests à -5 °C/1h et -15 °C/30 min). Mais, il n'est pas possible de généraliser avec la quantité de données disponibles.

L'épaisseur du film d'eau dépend donc de trois paramètres principaux ; à savoir, la température (les températures ambiantes d'accrétion et de dégivrage sont supposées identiques) et l'épaisseur de glace accumulée. Les valeurs moyennes d'épaisseurs de glace accumulées et fondues en fonction de la température et de la durée d'accrétion sont moyennées et regroupées dans le Tableau 35.

Tableau 35: Tableau récapitulatif des valeurs moyennes de glaces accumulées et fondues en fonction de la température.

	Température d'accrétion (°C)	Durée d'accrétion (hh:mm)	Vitesse du vent au dégivrage (m/s)	Épaisseur de glace initiale (mm)	Épaisseur de glace fondue (mm)
1	-5	00:30	5	3,78±15 %	1,72±15 %
2	-5	01:00	5	6,63±15 %	2,78±15 %
3	-5	02:00	5	12,53±15 %	4,43±15 %
4	-10	01:00	5	9,56±15 %	3,35±15 %
5	-15	00:30	5	6,35±15 %	2,57±15 %
6	-15	01:00	5	14,07±15 %	3,32±15 %
7	-15	02:00	5	23,70±15 %	5,39±15 %

Le tableur Excel ne comportant pas une vaste librairie de fonctions de régression, le logiciel LAB Fit (Silva & Silva, 1999-2016) est utilisé pour déterminer la fonction mathématique liant l'épaisseur du film d'eau à la température et à l'épaisseur de glace. LAB Fit est un logiciel développé dans Windows pour l'analyse et le traitement des données expérimentales. Il permet de faire des régressions non linéaires par la méthode des moindres carrés et l'algorithme de Levenberg-Marquardt, et sa librairie contient plus de 500 fonctions avec une ou deux variables indépendantes. Il offre également à l'utilisateur l'option d'ajouter sa propre fonction de régression pouvant aller jusqu'à 6 variables indépendantes et 10 paramètres. En utilisant LAB Fit avec les données du Tableau 35, la corrélation de l'Équation 77 a été obtenue et son allure est schématisée à la Figure 53.

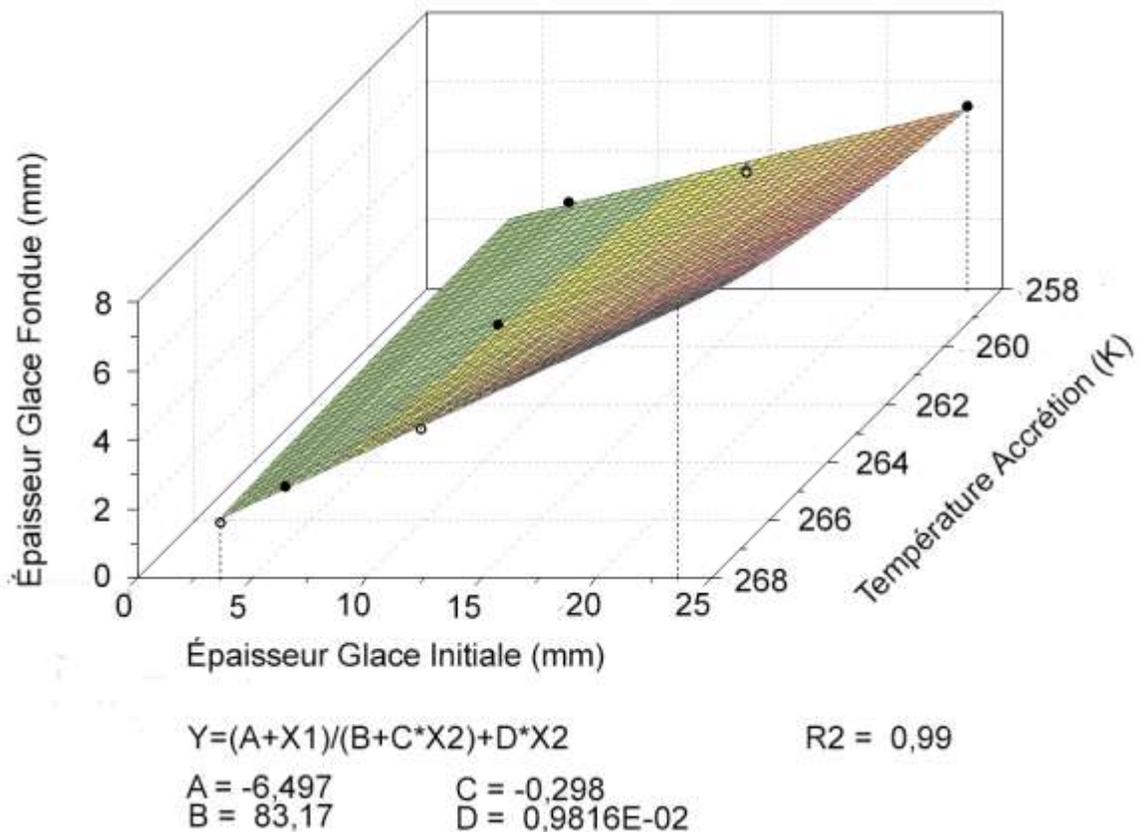


Figure 52: Fonction de régression expérimentale de l'épaisseur du film d'eau en fonction de la température et de l'épaisseur de glace.

L'équation est la suivante ($R^2 = 0,99$) avec une précision de $\pm 15\%$:

$$E_{film} = \frac{(E_{glace} - 6,497)}{(83,17 - 0,298 \cdot T_{\infty})} + 9,816 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\infty} \quad \text{Équation 77}$$

Cette formulation permet d'optimiser les simulations numériques dans les conditions de températures ambiantes entre -5 °C et -15 °C , et les épaisseurs de glace entre 3 cm et 250 cm. En supposant que cette formulation est extrapolable, afin d'obtenir une épaisseur de glace fondue de 40 mm, comme le propose la règle du pouce présentée au paragraphe 5.2 MODÉLISATION, il faudrait une épaisseur de glace plus ou moins égale à 3,5 m ; ce qui n'est pas réaliste. Ceci démontre le gain significatif dans l'estimation de la quantité de chaleur nécessaire au dégivrage.

5.4.2 ESTIMATION DE LA DURÉE DU DÉGIVRAGE

L'estimation de l'épaisseur du film d'eau nécessaire pour faire tomber la glace nécessite la connaissance de l'épaisseur initiale de la glace, mais cette information n'est pas disponible pour un exploitant de parc. Étant donné, la nature de ce projet et son étroite relation avec l'industrie éolienne, il a été entrepris de trouver une formulation qui permettrait à un exploitant de parc de déterminer la durée de dégivrage en fonction de la puissance de chauffage et de certains paramètres météorologiques en se basant sur les résultats expérimentaux obtenus en soufflerie. Les informations disponibles pour l'exploitant de parc sont la puissance de chauffage, la durée de l'événement givrant et la température ambiante. Dans ce paragraphe, il sera donc proposer une relation entre ces trois paramètres principaux et la durée du dégivrage.

5.4.2.1 ESSAIS À -5 °C ET -15 °C

En reprenant les expériences à -5 °C et -15 °C présentées dans la section précédente, il est également possible de représenter la variation du temps de dégivrage en fonction de la puissance de chauffage et de la durée d'accrétion.

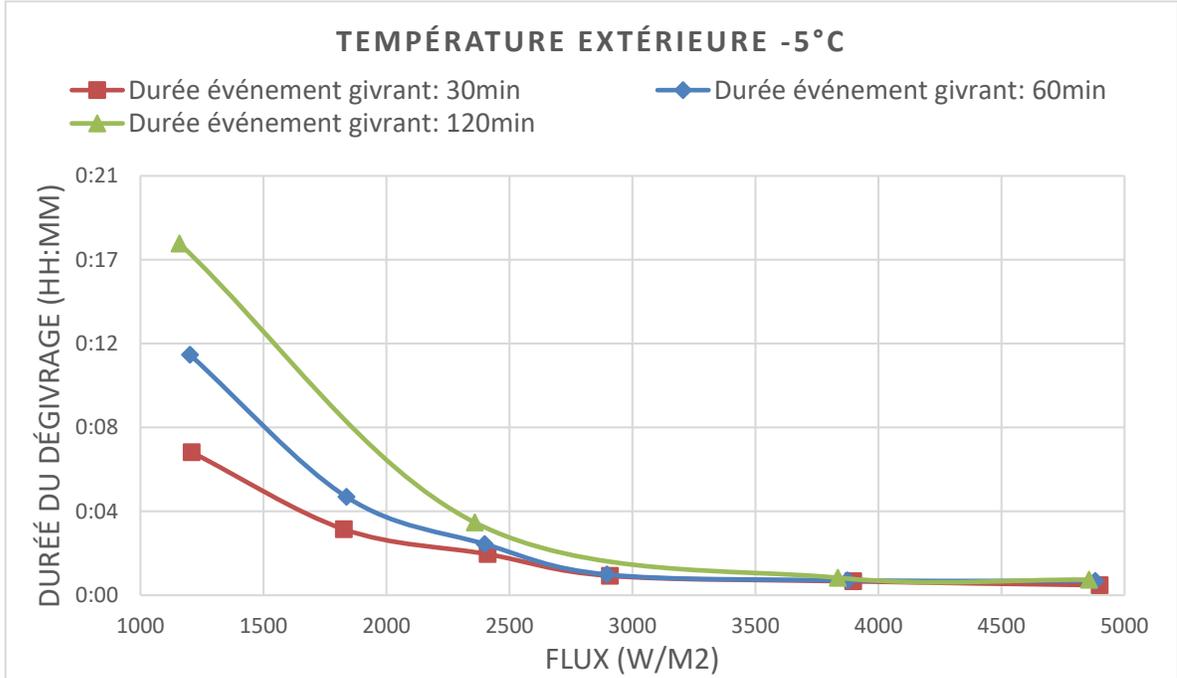


Figure 53: Variations de la durée du dégivrage en fonction de la quantité de chauffage à -5 °C après des événements givrants de durées 30 min, 60 min et 120 min à 0.3 g/m³.

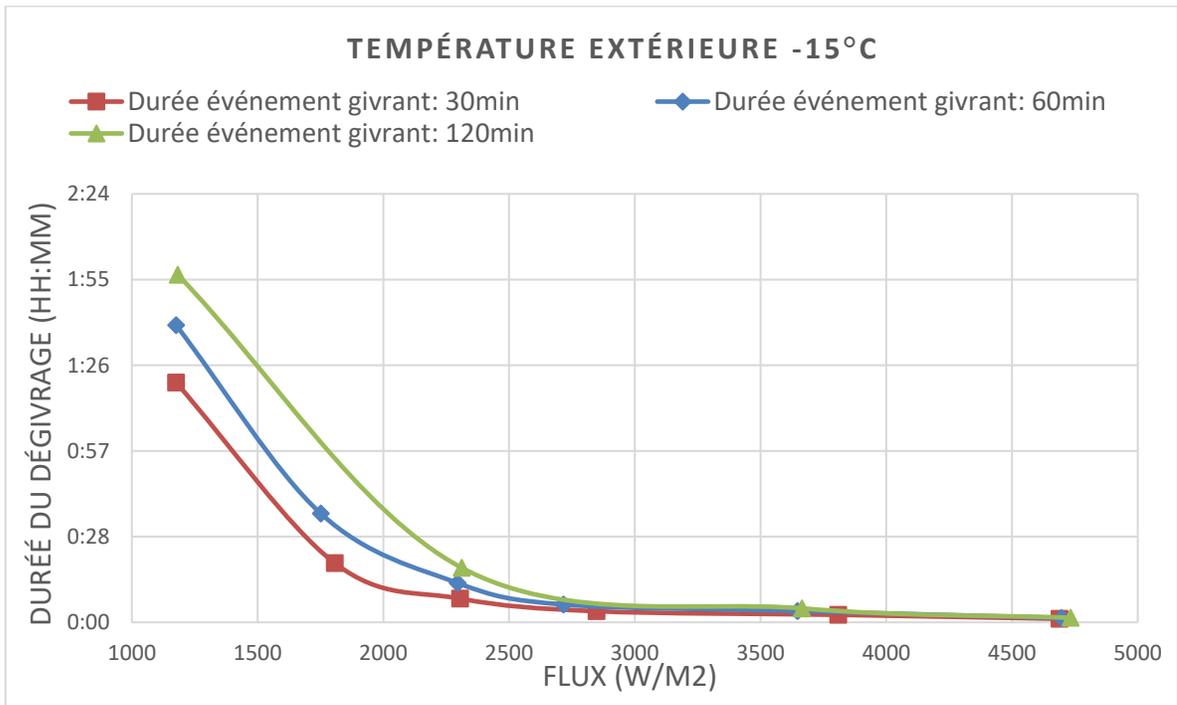


Figure 54: Variations de la durée du dégivrage en fonction de la quantité de chauffage à -15 °C après des événements givrants de durées 30 min, 60 min et 120 min à 0.3 g/m³.

Les allures des courbes présentées à la Figure 54 et à la Figure 55 (qui représentent les variations de la durée du dégivrage en fonction de la puissance de chauffage à respectivement -5 °C et -15 °C) indiquent que :

- Plus la puissance de chauffage est élevée, moins long est le temps de récupération ;
- Et, plus la durée de l'événement givrant est faible, plus faible est le temps de récupération.

5.4.2.2 ESSAIS À DURÉE CONSTANTE

Ici, les allures des courbes représentant le temps nécessaire pour le dégivrage en fonction de la puissance de chauffage fournie pour des événements givrants identiques du point de vue de leur durée (60 min) avec une vitesse de vent de 10 m/s et une teneur en liquide de 0,3 g/m³ sont observées à la Figure 56. Les températures varieront entre -2 °C, -5 °C, -10 °C, -15 °C et -20 °C.

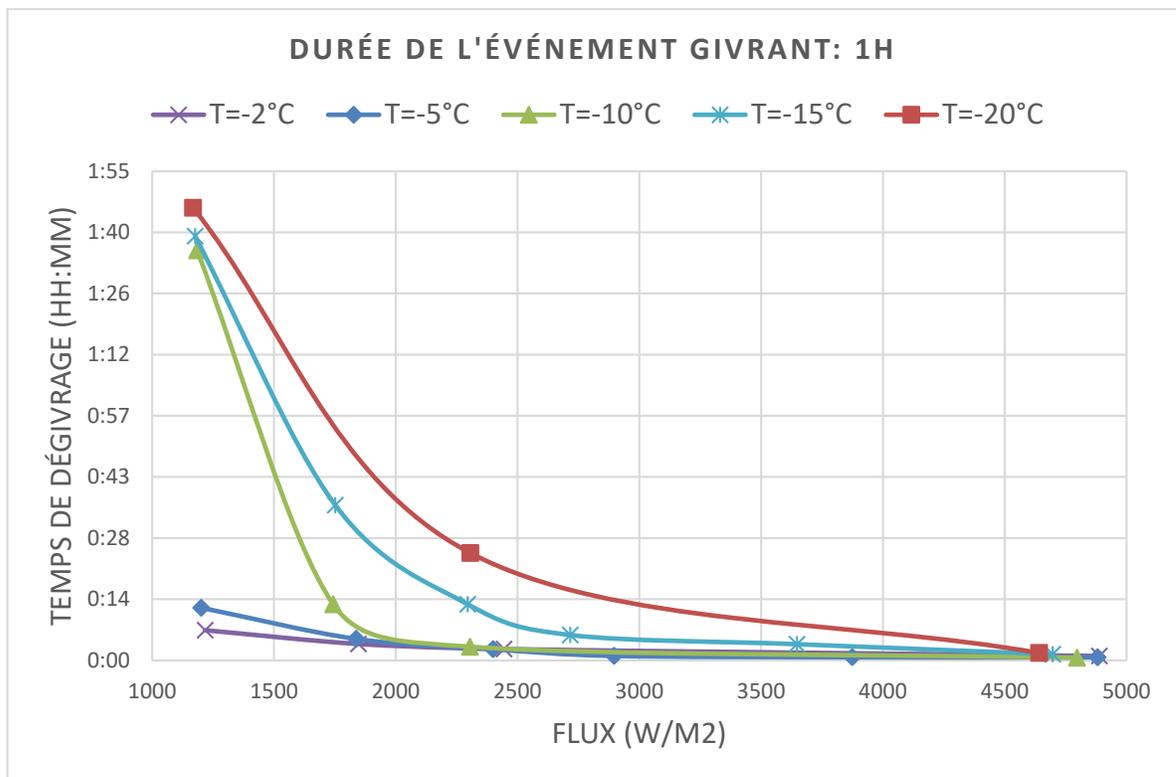


Figure 55: Variations de la durée du dégivrage en fonction de la quantité de chauffage à -15 °C après des événements givrants de durées 30 min, 60 min et 120 min à 0.3 g/m³.

La durée du dégivrage augmente avec la baisse de la température ambiante ce qui est cohérent. Deux tendances asymptotiques ressortent, l'une lorsque la puissance est très élevée et l'autre lorsqu'elle est très faible.

5.4.2.3 ANALYSE DES RÉSULTATS

En utilisant le logiciel Lab Fit comme dans la section précédente, des formulations de la durée du dégivrage en fonction de la puissance de chauffage et de la durée d'accrétion pour les températures de -5 °C et -15 °C sont générées. Ces formules sont consolidées en une seule parce que les fonctions d'interpolation du logiciel Lab Fit sont limitées à deux variables ; les fonctions obtenues sont les suivantes :

- À -5 °C ($R^2 = 0,98$) avec une précision $\pm 10\%$, l'Équation 78 est obtenue et son allure est représentée ci-dessous (Figure 57) :

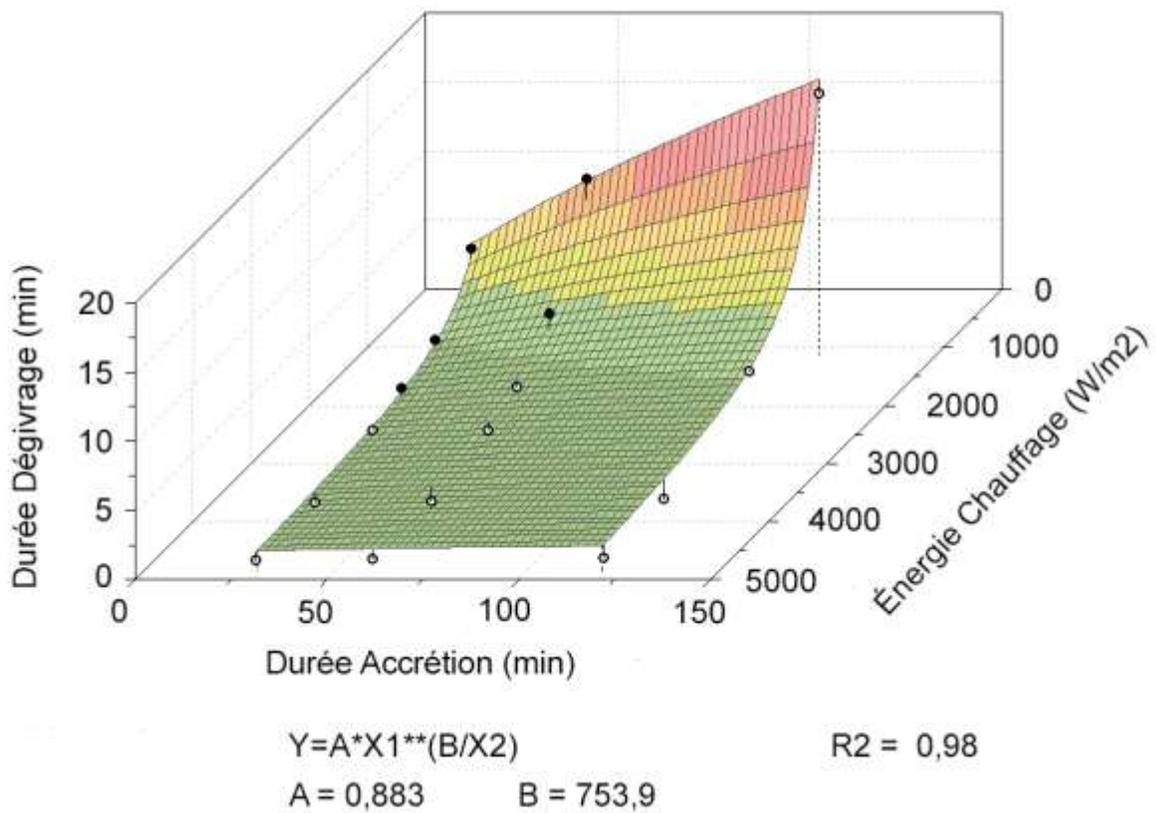


Figure 56: Fonction d'interpolation de la durée de dégivrage en fonction de la durée d'accrétion et de la puissance de chauffage à -5 °C.

$$D_{degivrage} = 0,883 \left(D_{accrétion}^{\frac{753,9}{q_{chauffage}}} \right) \quad \text{Équation 78}$$

- À -15 °C ($R^2 = 0,91$) avec une précision $\pm 10\%$, l'Équation 79 est obtenue est son allure est représentée ci-dessous (Figure 57). La régression de 0,91 a été acceptée dans ce cas parce que les écarts significatifs entre l'interpolation et les mesures s'observaient en dessous de 1000 W/m², qui est une puissance de chauffage rarissime pour les opérations de dégivrage.

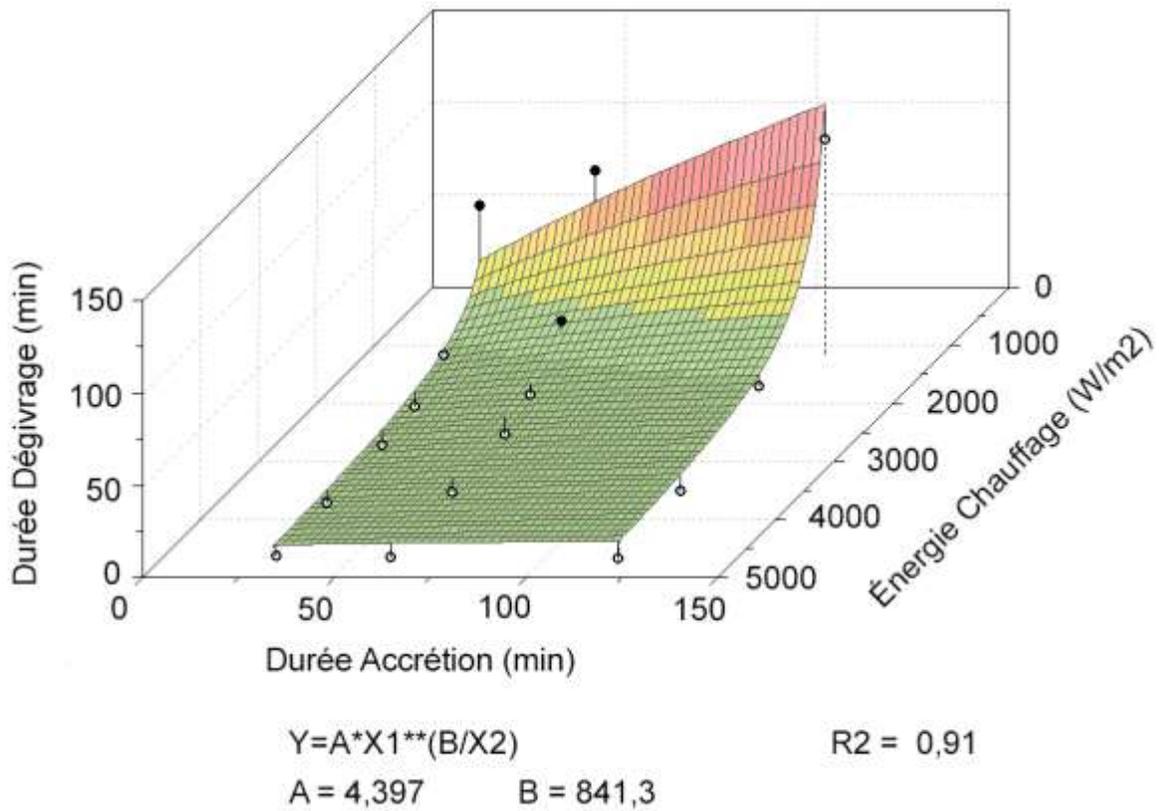


Figure 57: Fonction d'interpolation de la durée de dégivrage en fonction de la durée d'accrétion et de la puissance de chauffage à -15 °C.

$$D_{degivrage} = 4,397 \left(D_{accrétion} \frac{841,3}{q_{chauffage}} \right) \quad \text{Équation 79}$$

Les constantes dans ces équations (Équation 78 et Équation 79) sont des fonctions de la température.

5.5 EXTRAPOLATION À UNE ÉOLIENNE

Pour clore ce chapitre, nos résultats seront extrapolés à une éolienne réelle afin d'avoir les outils nécessaires pour comparer les coûts du dégivrage à ceux de l'antigivrage. Il sera supposé pour ce faire que :

- L'éolienne est chauffée sur tout le long de son rayon : en général, seul le premier tiers est chauffé, car c'est la partie où s'accumule le plus de glace à cause de la vitesse radiale mais un cas plus complet sera étudié.
- La largeur de l'élément chauffant est constante et égale à 0,25 m : elle a été prise arbitrairement, mais tout en se basant sur des tests de bandes chauffantes effectuées par un manufacturier au Technocentre Éolien.
- Le flux de chaleur est de 3000 W/m²: conformément à nos observations expérimentales et aux résultats de (Mayer, et al., 2007).
- La turbine éolienne est arrêtée au cours de l'événement givrant.

Les éoliennes considérées seront les mêmes que celles étudiées dans la section de l'étude d'antigivrage. Rappelons également que la précipitation considérée se caractérise par une teneur en eau liquide de 0,3 g/m³ et une durée de deux heures. En plus de l'énergie nécessaire pour faire chuter la glace, la perte due à l'arrêt de production sera considérée ; ce qui reflète le cas le plus couramment observé où le dégivrage se fait lorsque l'éolienne est arrêtée.

La quantité de chaleur fournie par chauffage s'exprime en kWh selon la formule suivante :

$$E_{chauffage} = S \cdot q_{degivrage} \cdot D_{degivrage} \quad \text{Équation 80}$$

Tandis que la perte de production, en considérant une durée de changement $D_{opération}$ (arrêt et remise en service de 15 min approximativement, en supposant qu'il n'y a pas de problème de redémarrage à froid), est estimée comme suit :

$$E_{perte} = Q_{production} \cdot (D_{degivrage} + D_{opération}) \quad \text{Équation 81}$$

Les pertes dues aux arrêts de production durant l'événement givrant ne sont pas comptabilisées parce qu'elles ne sont pas nécessaires pour tirer nos conclusions. Ce temps d'opération a été estimé en se basant sur des observations effectuées au Technocentre Éolien.

5.5.1 ÉTUDE DE CAS : VESTAS V90-3MW

La première étape consiste à déterminer la durée du dégivrage en utilisant les formules proposées précédemment, soit $D_{accrétion} = 120$ et $q_{chauffage} = 3000 \text{ W/m}^2$.

À -5 °C
(Cf. Équation 78)

$$D_{degivrage,-5} = 0,88 \left[120 \left(\frac{753,9}{3000} \right) \right] = 2,94 \pm 15\% \approx 3 \text{ min}$$

À -15 °C
(Cf. Équation 79)

$$D_{degivrage,-15} = 4,4 \left[120 \left(\frac{841,3}{3000} \right) \right] = 16,84 \pm 15\% \approx 19 \text{ min}$$

La durée du dégivrage ainsi connue, l'énergie nécessaire pour le dégivrage peut ensuite être calculée :

(Cf. Équation 80)

$$E_{chauffage,-5} = 3 * (45 * 0,25) * 3000 * \frac{3}{60} = 5,03 \text{ KWh}$$

$$E_{chauffage,-15} = 3 * (45 * 0,25) * 3000 * \frac{19}{60} = 32,06 \text{ KWh}$$

Finalement, le calcul de la perte due à l'arrêt de production :

$$E_{perte,-5} = 3000 * \frac{(3 + 15)}{60} = 900 \text{ KWh}$$

(Cf. Équation 81)

$$E_{perte,-15} = 3000 * \frac{(19 + 15)}{60} = 1700 \text{ KWh}$$

À -5 °C, suite à une précipitation givrante d'une durée de deux heures dans les conditions indiquées précédemment, il faudrait 5,03 kWh pour faire chuter la glace accumulée et le temps d'arrêt occasionnerait une perte de production de 900 kWh.

5.5.2 ÉTUDE DE CAS ÉLARGIE

Par analogie au paragraphe précédent, l'énergie nécessaire au dégivrage pour les six autres turbines éoliennes (Meier & Scholz, 2010; Butterfield, et al., 2009; Gipe, 2009; Vestas, 2009; Vestas, 2002) est calculée. Ces estimations sont présentées dans les Tableau 36 et Tableau 37 ci-dessous.

Tableau 36: Énergie requise pour le dégivrage à -5 °C.

	Rayon (m)	Production éolienne (kW)	Durée de chauffage (min)	Énergie de dégivrage (kWh)	Perte de production (kWh)	Énergie totale de dégivrage (kWh)
ENERCON E40	20	600	3	2,25	180	182,25
Vestas V47	23,5	660	3	2,64	198	200,64
Vestas V66	33	1650	3	3,71	495	498,71
Vestas V80	40	2000	3	4,50	600	604,50
Vestas V90	45	3000	3	5,03	900	905,03
Vestas V100	50	2750	3	5,63	825	830,63
Vestas V120	60	4500	3	6,75	1350	1356,75

Tableau 37: Énergie requise pour le dégivrage à -15 °C.

	Rayon (m)	Production éolienne (kW)	Durée de chauffage (min)	Énergie de dégivrage (kWh)	Perte de production (kWh)	Énergie totale de dégivrage (kWh)
ENERCON E40	20	600	19	14,25	180	194,25
Vestas V47	23,5	660	19	16,74	198	214,74
Vestas V66	33	1650	19	23,51	495	518,51
Vestas V80	40	2000	19	28,50	600	628,50
Vestas V90	45	3000	19	32,06	900	932,06
Vestas V100	50	2750	19	35,63	825	860,63
Vestas V120	60	4500	19	42,75	1350	1392,75

5.5.3 ANALYSE DES RÉSULTATS

Ces tableaux montrent que la puissance nécessaire pour dégivrer une éolienne est très faible comparée à l'énergie produite par l'éolienne (approximativement 2 % à -15 °C) ; toutefois, en rajoutant la production d'énergie perdue lors du dégivrage, la somme totale d'énergie utilisée pour le dégivrage et du manque de production augmente le total à 31 % à -5 °C et à 56 % à -15 °C (Figure 58). Ces valeurs sont approximativement le double de la consommation d'un système antigivre.

Selon ces résultats, et considérant le fait que les nouvelles éoliennes sont conçues pour être plus robustes, la meilleure alternative pour lutter contre le givre avec un système électrothermique serait un dégivrage intermittent ; c'est-à-dire laisser la glace s'accumuler sur les pales et, à partir d'un certain seuil, arrêter et dégivrer. Il y a donc un équilibre à trouver pour l'opérateur de parc entre :

- L'importance d'avoir une production d'énergie ininterrompue ;
- Et le seuil de stress mécanique (dû aux masses de glaces) acceptable ;
- Tout en tenant compte de la fréquence des événements givrants.

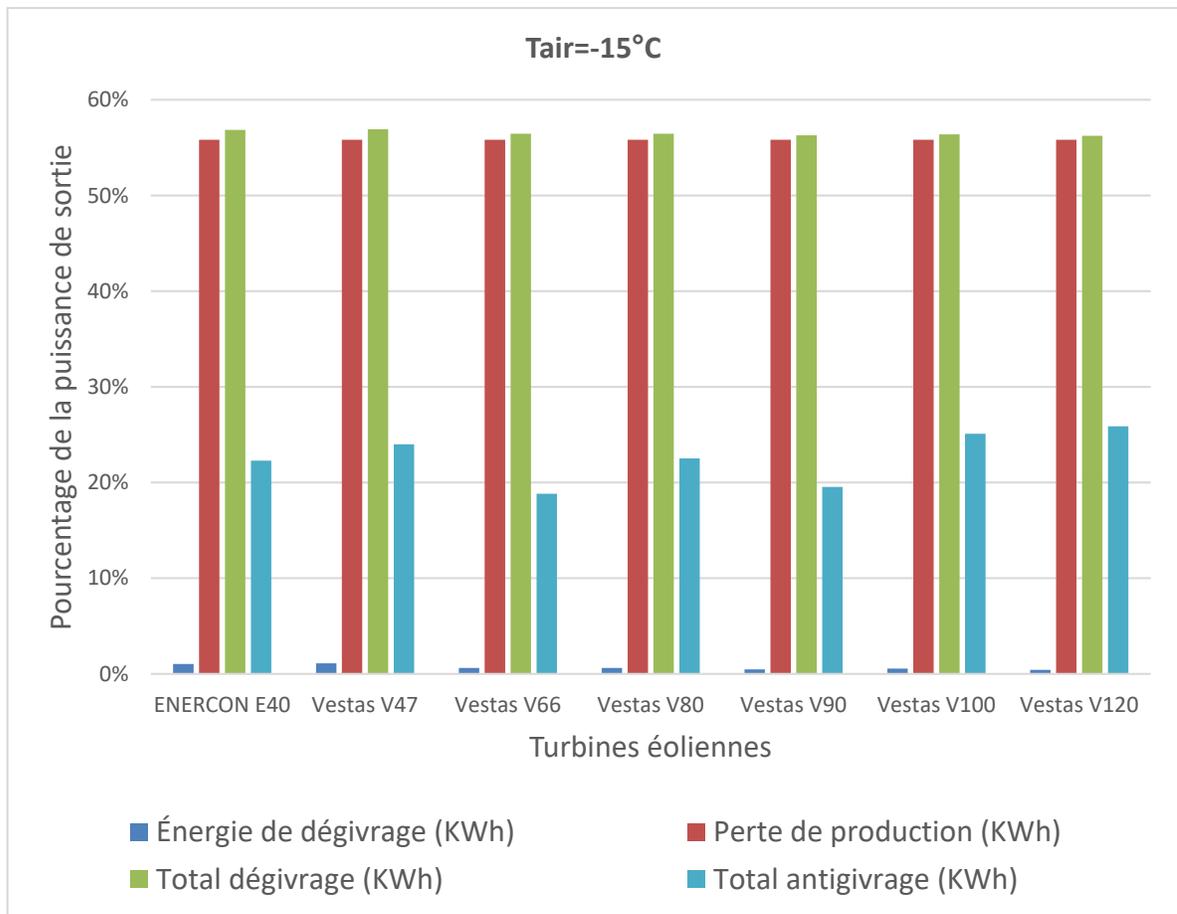


Figure 58: Histogramme comparatif des puissances de dégivrage par rapport à la puissance nécessaire à l'antigivrage à -15 °C.

Les pertes dues à l'arrêt de production durant l'événement givrant n'ont pas été comptabilisées parce que les nouvelles éoliennes sont conçues plus robustes pour supporter de lourdes charges de glace. Il serait donc possible de ne pas arrêter l'éolienne durant cette période. Par contre, l'accumulation de glace ne serait plus uniforme le long de la pale ; et il faudrait une étude séparée de ce cas de figure.

Dans ce chapitre et le précédent, il a été proposé des outils qui permettent de comparer les deux modes d'opération existants pour la protection contre le givre par des méthodes

électrothermiques, à savoir : l'antigivrage et le dégivrage. Des recommandations finales concernant la meilleure stratégie à adopter seront faites dans le chapitre final de ce rapport.

Mais avant cela, il sera évoqué un dernier aspect, soit la comparaison et le choix d'un système de protection contre le givre adéquat en fonction des conditions sur un site donné. En effet, la consommation énergétique n'est pas l'unique paramètre qu'il convient de prendre en compte lors du choix d'un système de protection contre le givre. Il faut également considérer l'efficacité de la protection, l'usure, les risques de sécurité, les coûts d'investissement et de maintenance, etc. Le prochain chapitre s'intéressera à cette problématique ; un moyen de caractériser les systèmes de protection contre le givre sera détaillée et grâce à l'utilisation d'une méthode d'analyse multicritère il sera possible d'évaluer chaque système de protection contre le givre afin de déterminer le plus convenable pour les conditions d'un site donné.

CHAPITRE 6

COMPARAISON DES SYSTÈMES DE PROTECTION CONTRE LE GIVRE

6.1 CRITÈRES DE COMPARAISON

Les critères de comparaison des systèmes de protection contre le givre peuvent être subdivisés en deux catégories ; à savoir, les contraintes et les paramètres.

6.1.1 CONTRAINTES

Les contraintes sont des critères de comparaison binaires (deux situations possibles : le critère est validé ou non validé). Elles constituent le premier filtre lors du choix d'un système de protection contre le givre. Tous les systèmes de protection contre le givre ne respectant pas au moins une contrainte seront exclus. Notre étude a permis de répertorier les contraintes suivantes.

6.1.2 LA CAPACITÉ DE RETROFIT

Certains systèmes de protection contre le givre peuvent s'installer une fois que l'éolienne est en place (comme les revêtements ou les systèmes électrothermiques de surface), d'autres doivent impérativement être installés lors de la construction de l'éolienne (comme les systèmes électrothermiques de profondeur ou d'injection d'air chaud). Ainsi, dans un parc éolien existant, seuls les systèmes capables d'être installés en retrofit seront considérés.

6.1.3 NÉCESSITÉ D'UN ARRÊT DE L'ÉOLIENNE

Pour faire fonctionner un système de protection contre le givre (en dégivrage), l'opérateur peut être amené à arrêter les éoliennes. Plusieurs contraintes peuvent conduire à cette situation :

- Un risque de chute de glace trop important (le rayon de projection peut facilement atteindre 200 m) ;

- Une consommation énergétique trop importante pour à la fois faire fonctionner les moteurs de l'éolienne (inclinaison des pales) et le système de protection contre le givre.

6.1.4 LA CAPACITÉ DE PUISSANCE DES MOTEURS AUXILIAIRES DE L'ÉOLIENNE

Il s'agit d'une contrainte reliée à la turbine éolienne sur laquelle sera installé le système de protection contre le givre. En effet, la capacité de puissance, ou l'appel de puissance qu'il est possible d'obtenir de l'éolienne, va conditionner deux situations : la possibilité de faire fonctionner le système de protection contre le givre sur les trois pales en même temps et la densité de puissance maximale que le système de protection contre le givre pourra utiliser. Généralement, les systèmes de protection actifs contre le givre sont branchés sur les moteurs d'inclinaison des pales. C'est donc le dimensionnement de ce moteur qui est évalué dans ce paramètre. Il s'agit d'une contrainte qui s'applique uniquement aux systèmes de protection installés en retrofit.

6.1.5 LA SÉVÉRITÉ DU GIVRAGE

Ce sont les pertes de production engendrées par les événements givrants lorsqu'aucun dispositif de protection contre le givre n'est installé. Ce critère permet non seulement de classer le site suivant la sévérité du givrage (selon l'IEA il existe 5 classes de givre), mais également d'effectuer le choix de la technologie la mieux adaptée. Par exemple, certains revêtements ne sont adaptés que pour des cas de givre léger.

6.2 PARAMÈTRES

Les paramètres sont en général des critères relatifs au système de protection contre le givre lui-même ou à son fonctionnement.

6.2.1 LE FLUX THERMIQUE

C'est la quantité d'énergie que le dispositif fournit par mètre carré : plus ce flux est important, plus la protection est efficace. Ce paramètre dépend de la contrainte relative aux moteurs auxiliaires de l'éolienne.

6.2.2 LE MODE DE FONCTIONNEMENT

Ce paramètre évalue la possibilité que la turbine éolienne et le dispositif de protection de fonctionnent simultanément. Contrairement à la contrainte 6.1.3, ce paramètre concerne le dispositif lui-même et non les contraintes de l'opérateur. Par exemple, un dispositif peut être capable de fonctionner simultanément avec l'éolienne, mais à cause de la proximité des habitations, l'opérateur serait obligé d'arrêter l'éolienne avant de mettre en marche le dispositif pour éviter de nuire à l'entourage.

6.2.3 LE CONTRÔLE DU SYSTÈME

Les dispositifs de protection contre le givre actif sont nécessairement couplés à un contrôleur. Deux paramètres associés à cette notion de contrôle du système sont considérés :

- La finesse du contrôle : le contrôleur fourni avec le système de protection contre le givre peut posséder un ou plusieurs scénarios de fonctionnement permettant d'optimiser la protection contre le givre, et donc de réduire les coûts d'exploitation ;
- Le degré d'automatisation : ce critère quantifie le degré d'expertise nécessaire par l'opérateur pour faire fonctionner le dispositif.

À noter que l'efficacité du contrôleur est incluse dans la notion d'efficacité du système de protection contre le givre.

6.2.4 LA DÉTECTION DU GIVRE

Ce paramètre permet d'évaluer les trois aspects suivants :

- La nécessité d'un dispositif de détection de givre ;
- L'efficacité de la détection ;
- La prévision météorologique : certains détecteurs couplés à des contrôleurs de dernière

génération peuvent prédire les épisodes de givre à très court terme, permettant ainsi de démarrer les systèmes de protection contre le givre en prévention. Par exemple, une chute de température soudaine jumelée à un taux d'humidité élevé indique une forte probabilité qu'un événement givrant survienne.

6.2.5 LE DEGRÉ DE MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE

Ce paramètre évalue le temps de présence sur le marché, le nombre de vendeurs qui proposent la technologie, ou encore le type de fabricant. Les technologies de protection contre le givre peuvent être proposées par des turbiniers, des spécialistes de systèmes de protection contre le givre pour les éoliennes, ou d'autres spécialistes (manufacturiers aéronautiques). Actuellement, les technologies disponibles ont un degré de maturité allant de faible à moyen.

6.2.6 LA DURÉE DE VIE DU SYSTÈME

Ce paramètre comprend la durée de vie du système, telle qu'indiquée par le fabricant. Les revêtements, par exemple, ont une faible durée de vie (entre 1 et 5 ans) tandis que les dispositifs actifs ont une durée de vie plus élevée (entre 15 et 20 ans ; même durée de vie que la turbine éolienne).

6.2.7 EFFICACITÉ DE LA PROTECTION

L'efficacité d'un système de protection contre le givre est le rapport entre la production énergétique obtenue avec ce système et la production obtenue sans le dispositif. Elle est également fonction des conditions environnementales. Ce paramètre est donc lié à l'évaluation des pertes annuelles dues au givre. Dans le cas d'un système actif, l'efficacité de sa protection prend également en compte l'efficacité de son contrôleur.

6.2.8 LE RISQUE D'USURE PRÉMATURÉ

Un système de protection électrothermique est très sensible aux effets de la foudre et peut dans certaines situations être endommagé même en présence de parafoudre. Si, en plus, le dispositif est intégré à la pale, il est impossible de le réparer. Ceci implique des coûts élevés de réparation. Ce paramètre évalue également la maturité de la technologie.

6.2.9 LE COÛT D'INVESTISSEMENT

Le coût d'investissement est le coût initial de la mise en place du système de protection contre le givre. Il comprend principalement :

- Les frais d'étude et d'analyse ;
- Les frais liés à la construction : location de grues, installation de chantier, etc. ;
- Le coût des équipements : le dispositif lui-même, les capteurs, le parafoudre, les dispositifs de surveillance (caméras ...) ;
- Le coût de montage et d'installation ;
- Les frais d'aménagement sur le terrain ;
- Les honoraires des entrepreneurs ;
- Les pertes de production durant la période d'installation ;

- Les coûts de démarrage : pertes de production, mauvais fonctionnement, formation des opérateurs, etc. ;
- Les imprévus.

6.2.10 LE COÛT D'OPÉRATION

Ce sont les frais associés à l'exploitation du dispositif. Il comprend :

- Le coût des besoins énergétiques ;
- Le coût en matières premières et consommables (antigel ...) ;
- Le coût des besoins en ressources humaines (salaires ...) ;
- Les licences ou taxes requises pour l'utilisation du dispositif ;
- Les coûts d'exploitation peuvent être partagés entre les coûts fixes (salaires) et les coûts variables (quantité d'énergie ou d'antigel).

6.2.11 LE COÛT MAINTENANCE

La maintenance peut être préventive ou corrective. Le paramètre de maintenance est lié aux notions de maintenabilité, de fiabilité et de durée de vie du dispositif. Voici les principaux aspects à prendre en compte dans l'estimation du coût de maintenance :

- Les pertes associées au temps d'arrêt lors de la maintenance (la durée nécessaire pour effectuer une maintenance) ;
- Le coût et la disponibilité des pièces de rechange ;
- Le coût de l'expertise nécessaire pour effectuer les travaux de maintenance ;
- La fréquence des opérations de maintenance.

6.2.12 LE NIVEAU DE RISQUE DE DÉLESTAGE DE GLACE

La sécurité des personnes et des biens aux alentours d'un parc éolien doit être la principale priorité de tout projet. En fonction des conditions météorologiques, il est possible d'estimer les zones

à risque de délestage de glace. L'aire de la surface délimitant ces zones à risque est plus importante lorsque le dispositif de protection contre le givre fonctionne sans arrêt des éoliennes. La connaissance de ces limites de délestage entre en jeu lors du choix du dispositif, surtout lorsque le site d'intérêt n'est pas isolé.

6.2.13 LE NIVEAU DE RISQUE POUR L'ÉOLIENNE

Des études récentes montrent que les dispositifs de chauffage électrothermique, par exemple, ne doivent pas dépasser un certain seuil de température afin de ne pas altérer les propriétés intrinsèques de la résine dont sont faites les pales d'éolienne. Le système de protection contre le givre peut donc présenter un risque pour l'éolienne. Ces risques encourus sont propres à chaque dispositif, mais de manière générale il existe :

- Les risques d'incendie et de surchauffe ;
- Les risques liés à un débalancement de l'éolienne (mauvaise répartition des charges) ;
- Les risques liés à une modification de l'aérodynamisme de l'éolienne ;
- Les risques d'usure anticipée des matériaux et des équipements ;
- Ce paramètre est indirectement lié à la performance de la stratégie de contrôle utilisée

par le dispositif de protection contre le givre.

6.2.14 L'EMPREINTE CARBONE DU SYSTÈME

Il s'agit d'évaluer le mode de fabrication du dispositif. Plus l'empreinte est faible, meilleur est le système d'un point de vue environnemental.

6.2.15 LA RECYCLABILITÉ DU SYSTÈME

La recyclabilité du système est la possibilité de le recycler en fin de vie. Ce paramètre dépend des matériaux de fabrication.

6.2.16 LA POLLUTION SONORE

La pollution sonore est le bruit additionnel causé par l'utilisation ou l'installation du dispositif de protection contre le givre. Le niveau sonore acceptable est réglementé par des normes spécifiques pour chaque site. Il faut donc s'assurer pour les sites non isolés que le dispositif ne causera pas de nuisances sonores.

6.2.17 LA POLLUTION CHIMIQUE

La pollution chimique est l'effet des substances chimiques utilisées par le dispositif sur l'écosystème. L'utilisation de ces substances et leur quantité est aussi sujette à des normes environnementales strictes.

6.3 ANALYSE MULTICRITÈRE

L'analyse multicritère est un outil de prise de décision qui sera utilisée pour classer les systèmes de protection contre le givre suivant les paramètres définis au paragraphe précédent.

6.3.1 CHOIX DE LA MÉTHODE D'ANALYSE MULTICRITÈRE HIÉRARCHIQUE AMCH (AHP)

Cette méthode a été sélectionnée pour les raisons suivantes :

- Notre problème a une disposition hiérarchique ;
- Les éléments sont groupés de manière logique et cohérente ;
- Cette méthode suit une démarche analytique robuste et permet de vérifier la cohérence des pondérations ;
- Finalement, elle est facile à implémenter et ne nécessite pas un logiciel spécialisé.

Toutefois, même si la méthode d'analyse multicritères hiérarchique donne de bons résultats, ce n'est pas la méthode d'analyse multicritères la plus performante ; les méthodes ELECTRE et PROMETHEE, par exemple, sont plus performantes.

6.3.2 APPLICATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE MULTICRITÈRE HIÉRARCHIQUE

AMCH

6.3.2.1 IMPORTANCE DES CRITÈRES

L'importance de chaque critère par rapport à un autre est définie selon l'échelle suivante (Tableau 38) :

Tableau 38: Échelle d'importance des critères.

Appréciation	Degré d'importance
est d'égale importance que	1
est de faible importance par rapport à	2
est de moyenne importance par rapport à	3
est de forte importance par rapport à	4
est de très forte importance par rapport à	5
est d'extrême importance par rapport à	6

6.3.2.2 HIÉRARCHIE DES CRITÈRES

Les critères de comparaison énumérés au chapitre précédent ont été regroupés et classés comme suit :

Tableau 39: Hiérarchie des critères.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Paramètres opérationnels	Flux thermique (+)	
	Mode de fonctionnement (+)	
	Contrôle du système	Finesse de contrôle (+)
		Degré d'automatisation (+)
Paramètres techniques	Détection du givre (+)	
	Degré de maturité de la technologie (+)	
	Durée de vie du système (+)	
	Risque d'usure prématurée (-)	
	Variation de la sévérité de l'efficacité en fonction de la sévérité du givrage (+)	
Paramètres de coûts	Coûts fixes	Coût d'investissement (-)
		Coûts de maintenance (-)
	Coûts variables : coûts opérationnels (-)	
Paramètres d'exploitation	Niveau de risque de délestage de glace (-)	
	Niveau de risque pour l'éolienne (-)	
Paramètres environnementaux	Empreinte carbone	Mode de fabrication (+)
		Recyclabilité (+)
	Niveau de pollution	Pollution sonore (-)
		Pollution chimique (-)

Le signe (+) signifie que le critère est un avantage tandis que le signe (-) signifie qu'il est un inconvénient.

6.3.3.3 MATRICES DES CRITÈRES DE DÉCISION

En utilisant l'échelle ci-dessus, la matrice des critères de décision sera établie pour les critères de même niveau et de même parent. Par exemple, les critères suivants seront comparés entre eux :

- Flux thermique, mode de fonctionnement et système de contrôle ;
- Mode de fabrication et recyclabilité ;
- Autres.

Neuf matrices de critères sont obtenues. Les critères sont entrés à l'entête de chaque matrice (premières ligne et colonne) dans un ordre identique de manière à ce que chaque cellule à l'intérieur de la matrice présente la comparaison entre le critère-ligne et le critère-colonne. Par exemple, si le critère-ligne est de forte importance par rapport au critère-colonne, alors la valeur de la cellule correspondante sera 4, conformément au Tableau 38. Par contre, si c'est le critère-colonne qui est de forte importance par rapport au critère-ligne alors la valeur de la cellule correspondante sera ¼. Une fois toutes les matrices remplies, le poids de chaque critère est calculé selon l'exemple suivant:

Tableau 40: Exemple de calcul de la pondération des critères.

Paramètres environnementaux	Empreinte carbone	Niveau de pollution	Poids du critère
Empreinte carbone	1	0,25	$\frac{[(1 * 0,2) + (0,25 * 0,8)]}{\text{nombre de critères}} = 0,2$
Niveau de pollution	4	1	$\frac{1}{2} [(4 * 0,2) + (1 * 0,8)] = 0,8$
Somme de la colonne	5	1,25	
(Somme de la colonne) ⁻¹	1/5 = 0,2	1/1,25 = 0,8	

Par analogie avec le calcul ci-dessus, la pondération de tous les critères définis est calculée. Le poids de chaque critère est une valeur normalisée. La comparaison des critères entre eux a été effectuée par un panel d'experts et de techniciens de l'industrie de l'énergie éolienne selon leurs connaissances et expériences. Les pondérations déterminées dans cette étude devraient convenir à

la majorité des parcs éoliens, mais les lecteurs qui souhaiteraient appliquer cette méthode devraient suivre le même processus afin de déterminer des pondérations appropriées à leurs conditions et ne pas systématiquement appliquer les valeurs fournies dans cette étude.

Selon le Tableau 42, trois niveaux de critères sont obtenus et dix matrices de critères (Tableau 44, Tableau 45, Tableau 46, Tableau 47, Tableau 48, Tableau 49, Tableau 50, Tableau 48, Tableau 49 et Tableau 50) comme suit:

- Niveau 1

Tableau 41: Matrice des critères généraux.

Critères généraux	Paramètres opérationnels	Paramètres techniques	Paramètres de coûts	Paramètres d'exploitation	Paramètres environnementaux	Poids du critère
Paramètres opérationnels	1	0,33	0,5	2	1	0,16
Paramètres techniques	3	1	2	2	1	0,31
Paramètres de coûts	2	0,5	1	2	1	0,21
Paramètres d'exploitation	0,5	0,5	0,5	1	1	0,13
Paramètres environnementaux	1	1	1	1	1	0,19

- Niveau 2

Tableau 42: Matrice des sous-critères opérationnels.

Critères opérationnels	Mode de fonctionnement	Contrôle du système	Flux thermique	Poids du critère
Mode de fonctionnement	1	4	1	0,44
Contrôle du système	0,25	1	0,25	0,11
Flux thermique	1	4	1	0,44

Tableau 43: Matrice des sous-critères environnementaux.

Critères environnementaux	Empreinte carbone	Niveau pollution	Poids du critère
Empreinte carbone	1	0,25	0,2
Niveau pollution	4	1	0,8

Tableau 44: Matrice des sous-critères d'exploitation

Critères d'exploitation	Niveau de risque de délestage de glace	Niveau de risque pour l'éolienne	Poids du critère
Niveau de risque de délestage de glace	1	3	0,75
Niveau de risque pour l'éolienne	1/3	1	0,25

Tableau 45: Matrice des sous-critères de coût.

Critères de coûts	Coûts fixes	Coûts variables	Poids du critère
Coûts fixes	1	3	0,75
Coûts variables	0,33	1	0,25

Tableau 46: Matrice des sous-critères techniques.

Critères techniques	Détection du givre	Degré maturité de la technologie	Durée de vie du système	Risque d'usure prématurée	Efficacité de la protection	Poids du critère
Détection du givre	1	0,25	0,2	0,17	0,25	0,05
Degré de maturité de la technologie	4	1	0,5	0,17	0,5	0,11
Durée de vie du système	5	2	1	0,25	0,25	0,14
Risque d'usure prématurée	6	6	4	1	3	0,47
Efficacité de la protection	4	2	4	0,33	1	0,23

- Niveau 3

Tableau 47: Matrice des sous-critères du contrôle du système.

Contrôle du système	Finesse de contrôle	Degré d'automatisation	Poids du critère
Finesse de contrôle	1	1/3	0,25
Degré d'automatisation	3	1	0,75

Tableau 48: Matrice des sous-critères de l'empreinte carbone.

Empreinte carbone	Mode de fabrication	Recyclabilité	Poids du critère
Mode de fabrication	1	1	0,5
Recyclabilité	1	1	0,5

Tableau 49: Matrice des sous-critères du niveau de pollution.

Niveau pollution	Pollution chimique	Pollution sonore	Poids du critère
Pollution chimique	1	2	0,67
Pollution sonore	1/2	1	0,33

Tableau 50: Matrice des sous-critères de coûts fixes.

Coûts fixes	Maintenance	Investissement	Poids du critère
Maintenance	1	1/5	0,17
Investissement	5	1	0,83

6.3.3.4 ÉTUDE DE CAS

Afin de comparer différentes technologies, une échelle allant de 0 à 5 est utilisée pour chaque paramètre défini dans les matrices définies au paragraphe précédent. Chaque paramètre qui ne s'applique pas aura la note la plus faible. Les paramètres peuvent avoir une influence négative ou positive sur le résultat final. Les techniques les plus populaires actuellement sur le marché sont comparées :

- Les bandes chauffantes placées à l'intérieur des pales ;
- Les bandes chauffantes placées à l'extérieur des pales ;
- L'injection d'air chaud ;
- Les arrêts préventifs ;
- Les revêtements hydrophobes/glaciophobes.

Ces techniques sont les systèmes de protection contre le givre les plus rencontrés dans l'industrie éolienne. Elles ont été évaluées selon la méthodologie présentée précédemment, comme suit:

Tableau 51: Évaluation sans contrainte des technologies de protection contre le givre étudiées.

	Pondération	Bandes chauffantes internes	Bandes chauffantes externes	Injection d'air chaud	Arrêts préventifs	Revêtements
Paramètres opérationnels	0,16					
Flux thermique	0,44	5	5	5	0	0
Mode de fonctionnement	0,44	3	2	4	0	5
Finesse de contrôle	0,0275	5	2	2	1	0
Degré d'automatisation	0,0825	5	5	5	2	0
Sous-total		4,07	3,55	4,43	0,19	2,20
		0,65	0,57	0,71	0,03	0,35
	Pondération	Bandes chauffantes internes	Bandes chauffantes externes	Injection d'air chaud	Arrêts préventifs	Revêtements
Paramètres techniques	0,31					
Détection du givre	0,05	5	5	5	4	0,1
Degré maturité de la technologie	0,11	4	3	5	1	3
Durée de vie du système	0,14	5	2	5	5	3
Risque d'usure prématurée (-)	0,47	0	0	1	3	3
Variation de la sévérité de l'efficacité en fonction de la sévérité du givrage	0,23	5	5	4	4	2
Mise à niveau		Non	Oui	Non	Oui	Oui
Sous-total		2,54	2,01	2,89	3,34	2,63
		0,79	0,62	0,90	1,04	0,81
	Pondération	Bandes chauffantes internes	Bandes chauffantes externes	Injection d'air chaud	Arrêts préventifs	Revêtements

Paramètres de coûts	0,21					
Coût d'investissement (-)	0,6225	1	0	1	4	3
Coûts de maintenance (-)	0,1275	1	3	1	4	4
Coûts variables : coûts d'exploitation (-)	0,25	1	0	0	0	5
Sous-total		1,00	0,38	0,75	3,00	3,63
		0,21	0,08	0,16	0,63	0,76
	Pondération	Bandes chauffantes internes	Bandes chauffantes externes	Injection d'air chaud	Arrêts préventifs	Revêtements
Paramètres d'exploitation	0,13					
Niveau de risque de délestage de glace	0,75	4	1	3	0	0
Niveau de risque pour l'éolienne	0,25	1	0	1	3	4
Sous-total		3,25	0,75	2,50	0,75	1,00
		2,44	0,56	1,88	0,56	0,75
	Pondération	Bandes chauffantes internes	Bandes chauffantes externes	Injection d'air chaud	Arrêts préventifs	
Paramètres environnementaux	0,19					
Mode de fabrication	0,1	1	1	1	0,1	1
Recyclabilité	0,1	3	3	1	5	1
Pollution sonore	0,264	0,1	1	0,1	0,1	0,1
Pollution chimique	0,536	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Sous-total		0,48	0,72	0,28	0,59	0,28
		0,09	0,14	0,05	0,11	0,05
	TOTAL	4,18	1,97	3,69	2,37	2,73

Dans le ci-dessus, les première et deuxième colonnes indiquent respectivement la liste des paramètres et les pondérations correspondant à ces paramètres telles que déterminées au paragraphe précédent. Les 5 colonnes suivantes indiquent les 5 systèmes de protection contre le givre étudiés. À chaque système, une note variant entre 0 à 5 est attribuée pour quantifier sa performance pour chacun des paramètres répertoriés. Une somme pondérée est ensuite effectuée pour obtenir la note globale de chaque système de protection contre le givre étudié. Cette évaluation, sans aucune contrainte appliquée, donne le classement suivant :

- 1er : Les bandes chauffantes placées à l'intérieur des pales ;
- 2e : L'injection d'air chaud ;
- 3e : Les revêtements hydrophobes/glaciophobes ;
- 4e : Les arrêts préventifs ;
- 5e : Les bandes chauffantes placées à l'extérieur des pales.

Les résultats sont ensuite évalués pour différentes combinaisons de contraintes (Tableau 52). Dans le premier cas étudié, un retrofit est nécessaire : ceci élimine les systèmes n'offrant pas de retrofit telles que les bandes chauffantes internes et l'injection d'air chaud. Le reste des contraintes n'influent pas sur le classement précédent. Dans le deuxième cas, un retrofit est nécessaire et la sévérité du givre est élevée : ceci élimine les systèmes n'offrant pas de retrofit et les systèmes qui sont inefficaces lorsque le givre est sévère tels que les revêtements. Le troisième cas est similaire au second, sauf pour que l'exploitant de parc ne souhaite pas arrêter l'éolienne (mode antigivrage uniquement) : ceci laisse une seule option, les résistances chauffantes à l'extérieur. Dans le 4^{ème} cas, le retrofit n'est pas nécessaire et la sévérité du givre est supérieure à la moyenne : ceci élimine les revêtements à cause de leur inefficacité dans de telles conditions.

Tableau 52: Étude de l'évaluation avec diverses contraintes des technologies de protection contre le givre.

	Retrofit nécessaire	Capacité de puissance	Arrêt de l'éolienne	Sévérité du givrage (sur 5)	Classement des Techniques				
					Bande chauff. int.	Bande chauff. ext.	Inject. d'air chaud	Arrêts préventifs	Revêtements
Cas 1	Oui	Faible	Oui	2	S.O.	3 ^e	S.O.	2 ^e	1 ^{er}
Cas 2	Oui	Élevée	Oui	5	S.O.	2 ^e	S.O.	1 ^{er}	S.O.
Cas 3	Oui	Élevée	Non	5	S.O.	1 ^{er}	S.O.	S.O.	S.O.
Cas 4	Non	Élevée	Oui	4	1 ^{er}	4 ^e	2 ^e	3 ^e	S.O.

6.4 CONCLUSION

Le marché des dispositifs de protection contre les effets du givrage dans les parcs éoliens est en plein essor. Toutefois, aucune des technologies utilisées n'est mature et plusieurs concepts prometteurs sont encore en cours d'expérimentation. Les technologies les plus connues sont les revêtements hydrophobes/glaciophobes, les bandes chauffantes, l'injection d'air chaud et les arrêts préventifs. Les autres technologies en développement sont les ultrasons, les liquides antigel, les infrarouges et les micro-ondes.

Face à cette variété de dispositifs, choisir l'équipement adéquat est aussi vital que périlleux. Une nouvelle méthode objective a été donc développée de sélection basée sur une liste exhaustive de critères et de paramètres prédéfinis. Cette méthode et ces paramètres proposés sont basés sur la connaissance des caractéristiques pertinentes des dispositifs de

protection contre le givre et les contraintes rencontrées par les opérateurs et sont censés devenir un standard dans l'industrie pour la caractérisation et la comparaison des dispositifs de protection contre le givre.

Néanmoins, les résultats suggérés par cette méthode doivent être examinés plus en détail avant d'effectuer un choix définitif, notamment en ce qui concerne le retour sur investissement. Les pondérations utilisées dans cette étude s'appliquent à un site donné et ne devraient en aucun cas être utilisées pour un autre site. Chaque site a ses particularités, c'est pourquoi chaque étude doit être conduite indépendamment.

CHAPITRE 7

CONCLUSION

Le projet présenté dans cette thèse a pour but de répondre aux questions des opérateurs de parcs éoliens en matière de protection contre les effets du givre. Il a été mené en partenariat avec le Laboratoire International des Matériaux Antigivres de l'Université du Québec à Chicoutimi, du Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne de l'Université du Québec à Rimouski et du Technocentre Éolien de Gaspé.

Le premier volet étudié consistait à proposer des moyens d'estimation de la quantité d'énergie requise pour une opération d'antigivrage. Dans ce cadre, il a été proposé une formulation semi-empirique existante qui permettait de calculer l'énergie nécessaire pour maintenir une plaque plane soumise à un écoulement d'air à une température de surface constante. À cette expression, a été intégré la présence d'eau pour obtenir une nouvelle formulation applicable aux pales d'éoliennes.

Nos simulations ont montré que la consommation énergétique en antigivrage représentait pour un Vestas V90-3MW, à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et pour une teneur en eau liquide de $0,9\text{ g/m}^3$ approximativement 4,5 % de l'énergie nominale produite pour l'éolienne. Tandis qu'à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ et pour une teneur en eau liquide de $0,9\text{ g/m}^3$, cette consommation augmentait à 13 % de l'énergie nominale produite pour l'éolienne. Le pire cas observé dans nos simulations était pour une teneur en eau liquide de $0,9\text{ g/m}^3$, avec approximativement 20% de nominale produite à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 60% de l'énergie nominale produite à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces estimations ne prennent toutefois pas en compte les pertes de chaleur vers l'intérieur du profil, l'effet de l'angle d'attaque sur le coefficient de collection ainsi que la température de surface réelle pour maintenir la surface de la pale sans dépôt de glace. Cette température de surface réelle lors de nos tests était de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tandis qu'elle a été prise à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans nos simulations parce qu'il a été supposé que ce sont les effets de bords sur notre montage expérimental qui étaient responsables de la nécessité

de montrer la température de surface à 5 °C pour garder la surface propre, sans aucun dépôt de glace.

Les écarts en la théorie et l'expérimentation semblent être dues à une erreur systématique qui pourrait être l'énergie perdue par rayonnement.

Dans cette étude de l'antigivrage, il a été également effectué implicitement de l'optimisation en utilisant plusieurs résistances chauffantes alimentées indépendamment. Ce choix d'architecture permet une économie substantielle d'énergie car la quantité de chaleur nécessaire pour maintenir la pale à une température constante varie tout le long de la corde (parce que le coefficient de convection varie également tout le long de la corde). En subdivisant donc la surface du profil en plusieurs éléments, chaque élément peut donc être chauffé adéquatement pour maintenir la surface qu'elle délimite à la température de surface ciblée. En comparaison à l'usage d'un élément chauffant unique, cette architecture « multi-résistances » nécessite un contrôle plus complexe et une attention particulière aux points de jonction des résistances afin d'éviter une accumulation de glace dans les interstices.

Le deuxième volet étudié consistait à proposer des moyens d'estimation de la quantité d'énergie requise pour une opération de dégivrage sur les turbines éoliennes. Ainsi, il a été déterminé expérimentalement l'épaisseur du film d'eau nécessaire pour faire chuter la glace en fonction du type de glace. Des corrélations expérimentales entre la durée du dégivrage, la durée d'accrétion et le flux de chauffage pour des températures données ont été proposées.

Nos tests expérimentaux ont montré que l'épaisseur du film d'eau nécessaire pour faire chuter la glace ne dépendait pas de la puissance de chauffage et qu'elle croissait asymptotiquement en fonction de l'épaisseur de glace accumulée. Par exemple, suite à un événement givrant d'une durée de deux heures, il a été mesuré une épaisseur de glace à faire fondre pour faire chuter la glace d'approximativement 4,43 mm à -5 °C et 5,39 mm à -15 °C. Ces valeurs sont très en dessous de l'épaisseur suffisante de glace à faire fondre proposée dans la littérature actuelle de 40 mm.

Pour un exploitant de parc, il est difficile de connaître l'épaisseur de glace accumulée suite à un événement givrant ; d'où l'intérêt de nos corrélations qui permettent de fournir des estimations à titre indicatif en fonction de paramètres directement mesurables par les exploitants de parcs (tels que la température, la durée de l'événement givrant, la teneur en eau liquide) sans nécessiter une expertise particulière. Ces corrélations ont permis d'estimer pour une Vestas V90-3MW soumis à un événement givrant d'une durée de 2 heures, des temps de dégivrage à 3 min à -5 °C (avec une consommation énergétique de 5 KWh) et 19 min -15 °C (avec une consommation énergétique de 32 KWh).

En comparant les deux modes (antigivrage et dégivrage), il a été observé que le dégivrage, bien qu'il consomme beaucoup moins d'énergie, n'est pas systématiquement la meilleure solution à cause des temps d'arrêt qu'il implique. Étant donné que les turbines récentes produisent de très grandes quantités d'énergie, les pertes dues aux arrêts de production lors du dégivrage sont d'autant plus importantes ; sans compter que le redémarrage à froid est une problématique à part entière qui rallonge les temps de redémarrage. Toutefois, il faut préciser que notre étude de l'antigivrage n'a pas pris en compte les pertes (chaleur entrant dans le profil, temps de latence requis pour atteindre la température de surface ciblée) lors du chauffage des pales. Finalement, les dispositifs installés sur l'éolienne ne sont généralement dimensionnés pour faire passer des énergies aussi élevées que celles requises pour l'antigivrage.

Il n'est donc pas possible à ce stade d'effectuer une généralisation quant au choix de la meilleure stratégie de protection contre le givre. Ceci amène vers le troisième volet étudié, qui concerne le choix d'un système de protection contre le givre.

Le premier obstacle dans cette tâche est dû au fait que les systèmes de protection contre le givre ne sont pas normalisés, ce qui rend leur comparaison difficile. Il a donc été proposé une architecture constituée de paramètres permettant de caractériser tout système de protection contre le givre. En combinant ces paramètres avec une méthode d'analyse

multicritère hiérarchique, il est possible d'évaluer chaque système en fonction d'une liste de critères et de lui attribuer une note globale. Le système totalisant la meilleure note serait donc le mieux adapté pour le site étudié. Les pondérations de chaque paramètre dépendent du site étudié et de plusieurs critères structuraux et environnementaux. Dans notre étude de cas, les systèmes ont été classés selon l'ordre qui suit : les bandes chauffantes placées à l'intérieur des pales, l'injection d'air chaud, les revêtements hydrophobes/glaciophobes, les arrêts préventifs et les bandes chauffantes placées à l'extérieur des pales. Les résultats suggérés par cette méthode doivent être examinés plus en détails, surtout en ce qui concerne le retour sur investissement et les particularités reliées au site étudié avant un choix final.

CHAPITRE 8

RECOMMANDATIONS

Les efforts déployés dans le cadre de ce projet ont été surtout consacrés au développement de modèles empiriques permettant d'estimer la consommation d'un système de protection contre le givre pour une éolienne. Il faudrait effectuer un plus grand nombre de tests expérimentaux, surtout en ce qui concerne le dégivrage, pour déduire des corrélations plus générales.

La soufflerie réfrigérée doit être calibrée et testée afin d'assurer la répétabilité des tests ; la tâche la plus longue dans notre cas était d'assurer une uniformité de la teneur en eau autour du profil. Cette tâche a été effectuée manuellement par essais-erreurs en modifiant les débits des gicleurs. Cette opération devrait être automatisée pour garantir une meilleure précision et un résultat rapide. Les réglages des gicleurs varient en fonction de la température ; il faut donc refaire la calibration pour toutes les températures étudiées. Finalement, il est recommandé d'utiliser pour les expériences de faibles teneurs en eau ($0,3 \text{ gm}^3$) car elles sont plus faciles à obtenir de manière uniforme en soufflerie.

Le montage conçu et utilisé dans le cadre de ce projet était muni de 10 résistances alimentées indépendamment, de deux thermocouples par résistance chauffante et d'un fluxmètre par résistance chauffante. Il était impossible d'obtenir un écoulement laminaire lors de nos expériences à cause de la présence du montage qui représentait un obstacle important dans la soufflerie ; toutefois il serait possible d'obtenir un écoulement laminaire si la surface du profil était directement collée sur la paroi de la soufflerie afin de réduire au minimum l'obstruction dans celle-ci. Il a aussi été constaté que l'utilisation de fluxmètre n'était pas nécessaire parce que les thermocouples deux à deux à la fois à l'intérieur du profil et entre la résistance et la surface du profil permettent de mesurer le gradient de flux entrant dans le profil et ainsi de déduire en négligeant les effets bidimensionnels la quantité de chaleur fournie à l'écoulement. De plus, les fluxmètres se sont révélés être dispendieux, fragiles et

s'endommageaient facilement. Voici d'autres recommandations concernant le montage expérimental pour les projets futurs :

- Ajouter des résistances aussi bien sur l'extrados que sur l'intrados : dans notre étude seul l'extrados était couvert et il était assumé que les mesures obtenues seraient représentatives de celles de l'intrados. Ceci n'est pas souvent le cas car le coefficient de convection varie différemment sur l'intrados et l'extrados et dépendamment de l'angle d'attaque.

- L'angle d'attaque : notre montage ne permet pas de varier automatiquement l'angle d'attaque car ce n'était pas le but de notre projet ; mais l'effet de l'angle d'attaque est un volet à part entière qu'il est important d'étudier afin de connaître et de quantifier son impact sur l'antigivrage et le dégivrage.

- Le chauffage par impulsion : dans nos expériences, les bandes chauffantes ont été alimentées de manière continue ; utiliser une commande thermique par impulsions pour le chauffage est une avenue peu étudiée qui pourrait être plus économe.

- Le chauffage des piliers du montage : lors des expériences de longue durée, il a été constaté la formation de la glace à partir des composants non-chauffés du montage tels que ses piliers ; cette glace pouvait prendre du volume jusqu'à former un obstacle en face du profil modifiant ainsi l'écoulement autour de celui-ci. Nous recommanderions donc de chauffer également les composants maintenant le profil en place assez pour empêcher les dépôts de glace sans affecter l'expérience.

Au cours des expériences en mode antigivrage, il a été constaté que maintenir la température de surface à 0 °C n'empêchait pas la formation de glace sur la surface du profil ; il fallait monter la température aux alentours de 5 °C afin qu'aucune gouttelette ne gèle à l'impact. Ce phénomène a été attribué aux effets de bords et il serait intéressant de faire des investigations poussées dans les futures expériences.

Dans notre étude du dégivrage, les méthodes de mesure de l'épaisseur, de la masse et du volume de glace sont quelque peu archaïques et nécessiteraient d'être informatisées. L'épaisseur des morceaux de glace après la séparation est mesurée en plusieurs points sur

les morceaux ramassés mais certains de ces morceaux ne peuvent parfois pas être récupérés parce qu'ils sont trop petits et aspirés par l'écoulement de la soufflerie ; ceci impacte l'estimation de la masse et du volume de glace après la séparation. L'épaisseur de glace initiale accumulée quant à elle est mesurée aux deux extrémités du profil ; l'idéal serait d'effectuer plusieurs mesures le long du profil et d'en faire la moyenne. Le volume de glace accumulée est calculé en multipliant la corde par la surface moyenne de la glace à chaque extrémité (méthode photographique décrite au paragraphe 5.3.3). La grande incertitude résulte dans le mode d'estimation de la surface de glace accumulée par la méthode photographique. Il serait recommandé dans les études d'utiliser des méthodes d'imagerie graphique avancées permettant d'obtenir une vue tridimensionnelle du montage et de la glace accumulée et d'estimer avec précision l'épaisseur et le volume de glace.

Finalement, pour la suite de ce projet, voici une liste de thèmes recommandés par ordre de priorité décroissante:

- Une validation expérimentale sur une éolienne réelle : peu de résultats de production en mode antigivrage/dégivrage sont disponibles dans la littérature à cause du caractère confidentiel des divers travaux effectués au cours des années. Il serait donc précieux d'effectuer des validations expérimentales à l'échelle réelle d'une part pour valider nos propositions mais également pour fournir à la communauté scientifique des données de production réelle dans le but d'accélérer l'avancement des connaissances.

- L'utilisation et le contrôle de plusieurs résistances chauffantes : les résistances chauffantes actuellement présentes sur le marché ne permettent pas de chauffer progressivement la surface de la pale ; c'est une avenue qui mérite d'être examinée aussi bien sur le point de la conception que du contrôle afin d'optimiser la consommation énergétique en mode antigivrage des pales d'éoliennes. Toutefois, la meilleure alternative serait d'intégrer ces résistances chauffantes directement dans la pale lors de sa conception/fabrication.

- L'étude de méthodes d'antigivrage et dégivrage non-intrusives : un nouveau problème rencontré par les exploitants de parcs est le risque de perdre leur garantie du manufacturier s'ils décident d'installer des dispositifs de protection contre le givre sur leurs éoliennes. Malgré

ces limitations imposées par les fabricants de turbines éoliennes, plusieurs exploitants prennent le risque d'explorer différentes alternatives pour améliorer leur rendement. La recherche doit anticiper dès à présent ce problème et trouver des solutions non intrusives pour la mitigation du givre dans les parcs éoliens.

BIBLIOGRAPHIE

- Adomou, M., 2011. *Étude expérimentale de l'utilisation des revêtements glaciophobes et/ou hydrophobes sur les pales*, Chicoutimi: Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.
- Anderson, D. N. & Reich, A. D., 1997. Tests of the performance of coatings for low ice adhesion.. *National Aeronautics and Space Administration*.
- Antonini, C. et al., 2011. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems.. *Cold Regions Science and Technology*, 67(1), pp. 58-67.
- Arianpour, F., Farzaneh, M. & Kulinich, S. A., 2013. Hydrophobic and ice-retarding properties of doped silicone rubber coatings. *Applied Surface Science*, Volume 265, pp. 546-552.
- Balakrishna, B. & Ketha, V. G. P., 2014. *Validation of Unsteady Thermodynamic CFD Simulations of Aircraft Wing Anti-Icing Operation.*, Toronto, Canada: Institute for Aerospace Studies, University of Toronto.
- Baring-Gould, I., 2012. *IEA Wind Recommended Practice 13: Wind Energy in Cold Climates ; Task 19*. Brussels, Belgium, EWEA.
- Battisti, L., 2015. *Wind Turbines in Cold Climates: Icing Impacts and Mitigation Systems*. 1 éd. New Delhi, India: Springer International Publishing.
- Botura, G. & Fisher, K., 2003. *Development of ice protection system for wind turbine application*. Pyhä, Finland, BOREAS VI.
- Brans, J. P. & Vincke, P., 1985. Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management science*, 31(6), pp. 647-656.
- Butterfield, S., Musial, W. & Scott, G., 2009. *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development.*, Golden, CO: Technical Report. NREL/TP-500-38060.
- Bu, X. et al., 2013. Numerical simulation of an airfoil electrothermal anti-icing system.. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 227(10), pp. 1608-1622.
- Cattin, R., 2012. *Icing of Wind Turbines. Vindforsk projects, a survey of the development and research needs.*, Stockholm: Elforsk Report 12:13.

- Cebeci, T., 2013. *Analysis of turbulent flows with computer programs*.. s.l.:Butterworth-Heinemann.
- Da Silveira, R. A., Maliska, C. R. & Estivam, D. A., 2003. *Evaluation of Collection Efficiency Methods for Icing Analysis*.. São Paulo, Brazil, Proceedings of 17th International Congress of Mechanical Engineering..
- Dalili, N., Edrisy, A. & Carriveau, R., 2009. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13(2), pp. 428-438.
- Danyluk, R., 2009. *Numerical Investigation of Anti-icing Systems for Wind Turbine Blades*, Lyngby, Danemark: Doctoral dissertation, Technical University of Danemark, DTU, DK-2800 Kgs.
- DeIce-UT, 2014. *Summary description of project context and objectives*. [En ligne] Available at: <http://www.deice-ut.eu/publications/> [Accès le 16 Septembre 2014].
- Dierer, S., Oechslin, R. & Cattin, R., 2011. Wind turbines in icing conditions: performance and prediction.. *Advances in Science and Research*, 6(1), pp. 245-250.
- Dimitrova, M. et al., 2011. *Software Tool to Predict the Wind Energy Production Losses Due to Icing*. Winnipeg, Canada, IEEE Electrical Power and Energy, pp. 462-467.
- EDF-EN, 2014. *Les arrêts préventifs : solution face au givre*. Gaspé, TechnoCentre éolien | Colloque 2014.
- Enercon, 2011. *Enercon Magazine for wind energy 01/11*, Aurich, Germany: Windblatt.
- Fakorede, O. et al., 2016. Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis.. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 65, pp. 662-675.
- Fakorede, O., Perron, J., Ilinca, A. & Ibrahim, H., 2013. Modelling Ice Accretion and its Effects on Wind Turbine Blades. Dans: *Wind Turbines: Types, Design and Efficiency*.. Hauppauge, New York: N. S. Publishers (Ed.).
- Farzaneh, M., 2008. *Atmospheric Icing of Power Networks*. Springer Netherlands: Springer Science & Business Media.
- Fishburn, P. C., 1970. *Utility theory for decision making (No. RAC-R-105)*. AD0708563 éd. MCLEAN, VA: RESEARCH ANALYSIS CORP.

- Fortin, G., Ilinca, A. & Laforte, J.-L., Mai 2004. *Modèle d'accrétion de glace sur un objet bidimensionnel fixe applicable aux pales d'éoliennes*, Chicoutimi: Université du Québec à Chicoutimi.
- Fortin, G., Laforte, J. & Ilinca, A., 2006. Heat and Mass Transfer during Ice Accretion on Aircraft Wings with an Improved Roughness Model. *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 45, pp. 595-606.
- Frohboese, P. & Anders, A., 2007. Effects of icing on wind turbine fatigue loads. *Journal of Physics: Conference Series*, 75(1).
- Gipe, P., 2009. *Wind Energy Basics: A Guide to Home and Community-Scale Wind-Energy Systems*. 2 éd. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing.
- Goraj, Z., 2004. *An overview of the de-icing and anti-icing technologies with prospects for the future*. Yokohama, Japan, 24TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE AERONAUTICAL SCIENCES.
- Habashi, W. G., 2009. Recent Advances in CFD for In-Flight Icing Simulations. *Japan Society of Fluid Mechanics*, 28(2), pp. 99-118.
- Hannat, R., 2009. *Étude numérique des effets de la compressibilité sur le transfert de chaleur dans un système antigivre à air chaud*, Montréal: Doctoral dissertation, École de technologie supérieure.
- Hansman, R. & Turnock, S., 1988. *Investigation of microphysical factors which influence surface roughness during glaze ice accretion..* Paris, France, Proc 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, p. 139–146.
- Hochart, C., Fortin, G., Perron, J. & Ilinca, A., 2008. Wind Turbine Performance Under Icing Conditions. *Wind Energy*, 11(4), pp. 319-333.
- Homola, M. C., Virk, M. S., Nicklasson, P. J. & Sundsbø, P. A., 2012. Performance losses due to ice accretion for a 5 MW wind turbine.. *Wind Energy*, Volume 15(3), pp. 379-389.
- Ibrahim, H., Terreaux, J., Paradis, P.-L. & Ramdenee, D., 2013. *Modélisation et simulation d'un système de dégivrage électrothermique pour une pale d'éolienne*, Reims, Marne: XIe colloque interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes.
- IEA Wind, 2012. Expert Group Study on Recommended Practices. *Wind Energy Projects in Cold Climates*, 22 May. Volume 12.

- Jasinski, W. J., Noe, S. C., Selig, M. S. & Bragg, M. B., 1998. Wind turbine performance under icing conditions. *Journal of Solar Energy Engineering*, 120(1), pp. 60-65.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. & Scott, G., 2009. *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development.*, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, Technical Report No. NREL/TP-500-38060..
- Jonsson, C. & Site Assessment, 2012. *Further development of ENERCON's de-icing system.*. Skelleftea, Winterwind 2012 Conference.
- Kays, W. M., Crawford, M. E. & Weigand, B., 2012. *Convective heat and mass transfer.* s.l.:Tata McGraw-Hill Education.
- Keeney, R. L. & Raiffa, H., 1976. *Decision analysis with multiple conflicting objectives.*. New York: Wiley & Sons.
- Kinzel, M. P. et al., 2010. *An openfoam implementation of ice accretion for rotorcraft.*. Chalmers University of Technology, 5th OpenFOAM Workshop.
- Laakso, T. et al., 2003. State-of-the-art of wind energy in cold climates.. *IEA annex XIX*, Volume 24.
- Laflamme, J. N., Laforte, J. L. & Allaire, M., 2002. *De-icing Techniques before During and Following Ice Storms-volume I: Main report.*. Vancouver, Canada, CEA Technologies.
- Makkonen, L., 1981. Estimating intensity of atmospheric ice accretion on stationary structures.. *American Meteorological Society*, 20(5), pp. 595-600.
- Mayer, C., 2007. *Système électrothermique de dégivrage pour une pale d'éolienne : simulations en soufflerie réfrigérée et impact sur la puissance produite*, Montréal: École de Technologie Supérieure.
- Mayer, C., Ilinca, A., Fortin, G. & Perron, J., 2007. *Design Characteristics of Electro-Thermal De-Icing Systems for Wind Turbine Blades Based on Wind Tunnel Studies.* Lisbonne, Portugal, International Journal of Offshore and Polar Engineering, pp. 182-188.
- Meier, O. & Scholz, D., 2010. *A handbook method for the estimation of power requirements for electrical de-icing systems.* Bonn, Germany, Deutscher Luftund Raumfahrt Kongress.

- Nishio, S. & Kato, S., 2004. Development of Ice Accretion and Anti-Icing System Simulation Code.. *24th International Congress of the Aeronautical Sciences, Paper ICAS*, 7(5).
- OpenFOAM, 2016. *The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox*. [En ligne] Available at: <http://www.openfoam.com/> [Accès le 02 Août 2016].
- Ould Rouis, L., Août 2014. *Modélisation et simulation d'un système de dégivrage électrothermique d'une pale d'éolienne*, Montréal: Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure.
- Palacios, J., Smith, E. & Rose, J., 2009. *Instantaneous Deicing of Freezer Ice via Ultrasonic Actuation*. University Park, Pennsylvania, Pennsylvania State University.
- Parent, O. & Ilinca, A., 2011. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review.. *Cold regions science and technology*, 65(1), pp. 88-96.
- Patreau, V., 1998. *Modélisation numérique d'un système électrothermique de dégivrage des pales d'éolienne à axe horizontal*, Montréal: École polytechnique de Montréal. Département de génie mécanique.
- Pellissier, C., Habashi, W. G. & Pueyo, A., 2011. Optimization via FENSAP-ICE of aircraft hot-air anti-icing systems. *Journal of Aircraft*, 48(1), pp. 265-276.
- Rindeskär, E., 2010. *Modelling of icing for wind farms in cold climate: A comparison between measured and modelled data for reproducing and predicting ice accretion*. Uppsala, M.S. thesis, Uppsala Universitet, Sweden.
- Roy, B., 1968. Classement et choix en présence de points de vue multiples. *RAIRO-Operations Research-Recherche Opérationnelle*, 2(V1), pp. 57-75.
- Roy, B., 1978. ELECTRE III: Un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. *Cahiers du CERO*, 20(1), pp. 3-24.
- Roy, B. & Bertier, P., 1971. *La méthode ELECTRE II: une méthode de classement en présence de critères multiples*. Paris: SEMA (Metra International), Direction Scientifique, Note de travail, no. 142, 25p.
- Roy, B. & Hugonnard, J. C., 1982. Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by a multicriteria method. *Transportation Research Part A: General*, 16(4), pp. 301-312.

- Roy, B. & Skalka, J. M., 1987. *ELECTRE IS: Aspects méthodologiques et guide d'utilisation*. Paris: LAMSADE, Unité associée au CNRS no 825, Université de Paris Dauphine.
- Ryerson, C., 2011. Ice protection of offshore platforms. *Cold Regions Science and Technology*, 65(1), pp. 97-110.
- Ryerson, C., 2012. *Atmospheric Icing: How it Forms and How to Treat It*. Lake Morey Resort in Fairlee, Vermont, 8th Polar Technology Conference, 3-5 April 2012.
- Saaty, T. L., 1980. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation..* New York: McGraw.
- Sagol, E., Reggio, M. & Ilinca, A., 2013. *Issues Concerning Roughness on Wind Turbine Blades*. s.l.:Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Seifert, H. & Richert, F., 1997. *Aerodynamics of iced airfoils and their influence on loads and power production*. Dublin, Ireland, EWEC '97, 6th to 9th October, pp. 458-463.
- Silva, W. & Silva, C., 1999-2016. *LAB Fit Curve Fitting Software (Nonlinear Regression and Treatment of Data Program) V 7.2.49*. [En ligne] Available at: www.labfit.net [Accès le 01 07 2016].
- Son, C., Oh, S. & Yee, K., 2012. Quantitative analysis of a two-dimensional ice accretion on airfoils.. *Journal of mechanical science and technology*, 26(4), pp. 1059-1071.
- Suke, P., January 2014. *Analysis of heating systems to mitigate ice accretion on wind-turbine blades*. Hamilton, Ontario: Master's thesis of Applied Science in Engineering. McMaster University.
- Switchenko, D., Habashi, W. G., Baruzzi, G. & Ozcer, I., 2014. *FENSAP-ICE Simulation of Complex Wind Turbine Icing Events, and Comparison to Observed Performance Data*. National Harbor, MD, 32nd ASME Wind Energy Symposium, p. 1399.
- Tammelin, B., Stuke, M., Seifert, H. & Kimura, S., 1998. *Icing effect on power production of wind turbines*. Helsinki, Finland, Proceedings of the BOREAS IV Conference.
- Terreaux, J., Masson, C. & Ibrahim, H., 2012. *Modélisation et simulation d'un système de dégivrage électrothermique d'une pale d'éolienne*, Montréal: École de Technologie Supérieure.

- Velasco, P. M. et al., 2014. Simulation by means finite elements of a preventive anti-icing system for wind turbine blades. *Journal of engineering studies & research*, 20(2).
- Vestas, 2000. *V80-2.0 MW Versatile megawattage*. Aarhus N: Vestas Wind Systems A/S.
- Vestas, 2002. *V100-2.75 MW The future for low wind sites*. Aarhus N: Vestas Wind Systems A/S.
- Vestas, 2002. *V90 3.0 MW*. Aarhus N: Vestas Wind Systems A/S.
- Vestas, 2009. *V120-4.5 MW Offshore leadership*. Aarhus N: Vestas Wind Systems A/S.
- Villalpando, F., Reggio, . M. & Ilinca, A., 2012. Numerical Study of Flow Around an Iced Wind turbine Airfoil. *Engineering Application of Computational Fluid Mechanics*, 6(1), pp. 39-45.
- Wadham-Gagnon, M., Ibrahim, H., Bolduc, D. & Dufresne, M., 2014. *Développement d'une stratégie de contrôle visant à optimiser le fonctionnement d'un système de dégivrage de pales d'éolienne*, Gaspé: TechnoCentre éolien.
- Wang, X., 2008. *Convective heat transfer and experimental icing aerodynamics of wind turbine blades*, Winnipeg: Doctoral dissertation, University of Manitoba.
- Weis, T. M. & Maissan., J., 2003. *The Effects of Black Blades on Surface Temperatures for Wind Turbines.*, Rimouski, Canada: Pembina Institute / Université du Québec à Rimouski.

ANNEXE A
ANALYSES DIMENSIONNELLES

A.1 MODÈLE ANTIGIVRAGE EN RÉGIME SEC

Rappelons que :

Cf. Équation 33
$$\dot{q}_{\text{dry},l} = \frac{0,332k}{x} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}} (1,612bx + a)$$

Cf. Équation 34
$$\dot{q}_{\text{dry},t} = \frac{0,0287k}{x} Pr^{0.6} Re^{0.8} (1,134bx + a)$$

Ainsi :

$$\begin{aligned} [\dot{q}_{\text{dry},l}] &= \left[\frac{0,332k}{x} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}} (1,612bx + a) \right] \\ &= \frac{MLT^{-3}\Theta^{-1}}{L} (\Theta L^{-1} \cdot L + \Theta) \\ &= MT^{-3} \equiv W/m^2 \end{aligned}$$

Équation 82

Et :

$$\begin{aligned} [\dot{q}_{\text{dry},t}] &= \left[\frac{0,0287k}{x} Pr^{0.6} Re^{0.8} (1,134bx + a) \right] \\ &= \frac{MLT^{-3}\Theta^{-1}}{L} (\Theta L^{-1} \cdot L + \Theta) \\ &= MT^{-3} \equiv W/m^2 \end{aligned}$$

Équation 83

A.2 MODÈLE ANTIGIVRAGE EN RÉGIME HUMIDE

La consommation en mode humide est obtenue à l'aide des expressions suivantes, respectivement en modes laminaire et turbulent :

Cf. Équation 36 $\dot{q}_{wet,l} = (1 - \gamma + \theta) \frac{0,332ka}{x} Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}} + \delta ka$

Cf. Équation 37 $\dot{q}_{wet,t} = (1 - \gamma + \theta) \frac{0,0287ka}{x} Pr^{0,6} Re^{0,8} + \delta ka$

Avec :

Cf. Équation 24
$$\gamma = \frac{r_c V_\infty^2}{2(T_s - T_\infty)C_{p,a}}$$

Cf. Équation 25
$$\theta = 27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{2/3} \cdot p_\infty^0}$$

Cf. Équation 26
$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\dot{m}_{imp}}{k(T_s - T_\infty)} \left[C_{p,w}(T_s - T_\infty) - \frac{V_\infty^2}{2} \right] \\ &= \frac{V_\infty \cdot LWC \cdot E_m}{k(T_s - T_\infty)} \left[C_{p,w}(T_s - T_\infty) - \frac{V_\infty^2}{2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\gamma] &= \left[\frac{r_c V_\infty^2}{2(T_s - T_\infty)C_{p,a}} \right] = \left[r_c \frac{\frac{V_\infty^2}{2}}{(T_s - T_\infty)C_{p,a}} \right] \\ &= \frac{L^2 T^{-2}}{L^2 T^{-2} \Theta^{-1} \cdot \Theta} = [1] \equiv \text{Constante} \end{aligned}$$

Équation 84

$$[\theta] = \left[27,03 \frac{0,622 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{C_{p,a} \cdot L_{evap}^{2/3} \cdot p_{\infty}^0} \right] = \frac{MT^{-3}}{MT^{-3}\Theta^{-1} \cdot \Theta}$$

$\equiv [1] \equiv \text{Constante}$

Équation 85

$$[\delta] = \left[\frac{V_{\infty} \cdot LWC \cdot E_m}{k(T_s - T_{\infty})} \left[C_{p,w}(T_s - T_{\infty}) - \frac{V_{\infty}^2}{2} \right] \right]$$

$$= \frac{LT^{-1} \cdot ML^{-3}}{MLT^{-3}\Theta^{-1} \cdot \Theta} (L^2T^{-2}\Theta^{-1} \cdot \Theta - L^2T^{-2}) = L^{-1}$$

$\equiv \text{mètre}^{-1}$

Équation 86

$$[\dot{q}_{wet,l}] = [(1 - \gamma + \theta)\dot{q}_{dry,l} + \delta ka]$$

$$= [\dot{q}_{dry,l}] + [\delta ka]$$

$$= MT^{-3} + L^{-1}$$

$$\cdot MLT^{-3}\Theta^{-1}(\Theta L^{-1} \cdot L + \Theta) = MT^{-3}$$

$\equiv W/m^2$

Équation 87

$$[\dot{q}_{wet,t}] = [(1 - \gamma + \theta)\dot{q}_{dry,t} + \delta ka]$$

$$= [\dot{q}_{dry,t}] + [\delta ka]$$

$$= MT^{-3} + L^{-1}$$

$$\cdot MLT^{-3}\Theta^{-1}(\Theta L^{-1} \cdot L + \Theta) = MT^{-3}$$

$\equiv W/m^2$

Équation 88

ANNEXE B
FICHES D'EXPÉRIENCES DE DÉGIVRAGE À -5°C

B.1 DURÉE D'ACCRÉTION DE 30 MIN

LIMA AMIL							
Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012							
1. Accrétion							
Gicleur #:		Fiche d'essai #:	16				
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5	Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-15				
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5	Opérateur:	OF				
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03	Photos #:	Vidéos #:				
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3						
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1						
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0						
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1						
Angle d'attaque du profil (°):	0	Échelle	1/0,534				
Durée de l'accrétion de glace (min):	30	<p style="text-align: center;">-- Surface non-chauffée -- Résistance chauffante</p>					
2. Dégivrage							
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5						
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1						
Début du dégivrage (hh:mm):	11:47						
Fin du dégivrage (hh:mm):	11:48						
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:00						
Tension (V):	65,45						
Résistance de chauffage (Ω):	66,40						
Courant (A):	0,9857						
Surface de l'élément chauffant (m2):	0,0129	$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$					
Température moyenne en surface (°C):	4,02 ± 0,5						
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-6,03 ± 0,5	Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK					
ΔT Moyen (°C)	10,05 ± 0,5						
Puissance totale fournie (W):	64,51						
Puissance moyenne perdue (W)	1,30						
Puissance moyenne de dégivrage (W)	63,22						
Épaisseur de glace (cm):	0,37	0,37	0,26	0,32	0,29	0,32	
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne	
Surface (cm2):	0,66	0,59	0,62				
	#1	#2	moyenne				
Volume de glace (cm3)	15,88						
Densité (g/cm3)	0,34						
Masse de glace (g):	5,32						
Profil de température du dégivrage							
Commentaires:							
$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$		$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$		$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$			

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

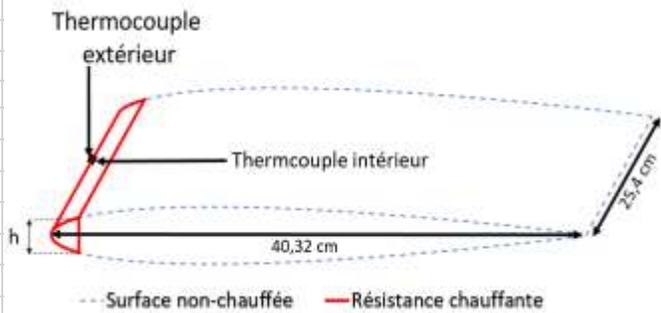
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	30

Fiche d'essai #:	17
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-15
Opérateur:	OF
Photos #:	
Vidéos #:	
à	
Echelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	12:49
Fin du dégivrage (hh:mm):	12:57
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:07
Tension (V):	32,73
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,4929
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	2,65 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-1,57 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	4,22 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	16,13
Puissance moyenne perdue (W)	0,54
Puissance moyenne de dégivrage (W)	15,59
Épaisseur de glace (cm):	0,50
Surface (cm²):	0,86
Volume de glace (cm³)	21,64
Densité (g/cm³)	0,34
Masse de glace (g):	7,25

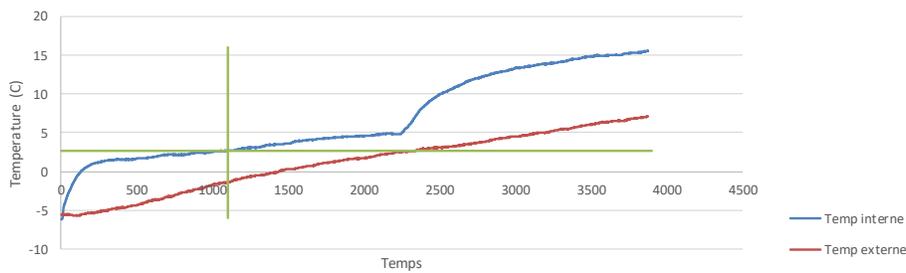


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	0,50	0,38	0,42	0,33	0,33	0,39
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	0,86	0,84	0,85			
	#1	#2	moyenne			

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

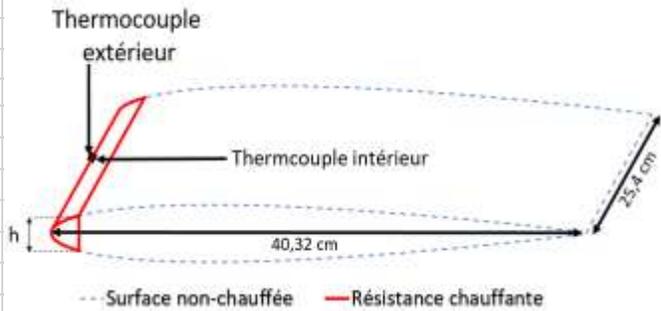
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	30

Fiche d'essai #:	18
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-15
Opérateur:	OF
Photos #:	
Vidéos #:	
à	
Echelle	1/0,534

2. Dégivrage

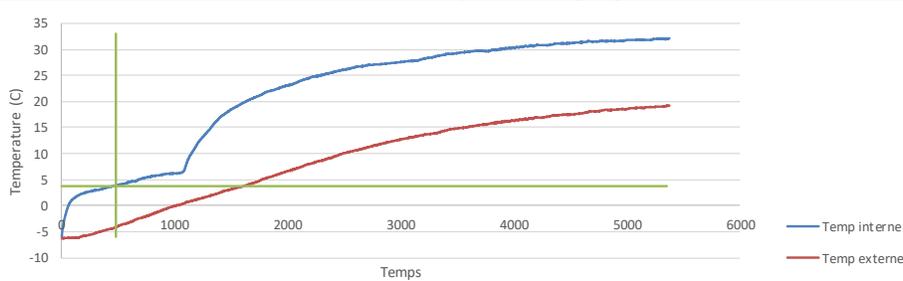
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	14:11
Fin du dégivrage (hh:mm):	14:15
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:03
Tension (V):	40,35
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,6077
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	3,74 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-3,61 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	7,35 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	24,52
Puissance moyenne perdue (W)	0,95
Puissance moyenne de dégivrage (W)	23,57
Épaisseur de glace (cm):	0,46
#1	0,34
#2	0,34
#3	0,34
#4	0,38
#5	0,38
moyenne	0,38
Surface (cm²):	0,73
#1	0,71
#2	0,72
moyenne	0,72
Volume de glace (cm³)	18,30
Densité (g/cm³)	0,34
Masse de glace (g):	6,13



$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{\text{epaisseur}}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

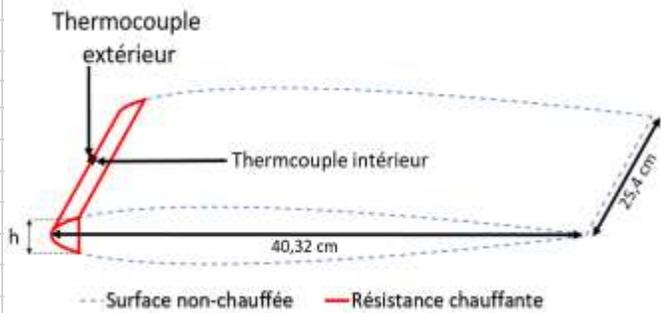
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m ³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	30

Fiche d'essai #:	19
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-15
Opérateur:	OF
Photos #:	
Vidéos #:	
à	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	15:27
Fin du dégivrage (hh:mm):	15:29
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:02
Tension (V):	46,28
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,6970
Surface de l'élément chauffant (m ²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	4,40 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-4,48 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	8,87 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	32,26
Puissance moyenne perdue (W)	1,14
Puissance moyenne de dégivrage (W)	31,11
Épaisseur de glace (cm):	0,43
Surface (cm ²):	0,65
Volume de glace (cm ³)	16,52
Densité (g/cm ³)	0,34
Masse de glace (g):	5,54

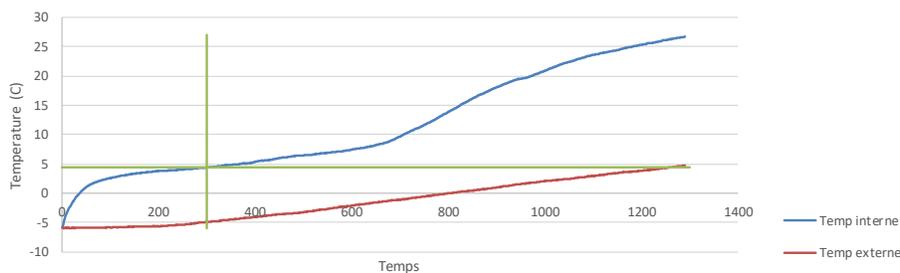


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	0,43	0,31	0,31	0,31	0,31	0,34
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm ²):	0,65	0,65	0,65			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm ³)	16,52					
Densité (g/cm ³)	0,34					
Masse de glace (g):	5,54					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{\text{epaisseur}}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

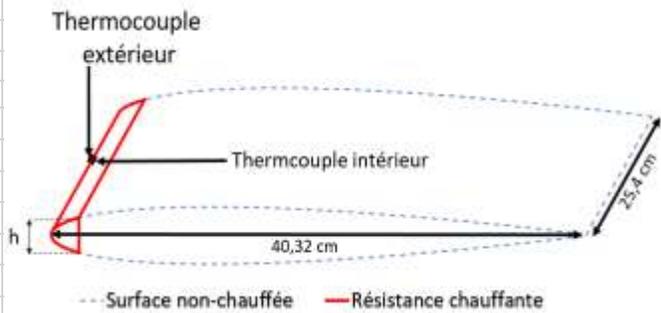
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	30

Fiche d'essai #:	20
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-15
Opérateur:	OF
Photos #:	
Vidéos #:	
à	
Echelle	1/0,534

2. Dégivrage

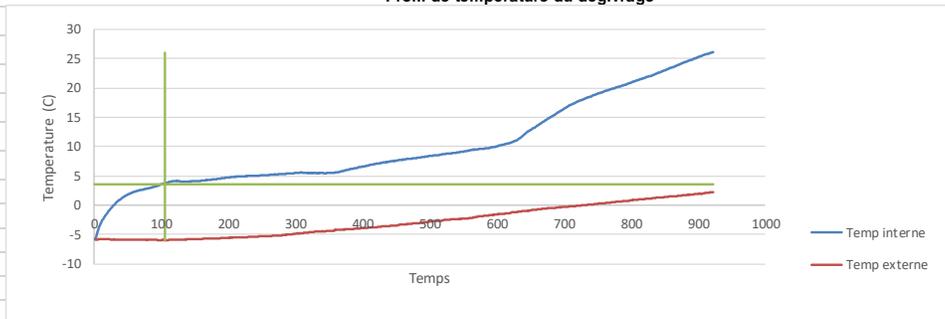
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	16:38
Fin du dégivrage (hh:mm):	16:39
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:01
Tension (V):	50,70
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,7636
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	3,55 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-5,59 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	9,15 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	38,71
Puissance moyenne perdue (W)	1,18
Puissance moyenne de dégivrage (W)	37,53
Épaisseur de glace (cm):	0,40
#1	0,38
#2	0,35
#3	0,38
#4	0,38
#5	0,38
moyenne	0,38
Surface (cm²):	0,77
#1	0,73
#2	0,75
moyenne	0,75
Volume de glace (cm³)	19,09
Densité (g/cm³)	0,34
Masse de glace (g):	6,39



$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

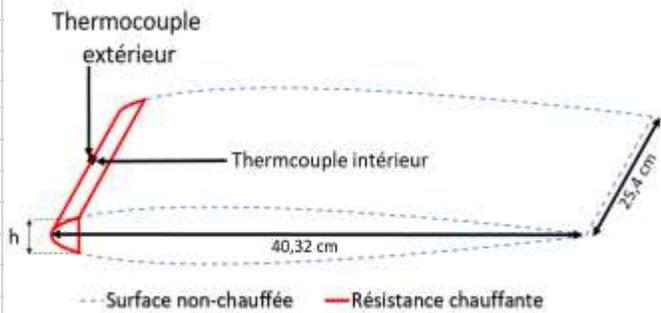
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	30

Fiche d'essai #:	31
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-19
Opérateur:	OF
Photos #:	
Vidéos #:	
à	
Echelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	19:32
Fin du dégivrage (hh:mm):	19:32
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:00
Tension (V):	58,50
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,8810
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	4,08 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-5,60 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	9,68 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	51,54
Puissance moyenne perdue (W)	1,25
Puissance moyenne de dégivrage (W)	50,29
Épaisseur de glace (cm):	0,42
Surface (cm²):	0,88
Volume de glace (cm³)	21,76
Densité (g/cm³)	0,34
Masse de glace (g):	7,29

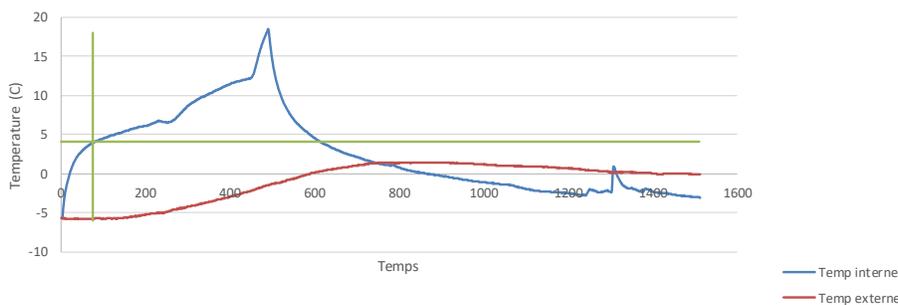


$$\frac{h_{\text{reelle}}}{h_{\text{photo}}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	0,42	0,42	0,33	0,39	0,45	0,40
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	0,88	0,82	0,85			
	#1	#2	moyenne			

Profil de température du dégivrage



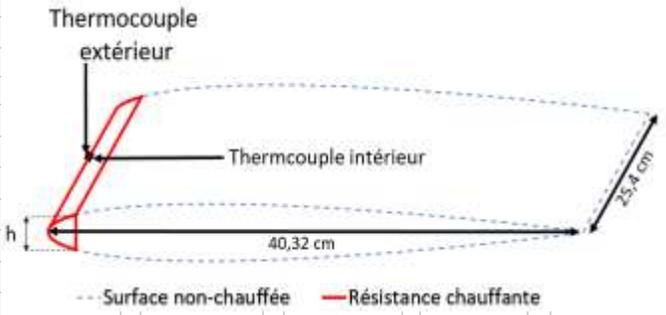
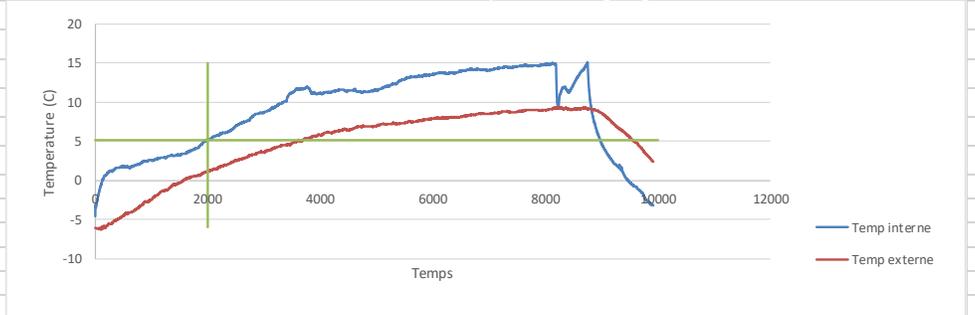
Commentaires:

$$P_{\text{totale}} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{\text{perdue}} = kA \frac{(T_{\text{surface,ext}} - T_{\text{surface,int}})}{\text{épaisseur}}$$

$$P_{\text{degivrage}} = P_{\text{totale}} - P_{\text{perdue}}$$

B.2 DURÉE D'ACCRÉTION DE 60 MIN

LIMA AMIL										
Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012										
1. Accrétion			Fiche d'essai #: 21							
Gicleur #:			Date (aaaa-mm-jj): 2016-03-16							
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5		Opérateur: OF							
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5		Photos #:							
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03		IMG_20160316_125654							
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3		à							
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1		IMG_20160316_125917							
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0		Vidéos #:							
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1									
Angle d'attaque du profil (°):	0		Échelle 1/0,534							
Durée de l'accrétion de glace (min):	60									
2. Dégivrage			 <p style="text-align: center;"> -- Surface non-chauffée — Résistance chauffante </p>							
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5						$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$			
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1									
Début du dégivrage (hh:mm):	12:55									
Fin du dégivrage (hh:mm):	13:07									
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:12									
Tension (V):	32,73									
Résistance de chauffage (Ω):	66,40									
Courant (A):	0,4929									
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129									
Température moyenne en surface (°C):	5,14 ± 0,5									
Température moyenne à l'intérieur (°C):	0,20 ± 0,5									
ΔT Moyen (°C)	4,94 ± 0,5									
Puissance totale fournie (W):	16,13	Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m								
Puissance moyenne perdue (W)	0,64	Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK								
Puissance moyenne de dégivrage (W)	15,50									
Épaisseur de glace (cm):	0,72	0,62	0,51	0,57	0,57	0,60				
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne				
Surface (cm²):	1,02	1,42	1,22							
	#1	#2	moyenne							
Volume de glace (cm³)	31,20									
Densité (g/cm³)	0,34									
Masse de glace (g):	10,45									
Profil de température du dégivrage										
										
Commentaires:										
$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$		$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$		$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$						

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

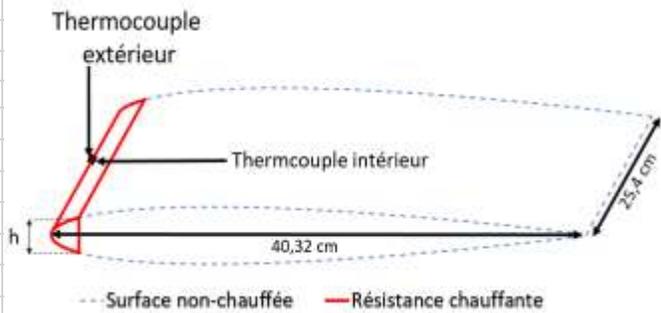
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	22
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-16
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160316_150259	
à	
IMG_20160316_150715	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	15:00
Fin du dégivrage (hh:mm):	15:01
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:00
Tension (V):	58,54
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,8816
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	6,59 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-5,97 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	12,55 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	51,61
Puissance moyenne perdue (W)	1,62
Puissance moyenne de dégivrage (W)	49,99
Épaisseur de glace (cm):	0,77
Surface (cm²):	1,40
Volume de glace (cm³)	35,41
Densité (g/cm³)	0,34
Masse de glace (g):	11,86

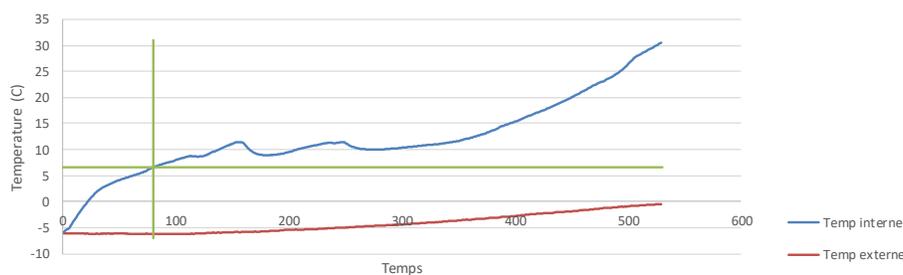


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	0,77	0,67	0,62	0,57	0,69	0,66
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	1,40	1,38	1,39			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	35,41					
Densité (g/cm³)	0,34					
Masse de glace (g):	11,86					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{\text{epaisseur}}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

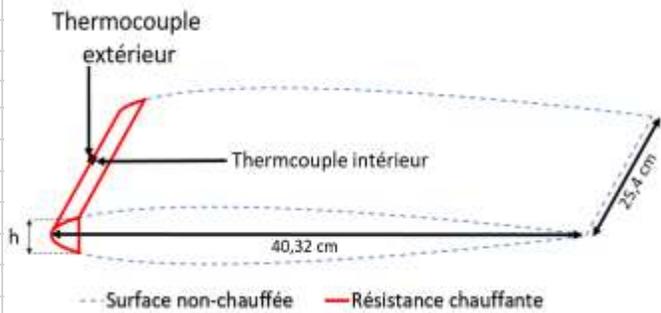
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	23
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-16
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160316_170338	
à	
IMG_20160316_170425	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	17:02
Fin du dégivrage (hh:mm):	17:04
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:02
Tension (V):	46,28
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,6970
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	6,03 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-4,04 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	10,07 ± 0,5

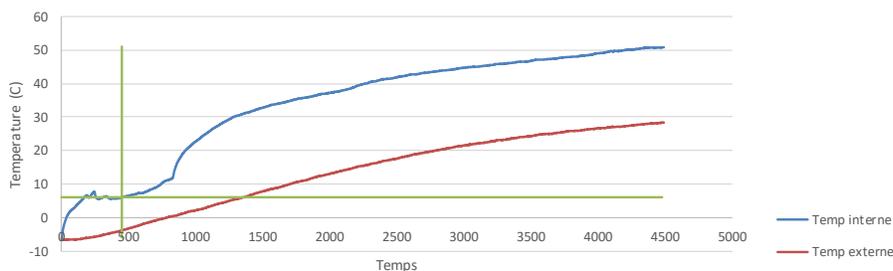


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Puissance totale fournie (W):	32,26					
Puissance moyenne perdue (W)	1,30					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	30,96					
Épaisseur de glace (cm):	0,77	0,67	0,57	0,57	0,62	0,64
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	1,24	1,24	1,24			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	31,62					
Densité (g/cm³)	0,34					
Masse de glace (g):	10,59					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{\text{epaisseur}}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

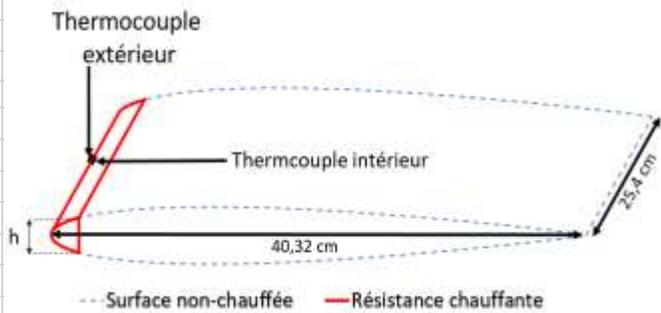
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	26
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-17
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160317_164445	
à	
IMG_20160317_164743	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	16:42
Fin du dégivrage (hh:mm):	16:43
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:01
Tension (V):	50,70
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,7636
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	4,68 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-5,71 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	10,39 ± 0,5

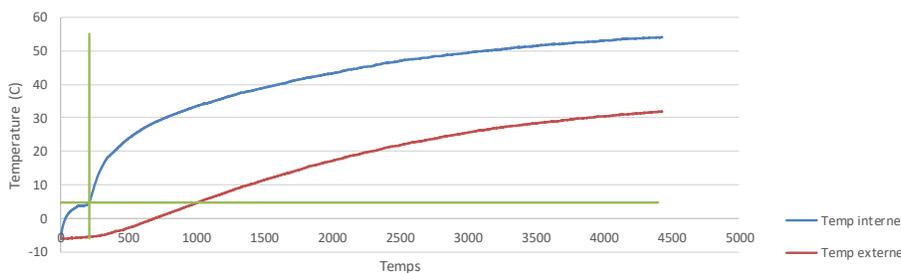


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Puissance totale fournie (W):	38,71
Puissance moyenne perdue (W)	1,34
Puissance moyenne de dégivrage (W)	37,37
Épaisseur de glace (cm):	0,75
#1	0,64
#2	0,69
#3	0,71
#4	0,90
#5	0,74
moyenne	
Surface (cm²):	1,45
#1	1,43
#2	1,44
moyenne	
Volume de glace (cm³)	36,78
Densité (g/cm³)	0,34
Masse de glace (g):	12,32

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{\text{epaisseur}}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

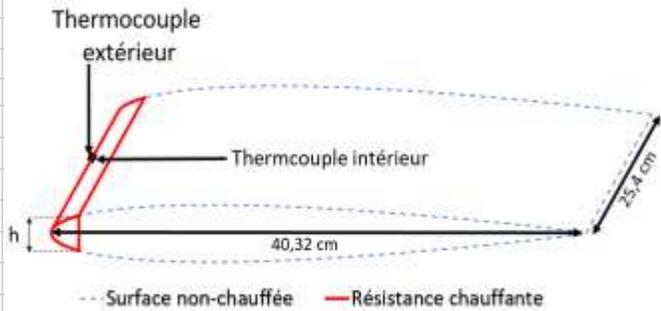
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	29
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-18
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160318_172913	
à	
IMG_20160318_173017	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	17:27
Fin du dégivrage (hh:mm):	17:32
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:05
Tension (V):	40,30
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,6069
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	3,72 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-2,13 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	5,85 ± 0,5

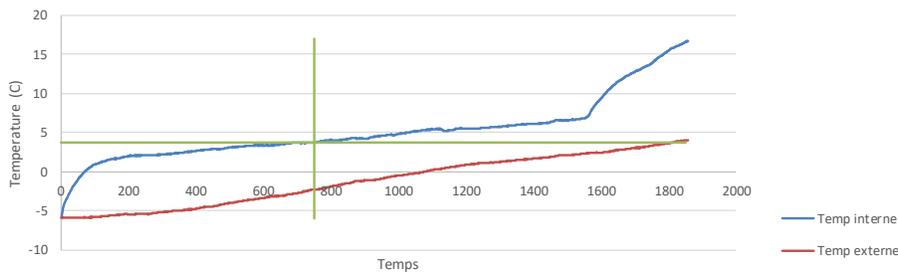


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Puissance totale fournie (W):	24,46					
Puissance moyenne perdue (W)	0,75					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	23,70					
Épaisseur de glace (cm):	0,77	0,67	0,57	0,51	0,67	0,64
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	1,09	1,29	1,19			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	30,42					
Densité (g/cm³)	0,34					
Masse de glace (g):	10,19					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

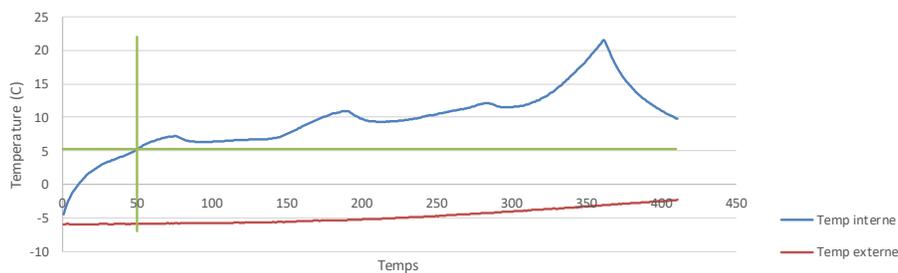
$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{\text{épaisseur}}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

1. Accrétion		Fiche d'essai #:		30		
Gicleur #:		Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-19			
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5	Opérateur:	OF			
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5	Photos #:	Vidéos #:			
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03	IMG_20160319_184517				
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3	à				
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1	IMG_20160319_184730				
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0	Échelle	1/0,534			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1					
Angle d'attaque du profil (°):	0					
Durée de l'accrétion de glace (min):	60					
2. Dégivrage		<p align="center"> $\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$ </p> <p>Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK</p>				
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5					
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1					
Début du dégivrage (hh:mm):	18:43					
Fin du dégivrage (hh:mm):	18:44					
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:00					
Tension (V):	65,40					
Résistance de chauffage (Ω):	66,40					
Courant (A):	0,9849					
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129					
Température moyenne en surface (°C):	5,25 ± 0,5					
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-5,82 ± 0,5					
ΔT Moyen (°C)	11,07 ± 0,5					
Puissance totale fournie (W):	64,42					
Puissance moyenne perdue (W)	1,43					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	62,99					
Épaisseur de glace (cm):	0,87	0,62	0,67	0,64	0,69	0,70
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	1,46	1,48	1,47			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	37,38					
Densité (g/cm³)	0,34					
Masse de glace (g):	12,52					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

B.3 DURÉE D'ACCRÉTION DE 120 MIN

LIMA AMIL						
Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012						
1. Accrétion						
Gicleur #:			Fiche d'essai #:		24	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5		Date (aaaa-mm-jj):		2016-03-17	
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5		Opérateur:		OF	
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03		Photos #:		Vidéos #:	
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3		IMG_20160317_121526			
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1		à			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0		IMG_20160317_122003			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1		Échelle		1/0,534	
Angle d'attaque du profil (°):	0					
Durée de l'accrétion de glace (min):	120					
2. Dégivrage						
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5					
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1					
Début du dégivrage (hh:mm):	12:14					
Fin du dégivrage (hh:mm):	12:14					
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:00					
Tension (V):	65,45					
Résistance de chauffage (Ω):	66,40					
Courant (A):	0,9857					
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129					
Température moyenne en surface (°C):	8,38 ± 0,5		$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$			
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-6,03 ± 0,5					
ΔT Moyen (°C)	14,41 ± 0,5					
Puissance totale fournie (W):	64,51		Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK			
Puissance moyenne perdue (W)	1,86					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	62,65					
Épaisseur de glace (cm):	1,38	1,23	1,23	1,33	1,33	1,30
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	2,04	2,24	2,14			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	54,57					
Densité (g/cm³)	0,34					
Masse de glace (g):	18,28					
Profil de température du dégivrage						
Commentaires:						
$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$		$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$		$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$		

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

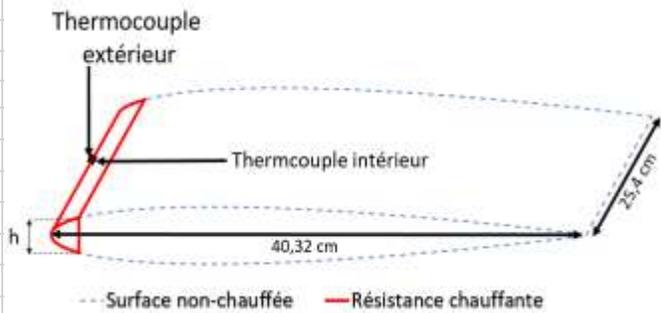
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	120

Fiche d'essai #:	25
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-17
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160317_145348	
à	
IMG_20160317_145849	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	14:55
Fin du dégivrage (hh:mm):	14:56
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:01
Tension (V):	46,28
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,6970
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	8,94 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-5,17 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	14,11 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	32,26
Puissance moyenne perdue (W)	1,82
Puissance moyenne de dégivrage (W)	30,44
Épaisseur de glace (cm):	1,24
Surface (cm²):	2,94
Volume de glace (cm³)	69,92
Densité (g/cm³)	0,34
Masse de glace (g):	23,42

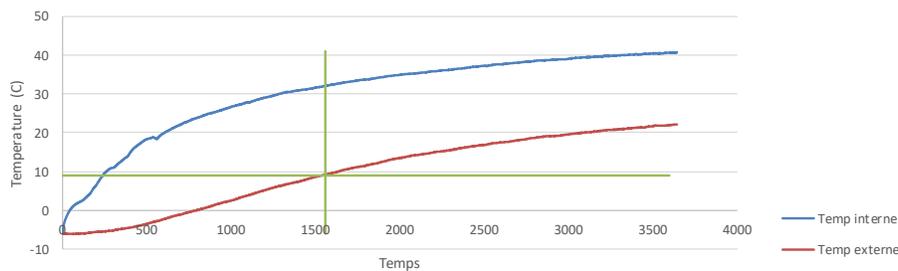


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	1,24	1,32	1,22	1,22	1,24	1,25
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	2,94	2,54	2,74			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	69,92					
Densité (g/cm³)	0,34					
Masse de glace (g):	23,42					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{\text{epaisseur}}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

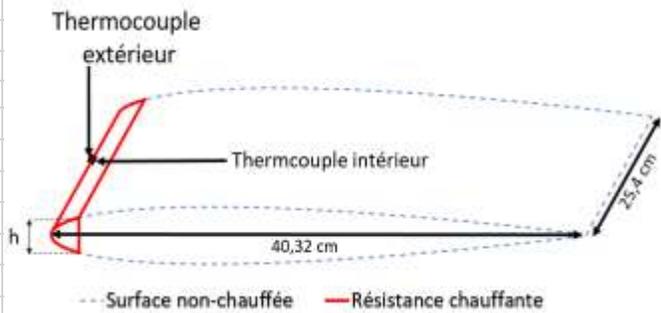
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	120

Fiche d'essai #:	27
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-18
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160318_125958	
à	
IMG_20160318_130337	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

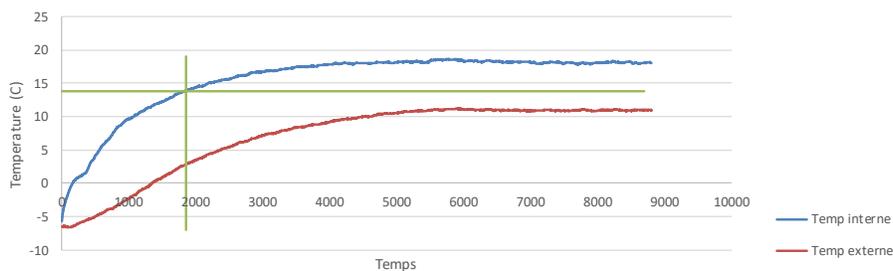
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5					
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1					
Début du dégivrage (hh:mm):	12:58					
Fin du dégivrage (hh:mm):	13:16					
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:18					
Tension (V):	32,75					
Résistance de chauffage (Ω):	66,40					
Courant (A):	0,4932					
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129					
Température moyenne en surface (°C):	13,78 ± 0,5					
Température moyenne à l'intérieur (°C):	4,45 ± 0,5					
ΔT Moyen (°C)	9,33 ± 0,5					
Puissance totale fournie (W):	16,15					
Puissance moyenne perdue (W)	1,20					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	14,95					
Épaisseur de glace (cm):	1,28	1,13	1,10	1,08	1,25	1,17
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	2,41	2,21	2,31			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	58,89					
Densité (g/cm³)	0,34					
Masse de glace (g):	19,73					



$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{\text{epaisseur}}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

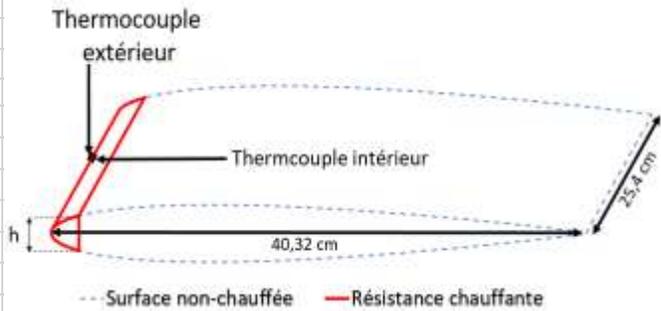
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	120

Fiche d'essai #:	28
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-18
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160318_160359	
à	
IMG_20160318_160529	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

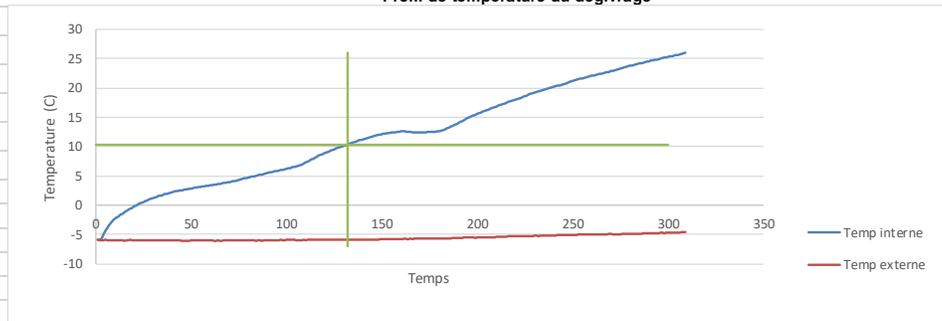
Température de l'air (°C):	-5 ± 0,5					
Vitesse du vent (m/s):	5±0,1					
Début du dégivrage (hh:mm):	16:03					
Fin du dégivrage (hh:mm):	16:04					
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:00					
Tension (V):	58,50					
Résistance de chauffage (Ω):	66,40					
Courant (A):	0,8810					
Surface de l'élément chauffant (m2):	0,0129					
Température moyenne en surface (°C):	10,29±0,5					
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-5,71±0,5					
ΔT Moyen (°C)	15,99±0,5					
Puissance totale fournie (W):	51,54					
Puissance moyenne perdue (W)	2,06					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	49,48					
Épaisseur de glace (cm):	1,31	1,24	1,23	1,25	1,40	1,29
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm2):	2,09	2,05	2,07			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm3)	52,80					
Densité (g/cm3)	0,34					
Masse de glace (g):	17,69					



$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

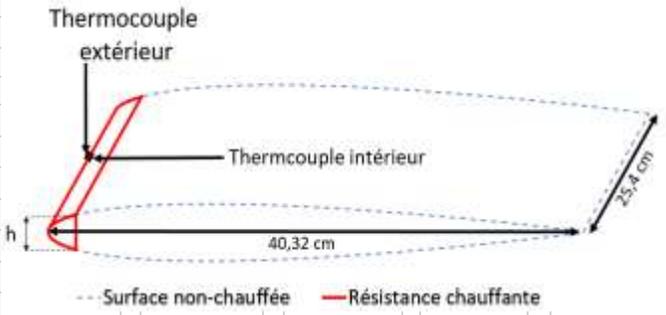
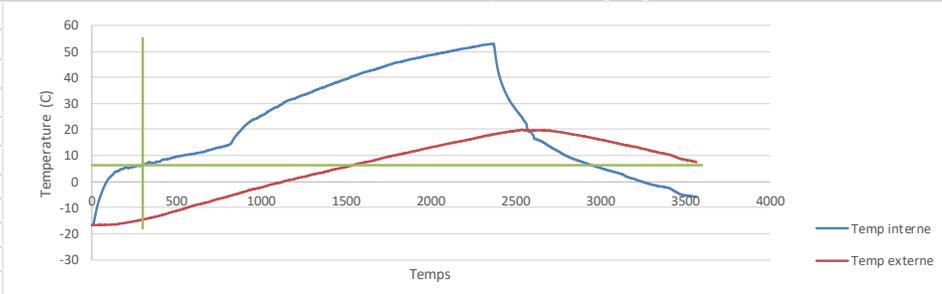
$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{\text{epaisseur}}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

ANNEXE C
FICHES D'EXPÉRIENCES DE DÉGIVRAGE À -15°C

C.1 DURÉE D'ACCRÉTION DE 30 MIN

LIMA AMIL						
Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012						
1. Accrétion			Fiche d'essai #: 7			
Gicleur #:			Date (aaaa-mm-jj): 2016-03-08			
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5		Opérateur: OF			
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5		Photos #:			
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03		IMG_20160308_111322			
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3		à			
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1		IMG_20160308_120136			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0		Vidéos #:			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1					
Angle d'attaque du profil (°):	0		Échelle 1/0,534			
Durée de l'accrétion de glace (min):	30					
2. Dégivrage			 <p style="text-align: center;">-- Surface non-chauffée — Résistance chauffante</p>			
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5					
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1					
Début du dégivrage (hh:mm):	12:50					
Fin du dégivrage (hh:mm):	12:52					
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:02					
Tension (V):	58,54					
Résistance de chauffage (Ω):	66,40					
Courant (A):	0,8816					
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129					
Température moyenne en surface (°C):	6,27 ± 0,5		$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$			
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-12,81 ± 0,5		Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK			
ΔT Moyen (°C)	19,08 ± 0,5					
Puissance totale fournie (W):	51,61					
Puissance moyenne perdue (W)	2,46					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	49,15					
Épaisseur de glace (cm):	0,54	0,68	0,73	0,63	0,68	0,65
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	1,36	1,38	1,37			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	34,91					
Densité (g/cm³)	0,92					
Masse de glace (g):	32,11					
Profil de température du dégivrage						
						
Commentaires:						
$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$		$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$		$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$		

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

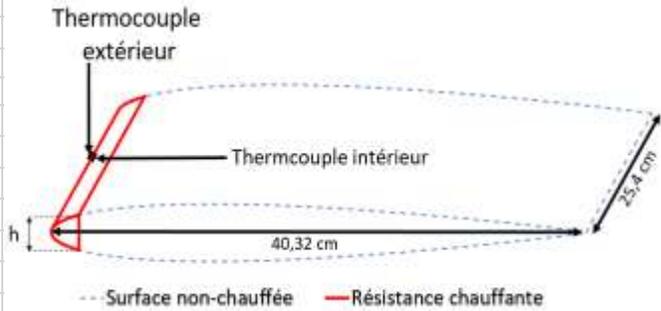
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	30

Fiche d'essai #:	10
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-09
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160309_132857	
à	
IMG_20160309_152913	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	14:28
Fin du dégivrage (hh:mm):	15:48
Durée du dégivrage (hh:mm):	1:20
Tension (V):	32,70
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,4925
Surface de l'élément chauffant (m2):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	26,95 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	3,27 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	20,68 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	16,10
Puissance moyenne perdue (W)	2,67
Puissance moyenne de dégivrage (W)	13,44
Épaisseur de glace (cm):	0,65
Surface (cm2):	1,26
Volume de glace (cm3)	31,75
Densité (g/cm3)	0,92
Masse de glace (g):	29,21

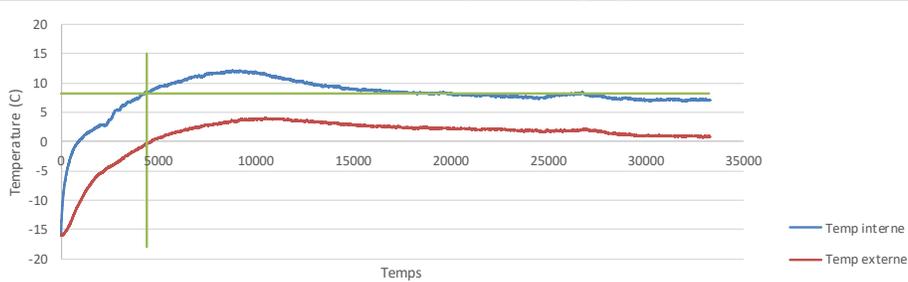


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	0,65	0,75	0,60	0,60	0,60	0,64
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm2):	1,26	1,24	1,25			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm3)	31,75					
Densité (g/cm3)	0,92					
Masse de glace (g):	29,21					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

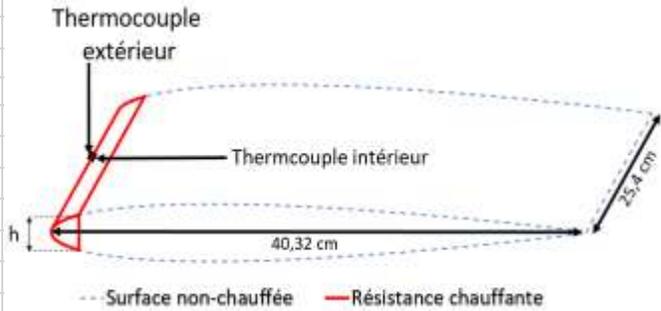
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	30

Fiche d'essai #:	11
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-11
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160311_130645	
à	
IMG_20160311_130850	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	14:06
Fin du dégivrage (hh:mm):	14:15
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:08
Tension (V):	46,30
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,6973
Surface de l'élément chauffant (m2):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	15,36 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-14,95 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	30,31 ± 0,5



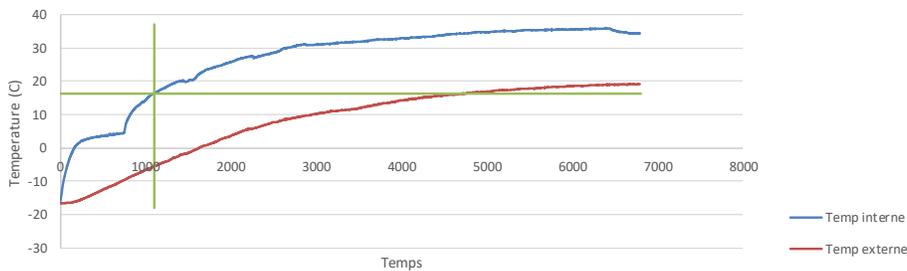
$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Puissance totale fournie (W):	32,28
Puissance moyenne perdue (W)	3,91
Puissance moyenne de dégivrage (W)	28,37
Épaisseur de glace (cm):	0,82
Surface (cm2):	1,23
Volume de glace (cm3)	31,54
Densité (g/cm3)	0,92
Masse de glace (g):	29,02

0,77	0,67	0,62	0,62	0,62	0,70
#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
1,23	1,25	1,24			
#1	#2	moyenne			

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

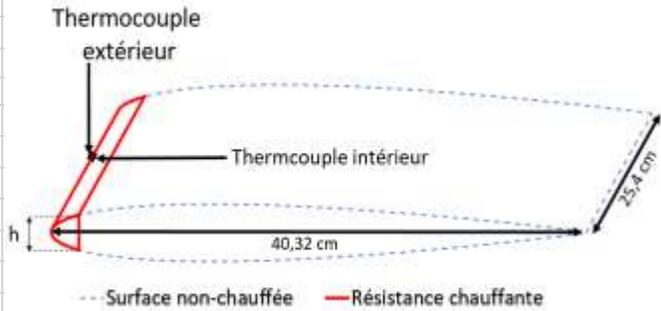
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	30

Fiche d'essai #:	13
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-14
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160314_124914	
à	
IMG_20160314_125100	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	12:47
Fin du dégivrage (hh:mm):	13:07
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:19
Tension (V):	40,35
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,6077
Surface de l'élément chauffant (m2):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	8,29 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-1,02 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	9,31 ± 0,5

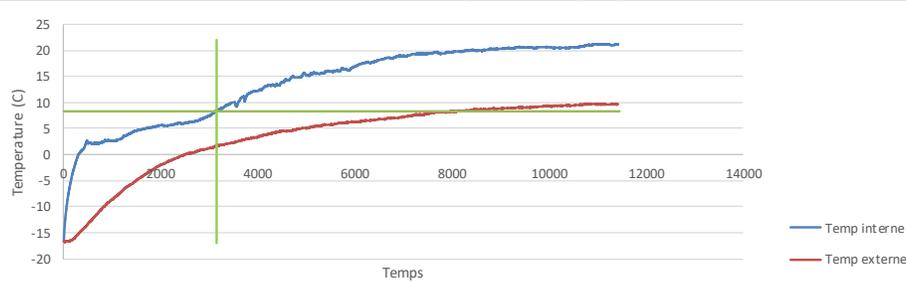


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Puissance totale fournie (W):	24,52					
Puissance moyenne perdue (W)	1,20					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	23,32					
Épaisseur de glace (cm):	0,55	0,62	0,46	0,51	0,46	0,52
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm2):	1,00	1,02	1,01			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm3)	25,78					
Densité (g/cm3)	0,92					
Masse de glace (g):	23,72					

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

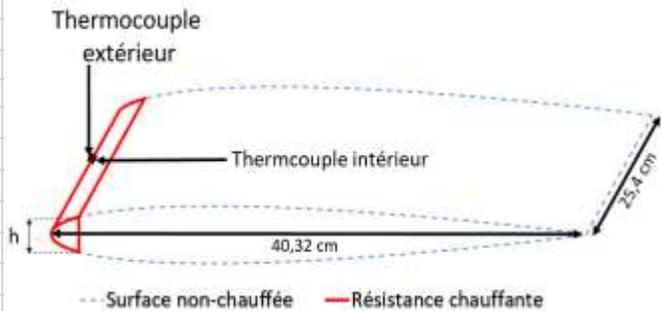
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	30

Fiche d'essai #:	14
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-14
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160314_142715	
à	
IMG_20160314_142814	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	14:25
Fin du dégivrage (hh:mm):	14:29
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:03
Tension (V):	50,70
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,7636
Surface de l'élément chauffant (m2):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	4,42 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-10,78 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	15,20 ± 0,5

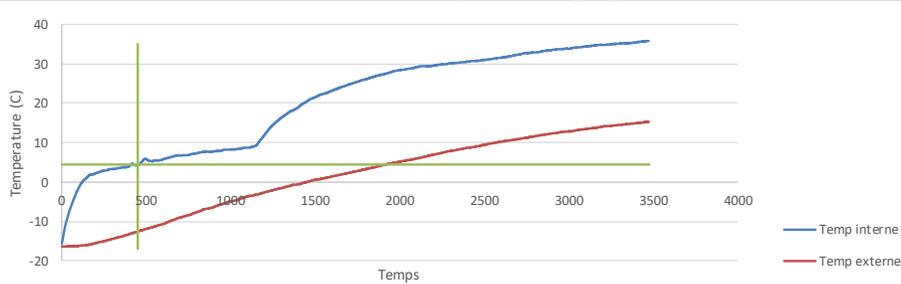


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Puissance totale fournie (W):	38,71					
Puissance moyenne perdue (W)	1,96					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	36,75					
Épaisseur de glace (cm):	0,62	0,62	0,46	0,51	0,46	0,53
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm2):	1,01	1,01	1,01			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm3)	25,61					
Densité (g/cm3)	0,92					
Masse de glace (g):	23,56					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

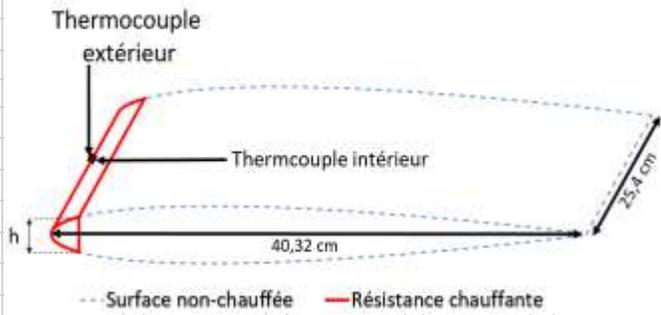
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	30

Fiche d'essai #:	36
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-20
Opérateur:	OF
Photos #:	VIDÉOS #:
IMG_20160320_163924	
à	
IMG_20160320_171557	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	4:47
Fin du dégivrage (hh:mm):	4:48
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:01
Tension (V):	65,40
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,9849
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	15,32 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-14,97 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	30,29 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	64,42
Puissance moyenne perdue (W)	3,91
Puissance moyenne de dégivrage (W)	60,51
Épaisseur de glace (cm):	0,74
Surface (cm²):	1,42
Volume de glace (cm³)	36,43
Densité (g/cm³)	0,92
Masse de glace (g):	33,51

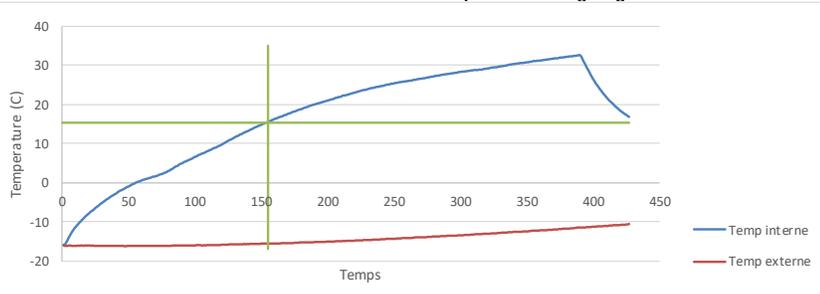


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	0,74	0,81	0,71	0,71	0,87	0,77
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	1,42	1,44	1,43			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	36,43					
Densité (g/cm³)	0,92					
Masse de glace (g):	33,51					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

C.2 DURÉE D'ACCRÉTION DE 60 MIN

LIMA AMIL						
Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012						
1. Accrétion						
Gicleur #:			Fiche d'essai #:		1	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5		Date (aaaa-mm-jj):		2016-03-04	
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5		Opérateur:		OF	
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03		Photos #:		Vidéos #:	
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3		IMG_20160304_122706			
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1		à			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0		IMG_20160304_145838			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1		Échelle		1/0,534	
Angle d'attaque du profil (°):	0					
Durée de l'accrétion de glace (min):	60					
2. Dégivrage						
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5					
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1					
Début du dégivrage (hh:mm):	13:34					
Fin du dégivrage (hh:mm):	15:14					
Durée du dégivrage (hh:mm):	1:39					
Tension (V):	32,70					
Résistance de chauffage (Ω):	66,40					
Courant (A):	0,4925					
Surface de l'élément chauffant (m2):	0,0129					
Température moyenne en surface (°C):	9,1 ± 0,5		$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$			
Température moyenne à l'intérieur (°C):	1,9 ± 0,5					
ΔT Moyen (°C)	7,2 ± 0,5					
Puissance totale fournie (W):	16,10		Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK			
Puissance moyenne perdue (W)	0,93					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	15,17					
Épaisseur de glace (cm):	1,59	1,48	1,27	1,22	1,48	1,41
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm2):	2,75	2,77	2,76			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm3)	70,30					
Densité (g/cm3)	0,92					
Masse de glace (g):	64,68					
Profil de température du dégivrage						
Commentaires:						
$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$		$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$		$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$		

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

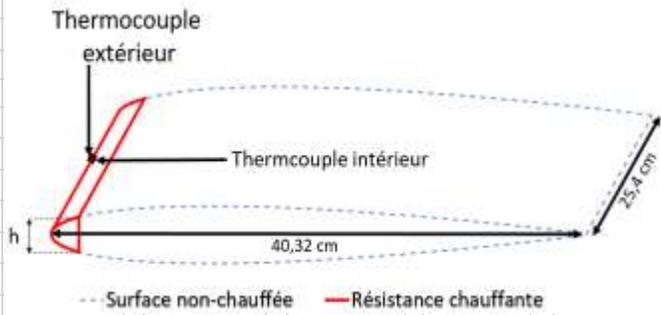
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	2
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-04
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160304_165909	
à	
IMG_20160304_170134	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

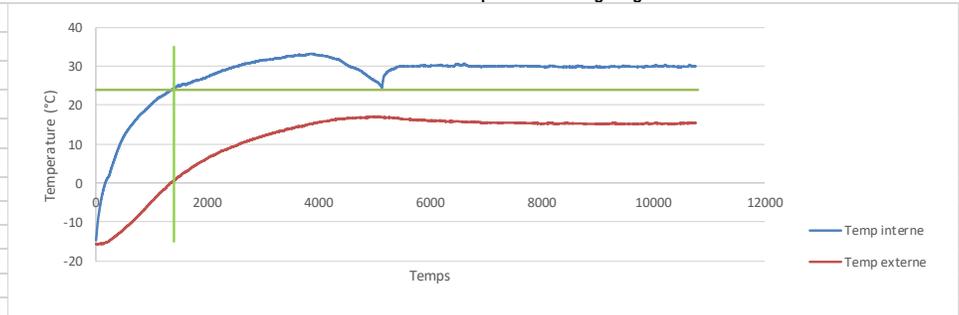
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5					
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1					
Début du dégivrage (hh:mm):	18:00					
Fin du dégivrage (hh:mm):	18:13					
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:13					
Tension (V):	46,30					
Résistance de chauffage (Ω):	66,40					
Courant (A):	0,6973					
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129					
Température moyenne en surface (°C):	26,95 ± 0,5					
Température moyenne à l'intérieur (°C):	3,27 ± 0,5					
ΔT Moyen (°C)	20,68 ± 0,5					
Puissance totale fournie (W):	32,28					
Puissance moyenne perdue (W)	2,67					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	29,62					
Épaisseur de glace (cm):	1,29	1,34	1,54	1,49	1,65	1,46
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	2,81	2,81	2,81			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	71,67					
Densité (g/cm³)	0,92					
Masse de glace (g):	65,94					



$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

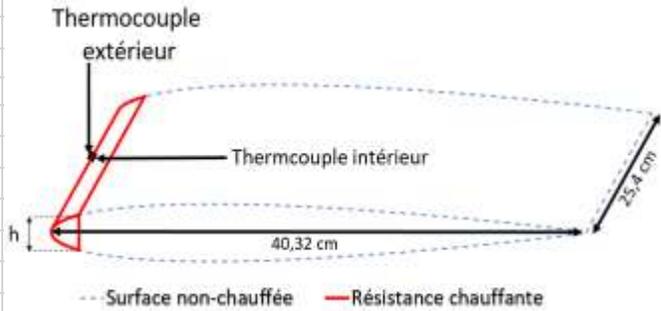
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	3
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-04
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160304_191731	
à	
IMG_20160304_192802	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	20:18
Fin du dégivrage (hh:mm):	20:19
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:01
Tension (V):	65,45
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,9857
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	15,36 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-14,95 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	30,31 ± 0,5

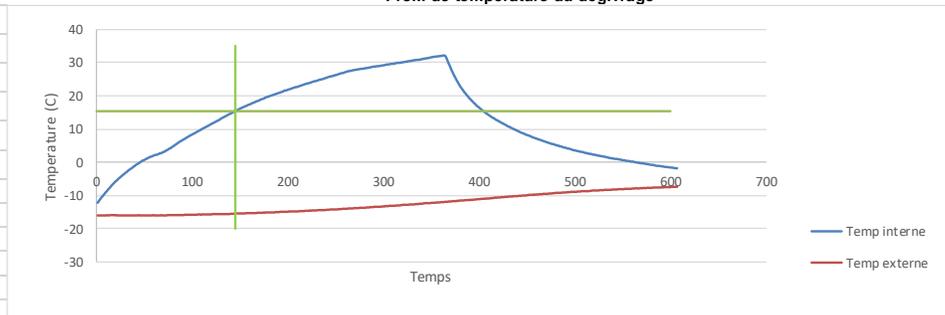


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Puissance totale fournie (W):	64,51					
Puissance moyenne perdue (W)	3,91					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	60,60					
Épaisseur de glace (cm):	1,59	1,23	1,65	1,29	1,39	1,43
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	3,27	3,29	3,28			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	83,69					
Densité (g/cm³)	0,92					
Masse de glace (g):	76,99					

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

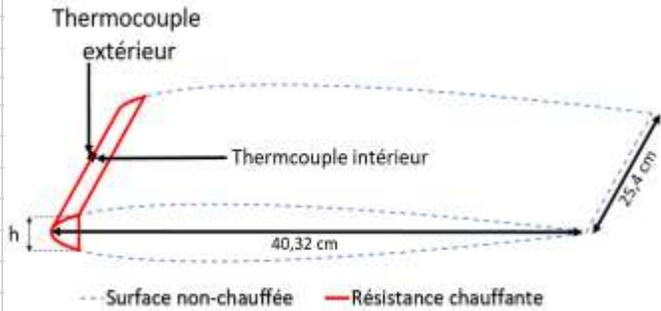
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	4
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-07
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160307_122210	
à	
IMG_20160307_122518	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	13:21
Fin du dégivrage (hh:mm):	13:58
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:36
Tension (V):	40,25
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,6062
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	26,01 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	9,08 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	13,93 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	24,40
Puissance moyenne perdue (W)	1,80
Puissance moyenne de dégivrage (W)	22,60
Épaisseur de glace (cm):	1,54
Surface (cm²):	2,94
Volume de glace (cm³)	74,66
Densité (g/cm³)	0,92
Masse de glace (g):	68,68

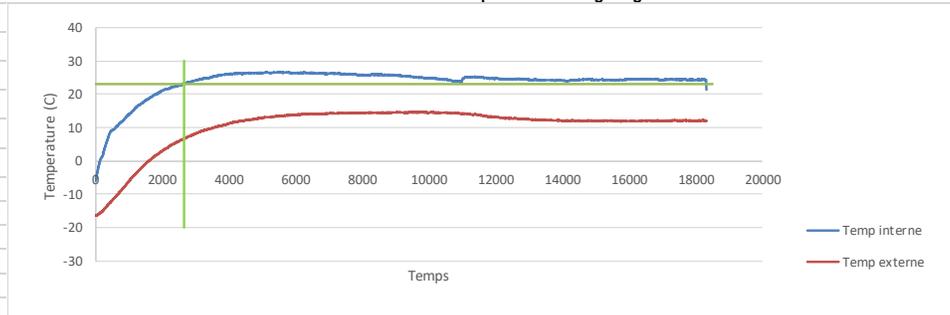


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	1,54	1,44	1,23	1,26	1,49	1,39
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	2,94	2,92	2,93			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	74,66					
Densité (g/cm³)	0,92					
Masse de glace (g):	68,68					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

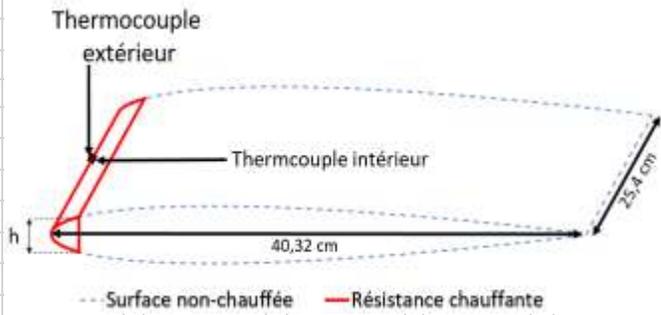
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	5
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-07
Opérateur:	OF
Photos #:	VIDÉOS #:
IMG_20160307_145139	
à	
IMG_20160307_145541	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	15:50
Fin du dégivrage (hh:mm):	15:56
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:05
Tension (V):	50,70
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,7636
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	23,90 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-4,47 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	28,37 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	38,71
Puissance moyenne perdue (W)	3,66
Puissance moyenne de dégivrage (W)	35,05
Épaisseur de glace (cm):	1,59
Surface (cm²):	2,98
Volume de glace (cm³)	75,77
Densité (g/cm³)	0,92
Masse de glace (g):	69,71

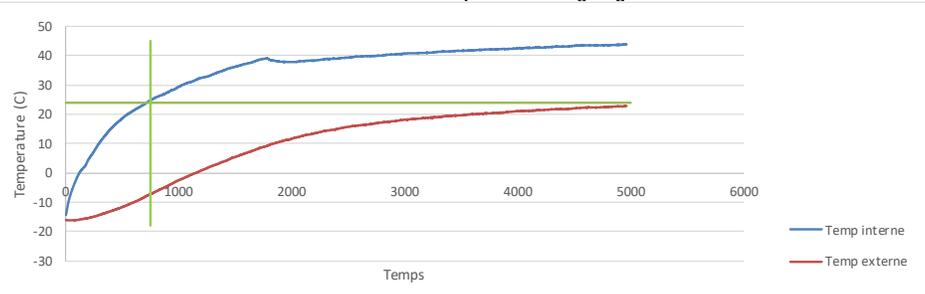


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	1,59	1,44	1,34	1,39	1,44	1,44
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	2,98	2,96	2,97			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	75,77					
Densité (g/cm³)	0,92					
Masse de glace (g):	69,71					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

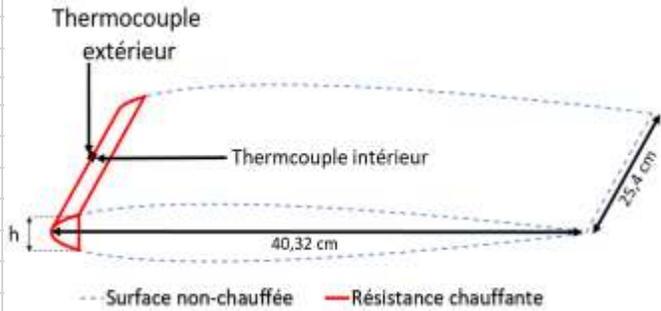
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	6
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-07
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160307_164027	
à	
IMG_20160307_164701	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	17:39
Fin du dégivrage (hh:mm):	17:43
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:03
Tension (V):	58,50
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,8810
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	26,56 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-8,17 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	34,74 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	51,54
Puissance moyenne perdue (W)	4,48
Puissance moyenne de dégivrage (W)	47,06
Épaisseur de glace (cm):	1,49
Surface (cm²):	2,50
Volume de glace (cm³)	64,00
Densité (g/cm³)	0,92
Masse de glace (g):	58,88

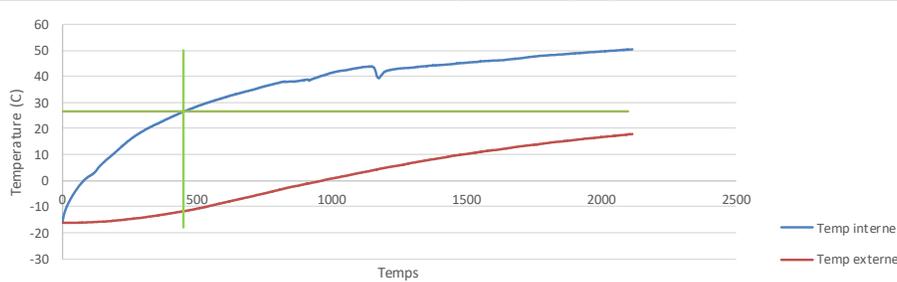


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	1,49	1,25	1,13	1,25	1,41	1,31
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	2,50	2,52	2,51			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	64,00					
Densité (g/cm³)	0,92					
Masse de glace (g):	58,88					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

C.3 DURÉE D'ACCRÉTION DE 120 MIN

LIMA AMIL						
Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012						
1. Accrétion			Fiche d'essai #: 8			
Gicleur #:			Date (aaaa-mm-jj): 2016-03-08			
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5		Opérateur: OF			
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5		Photos #:			
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03		IMG_20160308_141049			
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3		à			
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1		IMG_20160308_164302			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0		Vidéos #:			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1					
Angle d'attaque du profil (°):	0		Échelle 1/0,534			
Durée de l'accrétion de glace (min):	120					
2. Dégivrage			<p>Thermocouple extérieur</p> <p>Thermocouple intérieur</p> <p>40,32 cm</p> <p>25,4 cm</p> <p>h</p> <p>-- Surface non-chauffée — Résistance chauffante</p> <p>$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$</p> <p>Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK</p>			
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5					
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1					
Début du dégivrage (hh:mm):	15:10					
Fin du dégivrage (hh:mm):	17:07					
Durée du dégivrage (hh:mm):	1:56					
Tension (V):	32,72					
Résistance de chauffage (Ω):	66,40					
Courant (A):	0,4928					
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129					
Température moyenne en surface (°C):	7,77 ± 0,5					
Température moyenne à l'intérieur (°C):	1,04 ± 0,5					
ΔT Moyen (°C)	6,73 ± 0,5					
Puissance totale fournie (W):	16,12					
Puissance moyenne perdue (W)	0,87					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	15,26					
Épaisseur de glace (cm):	2,67	2,48	2,27	2,39	2,54	2,47
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	6,19	6,17	6,18			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	157,47					
Densité (g/cm³)	0,92					
Masse de glace (g):	144,87					
Profil de température du dégivrage						
Commentaires:						
$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$		$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$		$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$		

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

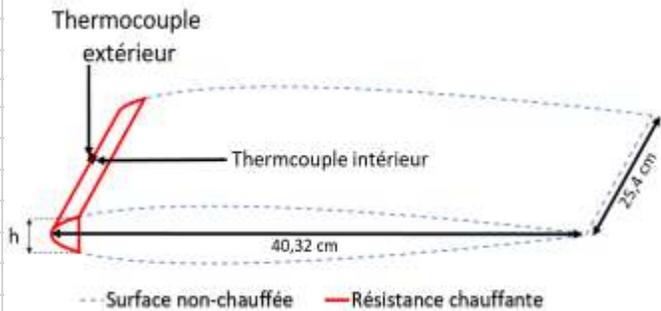
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	120

Fiche d'essai #:	9
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-09
Opérateur:	OF
Photos #:	VIDÉOS #:
IMG_20160309_121842	
à	
IMG_20160309_125322	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	13:19
Fin du dégivrage (hh:mm):	13:37
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:18
Tension (V):	46,30
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,6973
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	25,60 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	6,58 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	19,01 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	32,28
Puissance moyenne perdue (W)	2,45
Puissance moyenne de dégivrage (W)	29,83
Épaisseur de glace (cm):	2,58
Surface (cm²):	5,41
Volume de glace (cm³)	137,91
Densité (g/cm³)	0,92
Masse de glace (g):	126,88

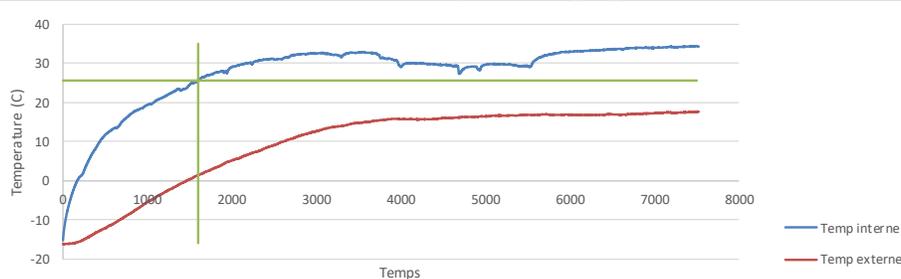


$$\frac{h_{réelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	2,58	2,19	1,96	2,19	2,27	2,24
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	5,41	5,41	5,41			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	137,91					
Densité (g/cm³)	0,92					
Masse de glace (g):	126,88					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{épaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

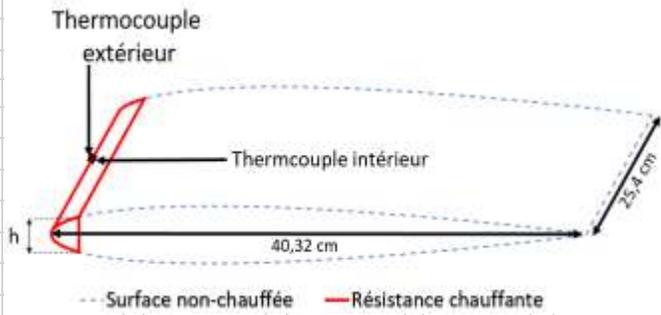
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	120

Fiche d'essai #:	12
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-11
Opérateur:	OF
Photos #:	VIDÉOS #:
IMG_20160311_130645	
à	
IMG_20160311_130850	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

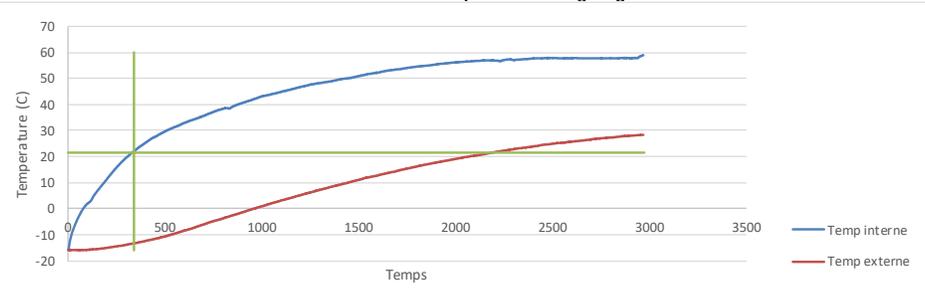
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5					
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1					
Début du dégivrage (hh:mm):	16:38					
Fin du dégivrage (hh:mm):	16:41					
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:02					
Tension (V):	58,50					
Résistance de chauffage (Ω):	66,40					
Courant (A):	0,8810					
Surface de l'élément chauffant (m2):	0,0129					
Température moyenne en surface (°C):	21,49 ± 0,5					
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-11,46 ± 0,5					
ΔT Moyen (°C)	32,95 ± 0,5					
Puissance totale fournie (W):	51,54					
Puissance moyenne perdue (W)	4,25					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	47,29					
Épaisseur de glace (cm):	2,31	2,57	2,37	2,52	2,73	2,50
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm2):	7,15	7,19	7,17			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm3)	182,62					
Densité (g/cm3)	0,92					
Masse de glace (g):	168,01					



$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

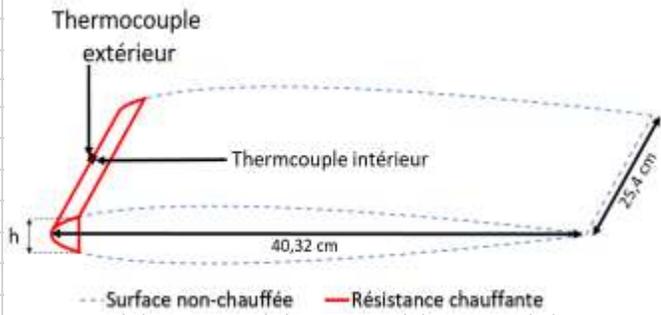
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	120

Fiche d'essai #:	15
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-14
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160314_171021	
à	
IMG_20160314_171619	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-15 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	17:09
Fin du dégivrage (hh:mm):	17:10
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:01
Tension (V):	65,45
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,9857
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	11,55 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-15,17 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	26,72 ± 0,5

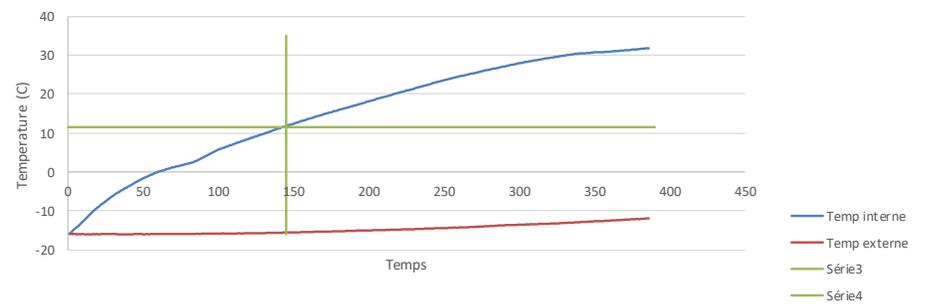


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Puissance totale fournie (W):	64,51
Puissance moyenne perdue (W)	3,45
Puissance moyenne de dégivrage (W)	61,07
Épaisseur de glace (cm):	2,31
Surface (cm²):	6,54
Volume de glace (cm³)	168,30
Densité (g/cm³)	0,92
Masse de glace (g):	154,83

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m						
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK						
Épaisseur de glace (cm):	2,57	2,37	1,90	2,19	2,27	
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	6,54	6,67	6,61			
	#1	#2	moyenne			

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

ANNEXE D
FICHES D'EXPÉRIENCES DE DÉGIVRAGE À -10°C

D.1 DURÉE D'ACCRÉTION DE 60 MIN

LIMA AMIL						
Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012						
1. Accrétion						
Gicleur #:			Fiche d'essai #:		32	
Température de l'air (°C):	-10 ± 0,5		Date (aaaa-mm-jj):		2016-03-19	
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5		Opérateur:		OF	
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03		Photos #:		Vidéos #:	
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3		IMG_20160319_224550			
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1		à			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0		IMG_20160319_224728			
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1		Échelle		1/0,534	
Angle d'attaque du profil (°):	0					
Durée de l'accrétion de glace (min):	60					
2. Dégivrage						
Température de l'air (°C):	-10 ± 0,5					
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1					
Début du dégivrage (hh:mm):	20:58					
Fin du dégivrage (hh:mm):	21:12					
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:13					
Tension (V):	40,35					
Résistance de chauffage (Ω):	66,40					
Courant (A):	0,6077					
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129					
Température moyenne en surface (°C):	18,88 ± 0,5		$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$			
Température moyenne à l'intérieur (°C):	3,17 ± 0,5					
ΔT Moyen (°C)	15,71 ± 0,5					
Puissance totale fournie (W):	24,52		Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK			
Puissance moyenne perdue (W)	2,03					
Puissance moyenne de dégivrage (W)	22,49					
Épaisseur de glace (cm):	10,17	10,36	10,25	10,29	10,30	10,27
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	0,77	0,73	0,75			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	19,09					
Densité (g/cm³)	0,34					
Masse de glace (g):	6,39					
Profil de température du dégivrage						
Commentaires:						
$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$		$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$		$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$		

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

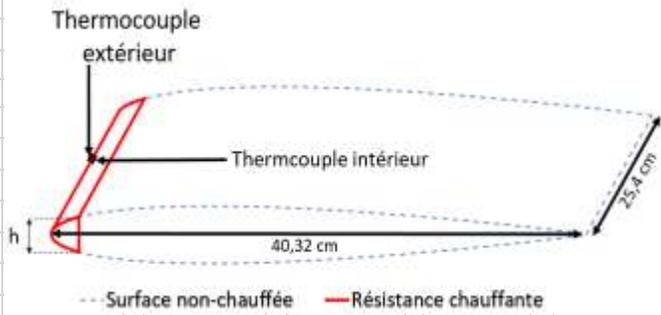
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-10 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	33
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-20
Opérateur:	OF
Photos #:	VIDÉOS #:
IMG_20160320_020120	
à	
IMG_20160320_020210	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-10 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	22:43
Fin du dégivrage (hh:mm):	0:19
Durée du dégivrage (hh:mm):	1:36
Tension (V):	32,73
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,4929
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	11,95 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	5,33 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	6,33 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	16,13
Puissance moyenne perdue (W)	0,82
Puissance moyenne de dégivrage (W)	15,32
Épaisseur de glace (cm):	9,59
Surface (cm²):	1,02
Volume de glace (cm³)	23,55
Densité (g/cm³)	0,34
Masse de glace (g):	7,89

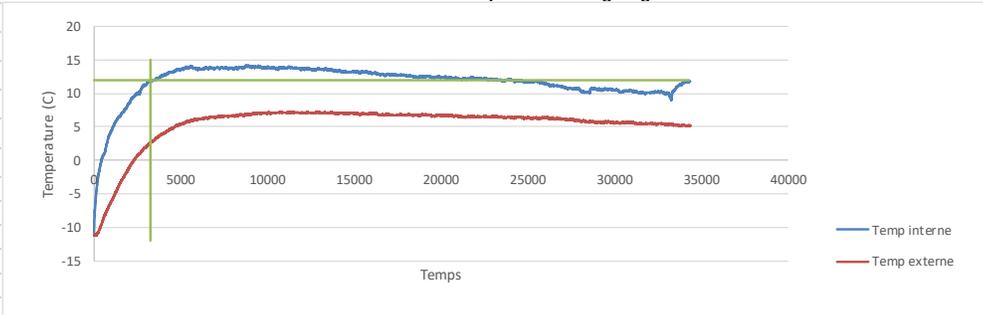


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	9,59	9,67	9,64	9,70	9,62	9,64
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	1,02	0,82	0,92			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	23,55					
Densité (g/cm³)	0,34					
Masse de glace (g):	7,89					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

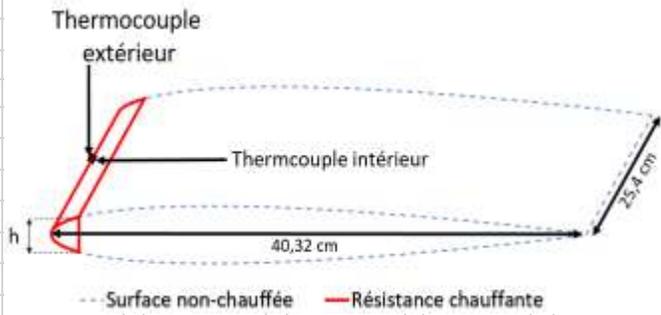
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-10 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	34
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-20
Opérateur:	OF
Photos #:	VIDÉOS #:
IMG_20160320_033847	
à	
IMG_20160320_034028	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

Température de l'air (°C):	-10 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	1:58
Fin du dégivrage (hh:mm):	2:01
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:03
Tension (V):	46,30
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,6973
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	12,38 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-7,38 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	19,76 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	32,28
Puissance moyenne perdue (W)	2,55
Puissance moyenne de dégivrage (W)	29,73
Épaisseur de glace (cm):	9,12
Surface (cm²):	1,02
Volume de glace (cm³)	31,20
Densité (g/cm³)	0,34
Masse de glace (g):	10,45

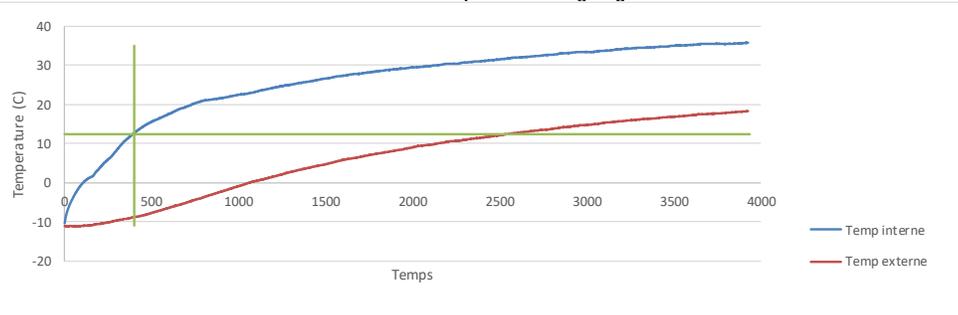


$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Épaisseur de glace (cm):	9,12	9,08	9,15	9,10	9,11	9,11
	#1	#2	#3	#4	#5	moyenne
Surface (cm²):	1,02	1,42	1,22			
	#1	#2	moyenne			
Volume de glace (cm³)	31,20					
Densité (g/cm³)	0,34					
Masse de glace (g):	10,45					

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$

Fiche de dégivrage en soufflerie d'un profil NACA 0012

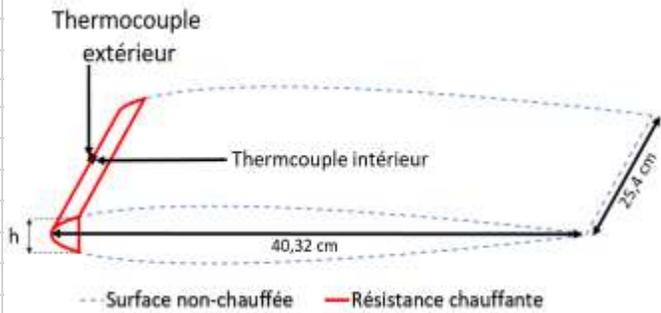
1. Accrétion

Gicleur #:	
Température de l'air (°C):	-10 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	10 ± 0,5
LWC (g/m³):	0,30 ± 0,03
Diamètre MVD (µm):	25 ± 3
Pression d'air aux gicleurs (psi):	80 ± 1
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #1 et #9):	0
Débit d'eau (mL/min) (Gicleurs #3 à #8):	1
Angle d'attaque du profil (°):	0
Durée de l'accrétion de glace (min):	60

Fiche d'essai #:	35
Date (aaaa-mm-jj):	2016-03-20
Opérateur:	OF
Photos #:	Vidéos #:
IMG_20160319_210125	
à	
IMG_20160320_045105	
Échelle	1/0,534

2. Dégivrage

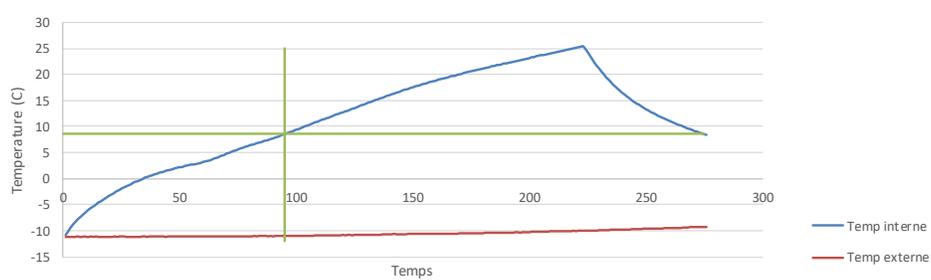
Température de l'air (°C):	-10 ± 0,5
Vitesse du vent (m/s):	5 ± 0,1
Début du dégivrage (hh:mm):	3:36
Fin du dégivrage (hh:mm):	3:36
Durée du dégivrage (hh:mm):	0:00
Tension (V):	65,40
Résistance de chauffage (Ω):	66,40
Courant (A):	0,9849
Surface de l'élément chauffant (m²):	0,0129
Température moyenne en surface (°C):	8,60 ± 0,5
Température moyenne à l'intérieur (°C):	-10,91 ± 0,5
ΔT Moyen (°C)	19,51 ± 0,5
Puissance totale fournie (W):	64,42
Puissance moyenne perdue (W)	2,52
Puissance moyenne de dégivrage (W)	61,90
Épaisseur de glace (cm):	9,17
#1	9,29
#2	9,25
#3	9,30
#4	9,15
#5	9,23
moyenne	
Surface (cm²):	1,40
#1	1,38
#2	1,39
moyenne	
Volume de glace (cm³)	35,41
Densité (g/cm³)	0,34
Masse de glace (g):	11,86



$$\frac{h_{reelle}}{h_{photo}} = \frac{0,534}{1}$$

Épaisseur Fibre de verre: 0,003 m
Conductivité Fibre de verre: 0,03 W/mK

Profil de température du dégivrage



Commentaires:

$$P_{totale} = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$P_{perdue} = kA \frac{(T_{surface_ext} - T_{surface_int})}{epaisseur}$$

$$P_{degivrage} = P_{totale} - P_{perdue}$$