

UNIVERSITE DU QUEBEC



MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

MARYELLE C. ADOMOU, ing. jr

B.Ing.

ÉTUDE EXPERIMENTALE DE L'UTILISATION DES REVETEMENTS
GLACIOPHOBES ET/OU HYDROPHOBES SUR LES PALES D'EOLIENNES

Août 2011

RÉSUMÉ

Un problème important de l'exploitation des éoliennes en climat nordique est le givrage des pales. Actuellement, l'utilisation de systèmes de protections contre le givre pour les pales est très peu répandue en raison de leur grande consommation énergétique et de leur aspect non sécuritaire. Une alternative très intéressante en ce moment est l'utilisation de revêtements glaciophobes car ils s'avèrent non énergivores mais leur efficacité et leur durabilité n'ont pas encore été démontrées en éolien. L'éolienne étant une structure dynamique particulière et les événements de givrage étant de plusieurs types, une compréhension du processus d'accrétion de la glace sur différents types de revêtements est nécessaire pour l'avancement des connaissances dans le domaine. À cette fin, des expériences ont été conduites dans la soufflerie réfrigérée du Laboratoire international des matériaux antigivre de l'Université du Québec à Chicoutimi sur une section d'une pale statique avec trois produits glaciophobes commerciaux choisis selon des critères spécifiques. Les conditions expérimentales se basent sur des événements de givrage réels et représentent un événement de givre sévère. La mise à l'échelle de ces événements de givre réels a conduit à deux vitesses en soufflerie (21 et 33m/s), deux températures de l'air (-5 et -20°C) et à une teneur en eau de 0.4g/m^3 . Les essais portent sur des surfaces de pales recouvertes avec les revêtements seuls et, ensuite, une combinaison de chaque revêtement avec un système électrothermique de protection contre le givre. L'évaluation de l'efficacité des dispositifs est effectuée par l'analyse des formes de glace obtenues, des puissances consommées par les diverses combinaisons d'antigivrage et de dégivrage et enfin grâce à l'analyse de la distribution des températures internes du système.

Lorsqu'il est utilisé comme système de protection contre le givre, aucun revêtement à caractère glaciophile n'est efficace pour réduire de façon significative l'accumulation de la glace sur les pales. Par contre, combiné à un système antigivrage électrothermique, ce type de revêtement s'avère efficace. La puissance doit néanmoins être suffisamment élevée de façon à occasionner un effet de ruissellement. Les revêtements hydrophobes réduisent d'environ 7% la puissance consommée par le système antigivrage électrothermique tandis qu'un revêtement superhydrophobe réduit jusqu'à deux fois plus cette puissance consommée. En mode dégivrage, une réduction de l'ordre de 15% est notée avec le revêtement superhydrophobe. Ces réductions de puissance sont dues en grande partie à l'hydrophobicité des surfaces.

ABSTRACT

Blade icing is a major problem of windmill use in northern climates. At present, the use of anti-icing protection on blades is little used because it is energy intensive and unsafe. An interesting current alternative is the use of ice-shedding coatings because they are proving to be less energy hungry, but their efficiency and durability have yet to be proven in windmills. Since windmills have a special dynamic structure and icing events can be of several types, an understanding of the accretion process on a variety of coatings is necessary to advance general knowledge in this field. To explore this problem, experiments were performed in the refrigerated wind tunnel at the Anti-icing Materials International Laboratory of the Université du Québec à Chicoutimi on a static-blade section covered with three commercial ice-shedding coatings chosen using well-defined criteria. Experimental conditions were based on several real extreme icing events. Scaling of the parameters of the icing events gave two air speeds for the wind tunnel (21 and 33m/s), two air temperatures (-5 and -20°C) and one humidity level (0.4g/m³). The experimental runs were carried out on blades covered with the coatings alone and also in combination with an electrothermal de-icing system. The efficiency of the apparatus was evaluated by analysing the shape of the ice formed, the energy consumption of each anti-icing and de-icing combination and also by analysing the internal distribution of temperatures in the system.

When used as a protective anti-icing system, none of the icephobic coatings was effective in reducing ice accumulation significantly on the blades. However, combined with an electrothermal anti-icing system, these types of coatings proved to be effective. Nevertheless, the power must be high enough to cause runoff. Hydrophobic coatings reduce

energy consumption of electric anti-icing systems by about 7% whereas a super hydrophobic coating can reduce energy consumption by more than twice this amount. In de-icing mode and using a super hydrophobic coating, a reduction of 15% was recorded. These power reductions are largely due to the hydrophobic nature of the surfaces.

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon directeur de recherche, le professeur Jean Perron pour m'avoir donné l'opportunité d'entreprendre ce projet et pour son soutien indéfectible et ses conseils judicieux. J'exprime également profonde gratitude à mon codirecteur de recherche, Dr Guy Fortin, pour ses remarques pertinentes, ses critiques et ses commentaires constructifs.

Je remercie le professeur Adrian Ilinca, pour avoir collaboré à l'élaboration de ce projet et pour avoir accepté de corriger ce mémoire malgré un emploi du temps chargé. Mes remerciements vont également au professeur Yasar Kocaeffe pour ses corrections et ses remarques pour l'amélioration de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement les techniciens du LIMA, Carol Mercier, Martin Truchon et Daniel Mercier pour leur aide technique inestimable et leur disponibilité. Mes reconnaissances vont aussi à tous les autres membres du LIMA, en particulier Elizabeth Crook pour son aide et Nathalie Gagné, pour ses encouragements appréciés tout au long de ces dernières années. Je n'oublie pas aussi tous mes collègues étudiants du LIMA, Mohamed Boussetoua, Jean Denis Brassard, Eric Villeneuve, Derek Harvey, Amine Noui et en particulier mon amie Ilham Ennaji, avec lesquels j'ai eu de nombreux échanges constructifs.

Je dédie ce mémoire à toute ma famille, en particulier à mon père, feu Léandre Adomou (11 Février 1961-19 Mars 2011) et à ma mère Estelle Yemadjê. Je n'oublie pas mon cher époux, Pierre Jomphe qui est un véritable soutien affectif et moral. Un spécial merci aussi à tous les amis d'ici et d'ailleurs pour leurs encouragements au fil des ans.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT.....	iv
REMERCIEMENTS.....	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xiii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	2
1.1. Historique et contexte du projet.....	2
1.2. Problématique	5
1.2.1. Possibles applications des revêtements antigivre sur les pales	5
1.2.2. Coût des systèmes actuels de dégivrage	6
1.3. Objectifs du projet de recherche	8
1.4. Méthodologie	9
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	12
2.1. Givrage des pales d'éolienne	12
2.1.1. Formation de la glace, régimes d'accrétion et formes de glace.....	12
2.1.2. Effets du givre en éolien.....	13
2.2. Systèmes de dégivrage actuels.....	16
2.2.1. Systèmes actifs	16
2.2.2. Systèmes passifs	18

2.3.	Revêtements glaciophobes.....	20
2.3.1.	Mouillabilité	20
2.3.2.	Mécanisme d'adhérence de la glace	23
2.3.3.	Revêtements glaciophobes	26
2.3.4.	Revêtements antigel.....	28
CHAPITRE 3 MATÉRIELS ET MESURES EXPÉRIMENTALES.....		31
3.1.	Montage expérimental	31
3.2.	Choix et validation du matériau de pale	34
3.3.	Essais préliminaires	36
3.4.	Sélection des revêtements.....	37
3.5.	Conditions expérimentales et similitude.....	39
3.5.1.	Conditions réelles	39
3.5.2.	Similitude et conditions expérimentales.....	44
3.6.	Soufflerie réfrigérée et module de chauffage	46
3.7.	Procédures expérimentales	50
3.7.1.	Mesure de l'angle de contact de l'eau	50
3.7.2.	Essais en soufflerie réfrigérée	54
CHAPITRE 4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX		56
4.1.	Mesure de l'angle de contact pour les revêtements	57
4.2.	Influence de la présence de la pellicule plastique.....	58
4.3.	Essais d'accumulation.....	63
4.3.1.	Description d'un essai-type	64

4.3.2.	Résultats	66
4.4.	Comportement des revêtements en mode antigivrage	71
4.4.1.	Description d'un essai-type	75
4.4.2.	Investigation de la puissance seuil de ruissellement	78
4.4.3.	Essais à 50% de la puissance de ruissellement.....	84
4.4.4.	Effet du ruissellement.....	85
4.5.	Comportement des revêtements en mode de dégivrage.....	88
4.5.1.	Description d'un essai-type en mode dégivrage.....	88
4.5.2.	Dégivrage de l'intrados	91
4.5.3.	Dégivrage du bord d'attaque	98
4.6.	Reproductibilité et répétitivité des essais.....	106
4.6.1.	Théorie.....	106
4.6.2.	Reproductibilité : résultats pour les essais sans dégivrage	107
4.6.3.	Répétabilité : résultats pour la stratégie antigivrage de la pale	109
4.6.4.	Répétabilité : résultats pour la stratégie dégivrage (« de-icing ») de la pale....	113
CHAPITRE 5 EXTRAPOLATION DU COÛT DE DÉGIVRAGE		119
CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		125
6.1.	Conclusions.....	125
6.2.	Recommandations.....	127
LISTE DE RÉFÉRENCES		128
ANNEXE A MISE À L'ÉCHELLE DES CONDITIONS CLIMATIQUES		134
Introduction.....		134

A.1. Description.....	135
A.2. Équations et paramètres utilisés.....	137
A.3. Calculs avec le logiciel MAPLE.....	141
A.3.1 Calculs pour la position 1	141
A.3.2 Calculs pour la position 2	147
ANNEXE B ÉTALONNAGE DE LA TENEUR EN EAU LIQUIDE	154
Introduction.....	154
B.1. Équations	155
B.2. Procédure expérimentale.....	156
B.3. Résultats.....	159
ANNEXE C PRÉSENTATION DES ESSAIS	165
C.1. Essais d'accumulation.....	166
C.2. Essais en mode antigivrage.....	182
C.3. Essais en mode dégivrage	266
C.3.1. Dégivrage de l'intrados.....	266
C.3.2. Dégivrage du bord d'attaque.....	281
ANNEXE D INFORMATIONS SUR LES PRODUITS	298

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 : RECAPITULATIF DES REGIMES D'ACCRETION ET FORMES DE LA GLACE.....	13
TABLEAU 2.2 : RESUME DES SYSTEMES DE DEGIVRAGE ACTIFS.....	17
TABLEAU 3.1 : TABLEAU COMPARATIF DE DIFFERENTS MATERIAUX POUR LA FABRICATION DES SECTIONS DE PALES.....	36
TABLEAU 3.2 : RESUME DES CARACTERISTIQUES DES PRODUITS EVALUES	39
TABLEAU 3.3 : PARAMETRES REELS CHOISIS	44
TABLEAU 3.4 : CONDITIONS DE GIVRAGE REELLES	45
TABLEAU 3.5 : RESUME DES CONDITIONS CLIMATIQUES RETENUES.....	45
TABLEAU 4.1 : RESULTATS DE L'ANGLE DE CONTACT.....	58
TABLEAU 4.2 : TABLEAU RÉSUMANT LES CONDITIONS UTILISÉES	63
TABLEAU 4.3 : LISTE DES ESSAIS D'ACCUMULATION EFFECTUES	65
TABLEAU 4.4 : LISTE DES ESSAIS D'ACCUMULATION EFFECTUES (FIN).....	66
TABLEAU 4.5 : TABLEAU RÉSUMANT LES VALEURS CARACTÉRISTIQUES DES FORMES DE GLACE EN RÉGIME SEC.....	69
TABLEAU 4.6 : TABLEAU RÉSUMANT LES VALEURS CARACTÉRISTIQUES DES FORMES DE GLACE EN RÉGIME HUMIDE	69
TABLEAU 4.7 : DESCRIPTION DES CONDITIONS CLIMATIQUES TESTEES.....	71
TABLEAU 4.8 : LISTE DES ESSAIS POUR LE MODE ANTIGIVRAGE POUR LA CONDITION CLIMATIQUE N°1	72
TABLEAU 4.9 : LISTE DES ESSAIS RETENUS POUR LE MODE ANTIGIVRAGE POUR LA CONDITION CLIMATIQUE N°2	73
TABLEAU 4.10 : LISTE DES ESSAIS RETENUS POUR LE MODE ANTIGIVRAGE POUR LA CONDITION CLIMATIQUE N°3	73
TABLEAU 4.11 : LISTE DES ESSAIS RETENUS POUR LE MODE ANTIGIVRAGE POUR LA CONDITION CLIMATIQUE N°3 (SUITE).....	74

TABLEAU 4.12 : LISTE DES ESSAIS RETENUS POUR LE MODE ANTIGIVRAGE POUR LA CONDITION CLIMATIQUE N°4	75
TABLEAU 4.13 : RESUME DES PUISSANCES SEUIL DE RUISSELLEMENT (P_{SEUIL})	78
TABLEAU 4.14 : INFLUENCE DES REVETEMENTS SUR LE RUISSELLEMENT.....	87
TABLEAU 4.15 : LISTE DES ESSAIS EFFECTUES EN MODE DEGIVRAGE DE L'INTRADOS A FAIBLE VITESSE.....	93
TABLEAU 4.16 : LISTE DES ESSAIS EFFECTUES EN MODE DEGIVRAGE DE L'INTRADOS A FORTE VITESSE	97
TABLEAU 4.17 : RESUME DES PUISSANCES SEUIL DE « DEGIVRAGE ».....	98
TABLEAU 4.18 : TABLEAU COMPARATIF DES PUISSANCES MINIMALES DE DEGIVRAGE	100
TABLEAU 4.19 : RESUME DES CONDITIONS DE REPRODUCTIBILITE.....	107
TABLEAU 4.20 : RESULTATS	107
TABLEAU 4.21 : RESUME DES CONDITIONS DE REPETABILITE.....	109
TABLEAU 4.22 : RESUME DES CONDITIONS DE REPETABILITE.....	114
TABLEAU 5.1 : DENSITE DE PUISSANCE EN FONCTION DE LA SURFACE ET DU MODE DE DEGIVRAGE UTILISE	120
TABLEAU 5.2 : EXTRAPOLATION DE LA PUISSANCE CONSOMMEE POUR LE MODE ANTIGIVRAGE	121
TABLEAU 5.3 : EXTRAPOLATION DE LA PUISSANCE CONSOMMEE POUR LE MODE DEGIVRAGE	122

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : GRAPHIQUE TRADUIT DE L'ANGLAIS MONTRANT LA RÉPARTITION DES CONSEQUENCES DUES AU GIVRAGE ET AUX BASSES TEMPÉRATURES EN FINLANDE DE 1996 À 2002 (SOURCE [3]).....	3
FIGURE 1.2 : CRETES DE GLACE FORMEES A CAUSE DE L'EFFET DE RUISSELLEMENT	7
FIGURE 2.1 : A) ÉOLIENNE EN ZONE DE CLIMAT FROID (PYHÄTUNTURI-FJELL FINLAND) B) ANÉMOMÈTRES GIVRÉS	14
FIGURE 2.2 : PALES RECOUVERTES DU STACLEAN™ ET LEUR FONCTIONNEMENT EN PERIODE DE GIVRAGE.....	19
FIGURE 2.3 : GOUTTE D'UN LIQUIDE EN EQUILIBRE MONTRANT L'ANGLE DE CONTACT ET LES ENERGIES DU SYSTEME.....	20
FIGURE 2.4 : MODÈLES DE WENZEL ET CASSIE-BAXTER PERMETTANT DE RENDRE COMPTE DE L'AUGMENTATION DE L'ANGLE DE CONTACT DÉPENDAMMENT DE LA RUGOSITÉ	23
FIGURE 3.1 : SCHEMA DU PROFIL AVEC LA POSITION DES DEUX ELEMENTS CHAUFFANTS ..	32
FIGURE 3.2 : SCHEMA EN 3-D DU MODELE DE PALE	33
FIGURE 3.3 : SCHEMA D'UN PROFIL NACA 63-415	33
FIGURE 3.4 : VUE DU MODELE REDUIT DE PALE MONTE DANS LA SECTION D'ESSAI	34
FIGURE 3.5 : IMAGE MONTRANT LE COMPORTEMENT DE LA PALE EN PLASTIQUE ET DE CELLE EN ALUMINIUM LORS D'UN DEGIVRAGE AVEC PUISSANCE EGALE.....	37
FIGURE 3.6 : RÉSULTATS DE LA MESURE PAR FORCE CENTRIFUGE DE L'ADHÉRENCE DE LA GLACE SUR CERTAINS REVÊTEMENTS [34].....	38
FIGURE 3.7 : MASSE DE GLACE ACCUMULEE LE LONG D'UNE PALE [35].....	40
FIGURE 3.8 : SCHEMA MONTRANT LES DEUX POSITIONS RADIALES RETENUES.....	41
FIGURE 3.9 : VITESSES DU VENT AU NIVEAU D'UN PROFIL DE PALE [16].....	42
FIGURE 3.10 : SCHEMA DE LA SOUFFLERIE REFRIGEREE	47

FIGURE 3.11 : PHOTO MONTRANT LA SECTION D'ESSAI	48
FIGURE 3.12 : STATION DE CONTROLE ET D'ACQUISITION DE DONNEES LORS DES EXPERIMENTATIONS	48
FIGURE 3.13 : LOGICIEL D'ACQUISITION DE DONNEES ET DE CONTROLE DES PARAMETRES CLIMATIQUES	49
FIGURE 3.14 : A) MESURES D'ANGLES D'AVANCÉE ET B) DE REÇULÉE SUR UNE SURFACE....	51
FIGURE 3.15 : PHOTOGRAPHIE DE L'APPAREIL DE MESURE D'ANGLES DE CONTACT	52
FIGURE 3.16 : GOUTTE D'EAU SUR UNE SURFACE HYDROPHOBE.....	53
FIGURE 3.17 : BARRE D'OUTILS	53
FIGURE 3.18 : EEMPLACEMENT DES MARQUEURS ET CALCUL AUTOMATIQUE DE L'ANGLE DE CONTACT GAUCHE ET DROIT	53
FIGURE 4.1 : ESSAIS SANS PRECIPITATIONS (A -20°C).....	59
FIGURE 4.2 : ESSAIS AVEC PRECIPITATIONS (A -20°C).....	60
FIGURE 4.3 : ESSAIS AVEC PRECIPITATIONS (A -5°C).....	62
FIGURE 4.4 : SCHEMA MONTRANT LES VALEURS CARACTERISTIQUES DES FORMES DE GLACE	64
FIGURE 4.5 : PHOTO MONTRANT LE GIVRE QUI EPOUSE LA FORME DU PROFIL DE PALE.....	67
FIGURE 4.6 : PHOTO MONTRANT LA FORME EN CORNE POUR LE VERGLAS.....	67
FIGURE 4.7 : PHOTOS PRÉSENTANT L'ACCUMULATION DE LA GLACE SELON LE RÉGIME D'ACCRÉTION ET LE TYPE DE REVÊTEMENT	68
FIGURE 4.8 : GRAPHIQUES MONTRANT LE POURCENTAGE DE REDUCTION DU VOLUME DE GLACE ACCUMULE EN FONCTION DE L'HYDROPHOBICITE DU REVETEMENT	70
FIGURE 4.9 : COURBE DES TEMPERATURES INTERNES LORS D'UN ESSAI EN MODE ANTIGIVRAGE	77
FIGURE 4.10 : ZONE DE STABILISATION AGRANDIE	77

FIGURE 4.11 : EXTRAPOLATION DE LA REDUCTION DE LA PUISSANCE DE DEGIVRAGE MINIMALE EN FONCTION DE L'HYDROPHOBICITE DE LA SURFACE DU REVETEMENT..	79
FIGURE 4.12 : PROFIL DES TEMPERATURES INTERNES EN REGIME SEC	80
FIGURE 4.13 : PROFIL DES TEMPERATURES INTERNES EN REGIME HUMIDE	81
FIGURE 4.14 : PHOTOS DES REVETEMENTS A LA FIN DES ESSAIS ANTIGIVRE LORSQUE LA PUISSANCE DE DEGIVRAGE EST EGALE A LA PUISSANCE MINIMALE DE RUISSELLEMENT (P_{SEUIL})	83
FIGURE 4.15 : FORME DE GLACE LORS DU DEGIVRAGE A FAIBLE PUISSANCE	85
FIGURE 4.16 : GRAPHIQUE MONTRANT L'INFLUENCE DU REVETEMENT SUR LES FORMES DE GLACE EN DEGIVRAGE	86
FIGURE 4.17 : EXEMPLE DE FICHER DES TEMPERATURES INTERNES EN FONCTION DU TEMPS LORS D'UN ESSAI DE DEGIVRAGE	90
FIGURE 4.18 : VUE AGRANDIE DES TEMPERATURES INTERNES EN FONCTION DU TEMPS SUR DEUX CYCLES DE DEGIVRAGE	91
FIGURE 4.19 : CIRCUITS ELECTRIQUES MONTRANT LE CHAUFFAGE DES ELEMENTS CHAUFFANTS 1 ET 2 LORS DU DEGIVRAGE DE L'INTRADOS.....	92
FIGURE 4.20 : COMPARAISON A PUISSANCE EGALE: GRAPHES DES TEMPERATURES T1 ET T3 EN FONCTION DU TEMPS.....	94
FIGURE 4.21 : COMPARAISON A PUISSANCE EGALE : GRAPHES DES TEMPERATURES T2 ET T4 EN FONCTION DU TEMPS.....	95
FIGURE 4.22 : COMPARAISON A PUISSANCE EGALE : IMAGES DES PALES A LA FIN DE DEUX CYCLES DE DEGIVRAGE	96
FIGURE 4.23 : CIRCUITS ELECTRIQUES MONTRANT LE CHAUFFAGE DES ELEMENTS CHAUFFANTS 1 ET 2 LORS DU DEGIVRAGE DU BORD D'ATTAQUE	99
FIGURE 4.24 : REGIME HUMIDE : GRAPHES DE T_1 ET T_3 EN FONCTION DU TEMPS LORS DU DEGIVRAGE A PUISSANCE SEUIL POUR CHACUNE DES SURFACES	101

FIGURE 4.25 : REGIME HUMIDE : GRAPHES DE T_2 ET T_4 EN FONCTION DU TEMPS LORS DU DEGIVRAGE A PUISSANCE SEUIL POUR CHACUNE DES SURFACES	101
FIGURE 4.26 : REGIME SEC : GRAPHES DE T_1 ET T_3 EN FONCTION DU TEMPS LORS DU DEGIVRAGE A PUISSANCE SEUIL POUR CHACUNE DES SURFACES	102
FIGURE 4.27 : REGIME SEC : GRAPHES DE T_2 ET T_4 EN FONCTION DU TEMPS LORS DU DEGIVRAGE A PUISSANCE SEUIL POUR CHACUNE DES SURFACES	102
FIGURE 4.28 : IMAGES DES SURFACES A LA FIN DE DEUX CYCLES DE DEGIVRAGE POUR LE REGIME HUMIDE	104
FIGURE 4.29 : IMAGES DES SURFACES A LA FIN DE DEUX CYCLES DE DEGIVRAGE POUR LE REGIME SEC	105
FIGURE 4.30 : COMPARAISON VISUELLE DE LA GLACE POUR LES DEUX ESSAIS DE LA SERIE 2	108
FIGURE 4.31 : GRAPHES MONTRANT T_1 ET T_3 EN FONCTION DU TEMPS POUR LES ESSAIS DE LA SERIE 3	110
FIGURE 4.32 : GRAPHES MONTRANT T_2 ET T_4 EN FONCTION DU TEMPS POUR LES ESSAIS DE LA SERIE 3	110
FIGURE 4.33 : GRAPHES MONTRANT T_1 ET T_3 EN FONCTION DU TEMPS POUR LES ESSAIS DE LA SERIE 4	111
FIGURE 4.34 : GRAPHES MONTRANT T_2 ET T_4 EN FONCTION DU TEMPS POUR LES ESSAIS DE LA SERIE 4	111
FIGURE 4.35 : COMPARAISON VISUELLE DES ESSAIS DES SERIES 3 ET 4.....	113
FIGURE 4.36 : GRAPHES MONTRANT T_1 ET T_3 EN FONCTION DU TEMPS POUR LES ESSAIS DE LA SERIE 5	114
FIGURE 4.37 : GRAPHES MONTRANT T_2 ET T_4 EN FONCTION DU TEMPS POUR LES ESSAIS DE LA SERIE 5	115

FIGURE 4.38 : GRAPHES MONTRANT T_1 ET T_3 EN FONCTION DU TEMPS POUR LES ESSAIS DE LA SERIE 6	115
FIGURE 4.39 : GRAPHES MONTRANT T_2 ET T_4 EN FONCTION DU TEMPS POUR LES ESSAIS DE LA SERIE 6	116
FIGURE 4.40 : COMPARAISON VISUELLE DES ESSAIS DES SERIES 5 ET 6.....	117
FIGURE 5.1 : ÉOLIENNE VESTAS DE 1,8 MW INSTALLÉE A MURDOCHVILLE [38]	119

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

Symboles	Description	Unités
A	Aire moyenne	m ²
A _c	Paramètre d'accumulation	
b	Facteur pour la chaleur relative	
c	Corde du profil	m
C _p	Chaleur spécifique	J/kg/K
d	Diamètre	m
d _c	Diamètre du bord d'attaque du profil	m
E	Efficacité de la collection	
h _c	Coefficient de transfert de chaleur	W/K/m ²
h _{film}	Épaisseur du film d'eau	m
h _G	Coefficient de transfert masse-gaz	kg/s m ²
k	Conductivité thermique	W/m/K
K	Paramètre d'inertie	
K ₀	Paramètre d'inertie modifié	
LWC	Teneur en eau liquide	g/m ³
m	Masse	kg
MVD	Diamètre volumétrique médian	m
Nu	Nombre de Nusselt	
Pr	Nombre de Prandtl de l'air	

P	Pression	Pa
R_a	Constante spécifique de l'air	J/kg/K
Re	Nombre de Reynolds	
r_{le}	Rayon du bord d'attaque	m
t	Durée	s
T	Température	K
U	Vitesse	m/s
α	Coefficient de diffusion thermique	m ² /s
β	Coefficient de collection	
β_0	Coefficient de collection au point de stagnation	
γ	Tension interfaciale	N/m
θ	Angle de contact de l'eau	°
θ_m	Angle maximum de collection	rad
$(\lambda/\lambda_{Stokes})$	Paramètre de la distance de parcours des gouttelettes	
μ	Viscosité dynamique	Pa.s
ρ	Densité	kg/m ³
ν	Viscosité cinématique	m ² /s
φ	Paramètre d'impact de Langmuir et Blodgett	K
a	Symbole pour l'air	
w	Symbole pour l'eau	
s	Symbole pour le modèle réduit	

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1. Historique et contexte du projet

La puissance éolienne disponible dans le vent est proportionnelle à la densité de l'air et au cube de la vitesse du vent [1]. La vitesse du vent varie au cours d'une journée et selon les saisons; ainsi elle est généralement plus élevée le jour que la nuit, et en hiver plutôt qu'en été. Quant à la densité de l'air, elle augmente quand la température baisse. Ainsi le vent est plus dense dans les régions froides que dans les régions plus chaudes. La puissance disponible dans l'air augmente donc en hiver et malheureusement les meilleurs sites sont situés dans les zones de climat froid. Ces régions sont communément appelées «milieu nordique». Les éoliennes installées dans ces régions sont donc soumises fortement aux aléas du givrage qui représente l'un des plus grands défis de l'exploitation des éoliennes dans les régions froides [2]. Dans l'industrie éolienne, le givrage a des conséquences financières mais aussi sécuritaires et touche la structure de l'éolienne au complet, c'est-à-dire des pales aux instruments de mesure. Mais lors d'un événement givrant, les éléments les plus touchés sont les pales (Figure 1.1).

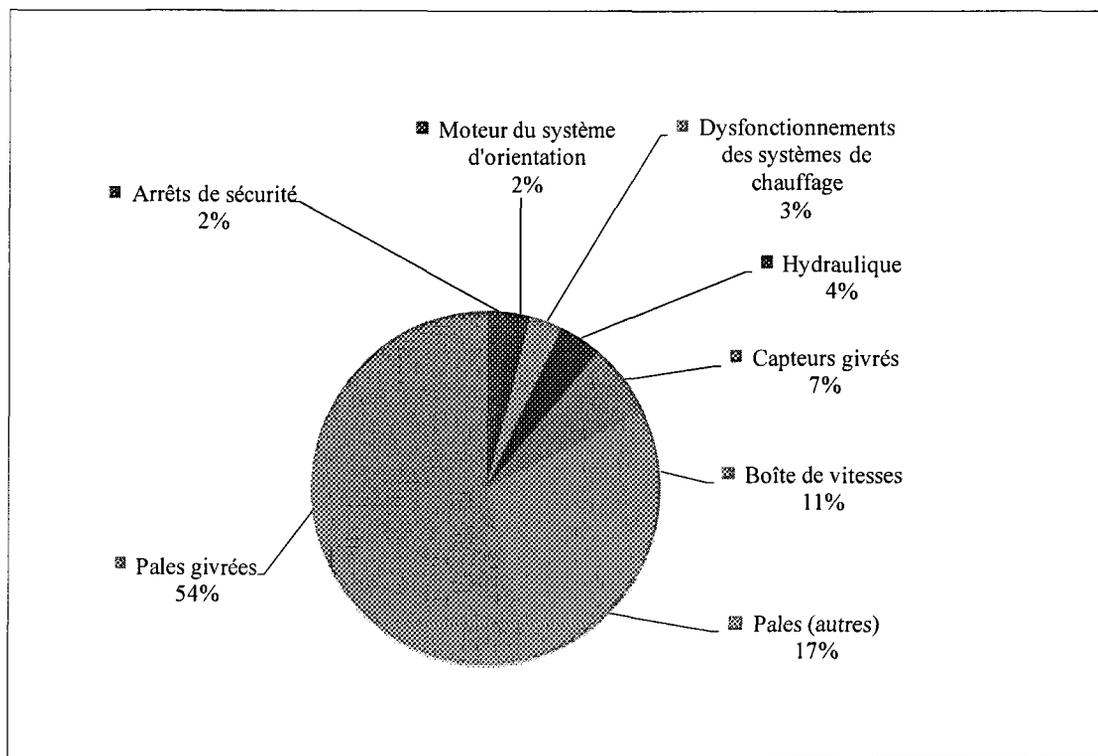


Figure 1.1 : Graphique traduit de l'anglais montrant la répartition des conséquences dues au givrage et aux basses températures en Finlande de 1996 à 2002 (Source [3])

L'accumulation de givre sur les pales dégrade significativement le rendement aérodynamique de celles-ci (l'accrétion de glace étant favorisée par la rotation), et la masse de glace ajoutée en conditions givrantes sévères peut amener à la rupture statique d'une pale. Le rendement de l'installation est alors fortement diminué et les pertes de production peuvent être considérables. Lors des épisodes de givrage, une baisse de puissance moyenne de l'ordre de 27% peut être enregistrée [4]. D'autre part, la chute d'un bloc de glace se détachant d'une pale représente un danger important. Le remède ne consiste donc pas éventuellement à immobiliser le rotor en cas de précipitations givrantes (en raison des pertes financières possibles [5]), mais à munir la machine d'un dispositif de dégivrage à

l'instar de ceux que l'on trouve habituellement sur les avions ou les hélicoptères. Le but des systèmes de dégivrage des pales est donc de prévenir, de réduire ou d'éliminer l'accumulation de glace sur la pale. Ils sont de plusieurs types et sont évalués selon leur degré d'efficacité et de complexité d'installation, mais surtout selon leur coût.

Ces systèmes permettent de protéger les éoliennes, d'éviter de devoir les arrêter en période de givrage sévère et par conséquent d'éviter d'énormes pertes économiques. Ils utilisent différentes techniques qui sont le résultat de recherches en laboratoire et d'essais sur le terrain. Néanmoins la quasi-totalité de ces méthodes sont énergivores ou carrément inefficaces. L'une des solutions retenues (et la plus utilisée) est le dégivrage électrothermique des équipements ; mais la consommation énergétique constitue un inconvénient sans considérer le fait que cette méthode n'est pas efficace à 100%. Un autre inconvénient des systèmes de dégivrage électrothermique concerne leur aspect non sécuritaire. En effet, des morceaux de glace peuvent se détacher des pales lors du dégivrage. De plus, le but étant de produire de l'énergie à moindre coût, les méthodes moins, voire non énergivores sont les meilleures alternatives. Les revêtements antigivre pourraient donc être une alternative sérieuse pour la protection des pales. La recherche avance vite et quelques types de revêtements pour la protection des structures contre le givre (antennes ou anémomètres par exemple) sont déjà sur le marché. L'industrie éolienne ne possédant pas assez d'informations sur l'utilisation de tels revêtements, il convient de faire une étude appropriée en laboratoire pour l'avancement des connaissances dans le domaine.

1.2. Problématique

1.2.1. Possibles applications des revêtements antigivre sur les pales

Le givre même léger peut réduire jusqu'à 30%, la production d'une éolienne et un fort givrage peut entraîner des pertes annuelles pouvant atteindre 10% de la production totale [6]. Il y a donc nécessité de dégivrer. Mais le développement ou l'évaluation d'un système de dégivrage passe absolument par l'identification des conditions climatiques car les types et les formes de glace dépendent principalement des températures et de la teneur en eau liquide. Les conditions de givrage sont des données relevées sur des sites réels et pour cette étude, elles sont destinées à être reproduites en laboratoire. Y a-t-il donc nécessité d'une mise à l'échelle dans ce cas-ci? De plus, une étude de dégivrage à l'échelle de la soufflerie donnera des résultats qui pourront être mis à la disposition des acteurs de l'industrie sous forme de corrélations avec des données détenues dans l'industrie.

Laakso et al. (2005) ont recommandé que la température des systèmes de chauffage n'excède pas 50°C [6]. Les systèmes de dégivrage sont donc limités par la température de chauffage que peut supporter le matériau de la pale, dépendamment de son épaisseur. Mais une possible utilisation de revêtements sur les pales d'éoliennes soulève quelques questions : durant les journées d'été, la température d'un revêtement antigivre s'élèverait-il au point de nuire aux propriétés mécaniques du matériau de la pale [7]. En période de givrage sévère, les revêtements antigivre seront-ils efficaces sans une autre forme de dégivrage associée? Dans leur étude, Kimura et al. (2003) ont conclu entre autre que les revêtements à caractère glaciophobe évalués ne peuvent réduire qu'en partie l'adhérence de la glace à la surface traitée et suggère une combinaison «revêtement à caractère

glaciophobe/système de dégivrage actif ou passif» [8]. Il serait intéressant de confirmer ou d'infirmier cette conclusion car les informations sur de possibles applications sont rares. Dans sa thèse, Kraj (2007) a comparé l'adhérence de la glace aux différentes surfaces combinées au dégivrage thermique [9]. Elle s'est arrêtée sur de possibles méthodes d'atténuations, mais n'a pas étudié l'effet de ruissellement (« run-back ») sur les pales lors du dégivrage électrothermique. Il faut donc chercher à voir si la combinaison «dégivrage thermique/revêtement antigivre» améliorerait voire empêcherait l'effet de ruissellement observé dans le cas du dégivrage thermique. Quels sont les meilleurs types de revêtement pour une telle combinaison? Kimura et al. (2003) suggèrent par exemple une combinaison d'une méthode de dégivrage ou d'antigivrage avec un revêtement antigivre ou hydrophobe [8]. Mais l'une des plus grandes problématiques réside dans le fait que des données sur l'utilisation des revêtements antigivre en industrie ou en laboratoire sont peu nombreuses.

1.2.2. Coût des systèmes actuels de dégivrage

Le principal inconvénient des systèmes de dégivrage actuellement exploités est leur consommation énergétique. Pour économiser l'énergie, les éléments chauffants ne sont généralement appliqués que le long du bord d'attaque de la pale. Lors du dégivrage, l'eau évacuée le long de la pale au cours du chauffage en condition de givre regèle une fois qu'elle a quitté la zone chauffée [10]. En effet, la problématique du mode antigivrage est que le film d'eau qui s'écoule à la surface de l'objet tend à se solidifier lorsque la température à la surface de l'objet est près de 0°C, soit dans les zones qui ne sont pas protégées (voir Figure 1.2). Ce phénomène est aussi observé lors du mode dégivrage, mais en très faible quantité comparativement au mode antigivrage. Pour éliminer l'eau, le

Le système doit soit opérer en mode évaporation (consommation excessive d'énergie) ou bien il faut équiper la pale en entier d'éléments chauffants de sorte qu'il n'y ait pas de zones non chauffées. Cette alternative coûte aussi trop chère. Actuellement le mode antigivrage requière de 6 à 12% de la puissance totale produite par les éoliennes de petite taille. Serait-il donc possible de faire évacuer l'eau due à l'effet de ruissellement grâce au revêtement glaciophobe, ou superhydrophobe de sorte à diminuer le coût en termes de puissance consommée?

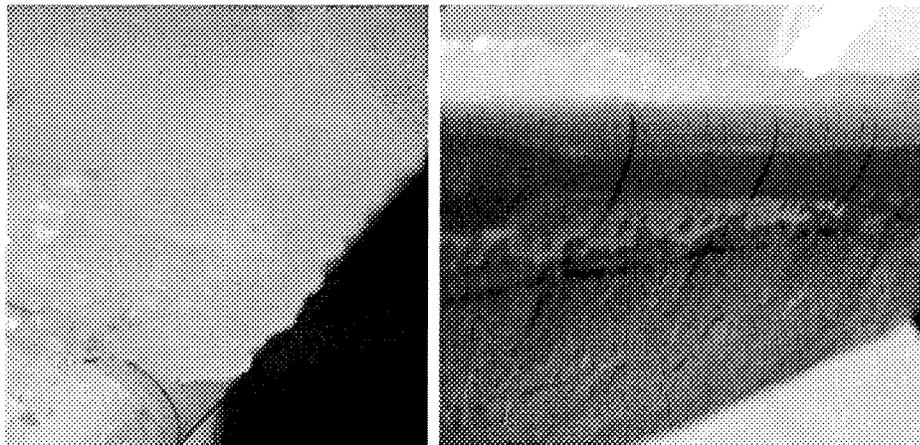


Figure 1.2 : Crêtes de glace formées à cause de l'effet de ruissellement

Le mode dégivrage consomme actuellement moins de puissance que le mode précédent. Grâce aux forces centrifuges, il permet d'évacuer la glace une fois formée, grâce à l'élévation de la température de surface de la pale aux alentours de 0°C . Selon Weis (2002) si la température de la surface peut être maintenue à -5°C au lieu de 0°C , des gains de 33% sur les coût de chauffage peuvent être faits [11]. En sélectionnant un matériau dont l'énergie de surface est moindre, se pourrait-il que le seuil du 0°C pour l'évacuation des

morceaux de glace soit abaissé? L'économie en énergie de dégivrage vaudra-t-elle l'investissement en revêtement?

Il est à noter aussi que les éléments chauffant électriques noyés dans la pale peuvent attirer la foudre sur la structure exposée. Les revêtements pourraient protéger par exemple les éoliennes de ce type de désagrément [12].

1.3. Objectifs du projet de recherche

Des problématiques énoncées plus haut, se dégagent plusieurs objectifs pour cette étude. Le principal objectif est de montrer si certains revêtements commerciaux (glaciophobes ou hydrophobes) qui existent sur le marché, peuvent être utilisés pour le dégivrage passif des éoliennes, et être une option plus économique par rapport aux autres moyens de dégivrage. Il faut donc déterminer une stratégie de dégivrage peu énergivore, efficace et adaptée aux éoliennes exploitées dans le climat nordique grâce à l'étude du comportement de trois revêtements à caractère glaciophobe en soufflerie réfrigérée. Ceci permettra de faire avancer les connaissances dans l'utilisation des tels revêtements sur les pales et d'orienter les fabricants et les exploitants d'éoliennes en milieu nordique vers une autre alternative de protection des pales.

Il convient aussi d'évaluer la relation entre l'accrétion de la glace et les différents paramètres usuels (LWC, température, MVD) pour chaque type de revêtement (hydrophobe, superhydrophobe et à caractère glaciophobe) et enfin de déterminer l'efficacité de la combinaison revêtement/système de dégivrage thermique selon les deux stratégies de contrôle (mode antigivrage et mode dégivrage). Un autre objectif est de

démontrer en mode antigivrage (avec ruissellement) quel est le type de revêtement le plus favorable.

1.4. Méthodologie

Les expériences sont conduites sur un modèle réduit de section de pale (en raison des restrictions dues aux dimensions de la section d'essais de la soufflerie réfrigérée utilisée) avec trois produits glaciophobes commerciaux choisis selon des critères précis. Chaque pale est munie de deux éléments chauffants installés au niveau du bord d'attaque et de capteurs thermiques placés à la surface de la pale.

Les conditions expérimentales se basent sur des événements de givrage réels. Une mise à l'échelle de ces conditions est nécessaire pour une utilisation en laboratoire. Les essais sont effectués dans la soufflerie réfrigérée du Laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA) à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Les essais portent sur les surfaces des pales fabriquées recouvertes avec les revêtements sélectionnés dans un premier temps, et ensuite sur une combinaison de chaque revêtement avec le système de dégivrage électrothermique.

L'évaluation de l'efficacité des dispositifs se fera entre autres par l'analyse des formes de glaces obtenues, les températures mesurées et l'énergie utilisée pour dégivrer la pale. Afin de valider les essais, un revêtement glaciophobe qui a déjà donné des résultats, suite à une utilisation sur le terrain, sera utilisé à titre comparatif. La finalité de l'étude est de démontrer et de quantifier l'efficacité des revêtements glaciophobes seuls et aussi lorsqu'ils sont combinés à un système électrothermique de protection contre le givre. Ceci

permettra d'orienter les fabricants et les exploitants d'éoliennes en milieu nordique vers la meilleure alternative de protection des pales et ainsi de permettre une meilleure utilisation des éoliennes en climat froid.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTERATURE

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTERATURE

2.1. Givrage des pales d'éolienne

2.1.1. Formation de la glace, régimes d'accrétion et formes de glace

Le phénomène de givrage est un phénomène météorologique résultant de la captation et de la congélation de gouttelettes d'eau surfondues présentes dans l'atmosphère. Il apparaît lorsque la température est en dessous de 0 °C et en présence d'humidité dans l'air. La thermodynamique de la formation de la glace est détaillée dans l'article de Mazin et al. (2001) [13]. Le type, la quantité et la densité de la glace dépendent aussi bien des conditions météorologiques que des dimensions, de la forme et de l'état de la structure, si celle-ci est en rotation ou à l'état statique [10]. Lozowski et al. (1983) ont durant leur étude mis en évidence les deux principaux régimes d'accrétions de la glace et les principales formes de glace associées [14]. Le Tableau 2.1 donne un récapitulatif des principales caractéristiques des deux principaux régimes d'accrétion.

Tableau 2.1 : Récapitulatif des régimes d'accrétion et formes de la glace

Régime d'accrétion	Conditions	Caractéristiques	Formes de glace associées
Sec	<ul style="list-style-type: none"> • L'eau gèle en totalité • La fraction solide vaut 1 • Température < 0 	<ul style="list-style-type: none"> • Givre : <p>La glace est opaque et rugueuse avec une densité inférieure à 900 kg/m³</p>	Épouse la surface
Humide	<ul style="list-style-type: none"> • L'eau gèle partiellement • La fraction solide est comprise entre 0 et 1 • Température = 0 	<ul style="list-style-type: none"> • Verglas : <p>La glace est transparente et lisse avec une densité élevée (917 kg/m³)</p>	Forme en cornes

2.1.2. Effets du givre en éolien

Les premières études menées dans le domaine du givrage des pales d'éoliennes ont été faites dans le but d'évaluer l'impact du givrage sur la production énergétique et sur l'exploitation des sites. Pendant la durée de vie d'une éolienne, le givrage affecte sévèrement à la fois les pales et les instruments de mesure (Figure 2.1).

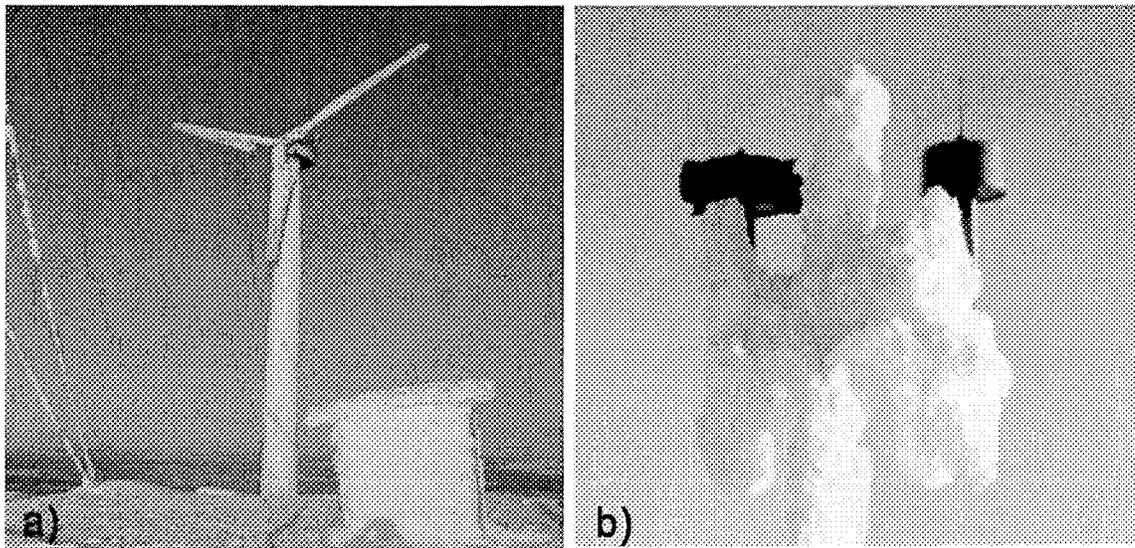


Figure 2.1 : a) Éolienne en zone de climat froid (Pyhätunturi-fjell Finland) b) Anémomètres givrés

Les pertes de production sont essentiellement dues aux dépôts de givre qui altèrent les caractéristiques aérodynamiques des pales. Wang et al. (2007) démontrent les effets du givrage sur la production et rapportent par exemple qu'une faible épaisseur de glace de 9,4mm entraîne des baisses de puissance de l'ordre de 62% [15]. Les compagnies rapportent quant à elles des pertes de l'ordre de 20% pour la production annuelle d'éoliennes à pas variable en raison des arrêts occasionnés par les épisodes de givrage sévères [5].

En période de givrage, les pales sont soumises à de la fatigue excessive en raison du poids de la glace ou de givre qui peuvent modifier entre autres leur fréquence naturelle. Cela, par exemple, peut entraîner l'entrée en résonance des pales des petites éoliennes [12]. Le givre et le verglas augmentent la traînée des pales et occasionnent le déséquilibre de l'hélice quand ils se retrouvent sur le bord d'attaque de la pale et les couples considérables

causés par les bourrasques en hiver, créent un désalignement dans la boîte d'engrenage. Le froid de l'hiver crée une certaine condensation amenant une accumulation d'eau dans la boîte d'engrenage ce qui peut entraîner une érosion des éléments. Des fissures qui sont dues à une contraction inégale des matériaux peuvent aussi être observées au niveau des engrenages. Le givre altère également le fonctionnement des différents appareils de mesure de l'éolienne. Les instruments de mesure givrés (Figure 2.1) ne sont pas en mesure de fournir des données cohérentes et le contrôle de l'éolienne devient alors difficile voire impossible. Sur certains sites éoliens à climat très froid (régions nordiques du Québec ou sites montagneux), les températures peuvent descendre en dessous des seuils de fonctionnement de certaines composantes, notamment électroniques, de l'éolienne. Il y a la possibilité par exemple que les huiles et les graisses qui lubrifient le système changent de viscosité les rendant du coup, moins efficaces. Pour éviter tout bris mécanique, l'huile des boîtes d'engrenage est donc chauffée régulièrement. L'autre grand problème est l'accès au site, qui peut être compromis en hiver. En périodes hivernales, les routes sont parfois impraticables, rendant du coup toute intervention ou toute manœuvre sur les éoliennes difficiles voire impossible. Cela peut donc entraîner d'énormes pertes économiques à l'exploitant. Une autre conséquence importante du givrage est le problème de la sécurité. Les morceaux de glace éjectés des pales givrées peuvent être dangereux pour les personnes circulant sur et aux abords du site. Ces morceaux de glace peuvent aussi occasionner des bris sur les éoliennes environnantes.

2.2. Systèmes de dégivrage actuels

Les principales techniques de dégivrage proviennent des recherches en aéronautique et utilisent les principes de :

- a) l'abaissement du point de congélation de l'eau pour le dégivrage au sol
- b) la déformation de la surface créant des formes, qui permettent l'expulsion facile de la glace
- c) la fonte de la glace ou du givre par augmentation de la température de surface [11].

Ces techniques conduisent à des systèmes de dégivrage qui peuvent être classés en deux grands groupes : les systèmes dits « actifs » et les systèmes dits « passifs ». Les systèmes actifs utilisent de l'énergie et sont thermique (ou électrothermique), à air pulsé, à micro-onde ou pneumatique. Les systèmes passifs utilisent quant à eux, les propriétés physiques des surfaces des pales pour prévenir ou éliminer l'accumulation de glace. Ce sont principalement les revêtements.

2.2.1. Systèmes actifs

Le Tableau 2.2 présente un résumé des systèmes actifs. La description détaillée de chaque système peut être consultée dans le mémoire de Mayer (2007) [16].

Tableau 2.2 : Résumé des systèmes de dégivrage actifs

Système de dégivrage	Avantage	Inconvénients
Thermique (électrothermique et à air chaud)	<ul style="list-style-type: none"> • Très utilisé (électrothermique) • Meilleure alternative actuelle car il peut être installé sur une pale préconçue (électrothermique) 	<ul style="list-style-type: none"> • Énergivore • Chauffage parfois à l'aveuglette • Effet de ruissellement possible • Puissance requise trop importante pour les grandes pales (système à air chaud)
Pneumatique	<ul style="list-style-type: none"> • Très économique • Évalué par Goodrich Corporation [17] 	<ul style="list-style-type: none"> • Modifie le profil et les propriétés aérodynamiques de la pale • Cause de la pollution sonore • Difficile à installer du point de vue mécanique
A micro-ondes	<ul style="list-style-type: none"> • Puissance requise possiblement faible par rapport au système électrothermique • Maintenance simple 	<ul style="list-style-type: none"> • Bien que Mayer (2007) [16] rapporte une utilisation à titre expérimental de ce système par LM Glassfiber, celui-ci n'est pas encore un succès dans l'industrie

Les systèmes de protection actifs requièrent une stratégie de contrôle du dégivrage pour la gestion de la consommation du système. Ces stratégies de contrôle sont de deux types : une stratégie dite « antigivrage » et une stratégie dite de « dégivrage ».

Avec le mode antigivrage, le système fonctionne de telle sorte que le givre ne peut pas se former sur la zone de collection d'eau. La puissance fournie doit permettre de

maintenir une température positive sur la surface de la pale créant ainsi un film d'eau qui s'écoule à la surface. En mode dégivrage, la stratégie consiste à laisser une épaisseur de glace s'accumuler sur la pale protégée avant de déclencher le chauffage. Lorsque le chauffage est mis en route, il fond une faible épaisseur de glace à la surface et produit un film d'eau permettant l'évacuation des morceaux de glace grâce aux forces aérodynamiques ou centrifuges. Il est plus économique même s'il demande environs la même énergie que le mode antigivrage, car il fonctionne par séquence.

2.2.2. Systèmes passifs

Les revêtements antigivre et les pales flexibles sont les principaux systèmes de dégivrage passifs utilisés en éolien. Ils utilisent l'un des principes du dégivrage énoncés plus haut. La pale fabriquée avec un matériau flexible permet d'évacuer facilement la glace accumulée sur la pale par simple craquement. Mais le principal inconvénient de cette méthode réside dans le fait qu'une couche de givre résiduelle peut rester accolée à la surface de la pale, affectant possiblement ses propriétés aérodynamiques [12].

Le revêtement antigivre est une méthode qui consiste à revêtir les pales avec un revêtement qui empêche la glace d'adhérer ou de s'accumuler. En 1996, *Yukon Energy* a rapporté avoir utilisé un revêtement noir sur ses pales. Le revêtement de *Yukon Energy*, appelé StaClean™ était supposé empêcher l'adhérence de la glace et des insectes et ne pas être corrosif pour le bord d'attaque des pales. Le StaClean™, du fluorouréthane noir est supposé être à caractère glaciophobe et la rugosité de la surface de la pale ainsi recouverte décourage la formation de glace. Ce revêtement a donné de bons résultats pendant plusieurs années, autant contre la présence d'insectes en milieu chaud (avec une coloration claire) en

raison de la réduction de la rugosité des pales que contre le givre en climat froid (coloration noire) (Figure 2.2) [18]. L'avantage c'est que grâce à la lumière du jour, la température externe du revêtement noir s'élève (effet du rayonnement solaire) et cela permet de faire fondre la faible épaisseur de glace plus tôt que ne le ferait un revêtement plus pâle. C'est efficace pour des événements de givre léger. Le StaClean™ fut donc efficace dans une certaine mesure. Dalili et al. (2007) rapporte que la température externe du revêtement noir n'était pas si élevée que ça en raison du transfert de chaleur par convection élevé, conduit par la rotation de la pale [12]. Le coefficient de frottement du StaClean™ noir est plus faible que celui du téflon. Il est résistant et peut être appliqué avec un outillage de peinture standard. De façon générale, le principal avantage des revêtements antigivre réside dans le fait qu'il couvre en totalité la zone de collection des gouttelettes d'eau surfondues, qu'ils empêchent l'effet de foudroiement, qu'ils réduisent l'adhérence des insectes et qu'ils sont relativement peu coûteux.

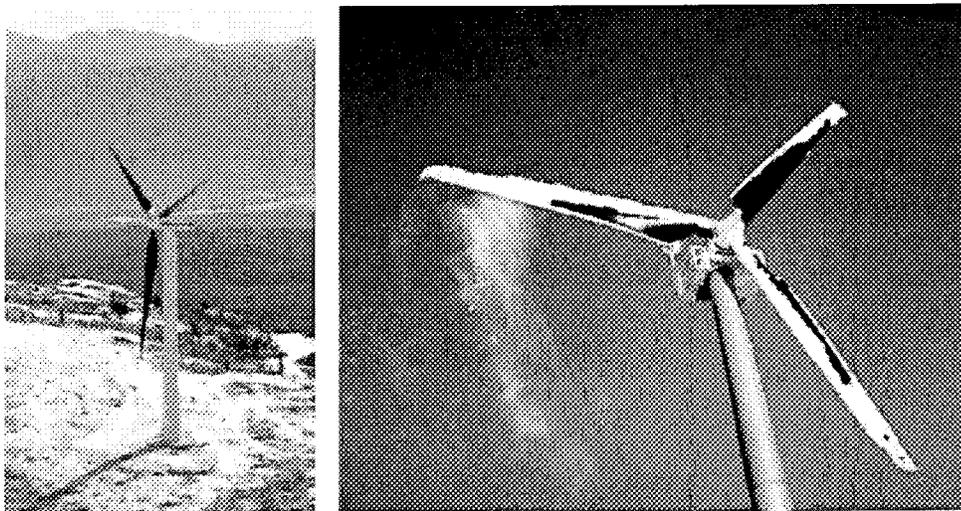


Figure 2.2 : Pales recouvertes du StaClean™ et leur fonctionnement en période de givrage

2.3. Revêtements glaciophobes

2.3.1. Mouillabilité

La mouillabilité caractérise la facilité avec laquelle une goutte de liquide s'étale sur une surface solide. C'est un paramètre fondamental dans un grand nombre d'applications industrielles comme l'automobile, les textiles, les peintures et les adhésifs. La mouillabilité est caractérisée par l'angle de contact (θ) du liquide sur le solide.

La force d'adhérence entre deux matériaux est proportionnelle à l'énergie requise pour les séparer [12]. Ainsi le travail d'adhésion W_A est donné par :

$$W_A = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (1)$$

Où γ_1 et γ_2 sont respectivement les énergies de surface des matériaux 1 et 2 et γ_{12} est l'énergie inter-faciale.

Dans le cas d'une interaction liquide/solide (Figure 2.3 ci-dessous), on peut réécrire l'équation (1) sous la forme :

$$W_A = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (2)$$

Où γ_{sl} , γ_{sv} , γ_{lv} sont les trois tensions superficielles solide-liquide, solide-vapeur et liquide-vapeur.

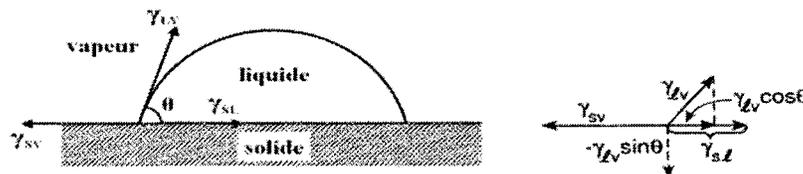


Figure 2.3 : Goutte d'un liquide en équilibre montrant l'angle de contact et les énergies du système.

A l'équilibre, la somme des trois forces appliquées à la surface est nulle. Et si on introduit l'angle de contact θ qui est l'angle entre la tangente à la goutte de liquide au point de contact et la surface solide, on a d'après la Figure 2.3 l'équation d'équilibre entre les tensions superficielles:

$$-\gamma_{SV} + \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta = 0 \quad (3)$$

L'équation (3) est l'équation de Young, très utilisée en mouillabilité. Dans cette équation, seules γ_{LV} et θ sont mesurables. On détermine les inconnues γ_{SL} et γ_{SV} par des modèles (notamment ceux de Neuman, de Owens et Went et de Good Van Oss) et différentes considérations thermodynamiques.

On tire alors des équations (2) et (3) l'équation (4):

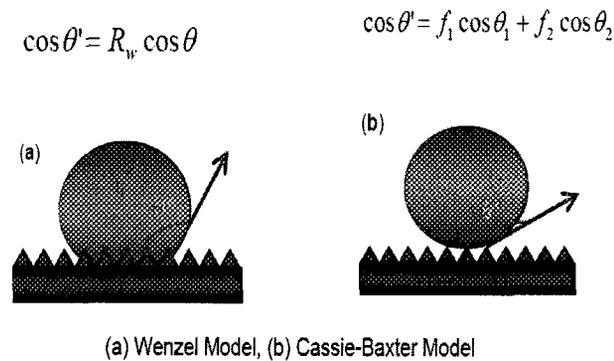
$$W_A = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta) \quad (4)$$

Pour avoir une surface parfaitement hydrophile (sur laquelle l'eau se répand parfaitement) il faudrait donc que $\cos \theta = 1$ soit $\theta = 0^\circ$. Par contre la surface est superhydrophobe lorsque $\cos \theta = -1$, c'est-à-dire que $\theta = 180^\circ$ ainsi W_A devient nul (l'eau ne mouille pas) et l'adhérence est nulle [19]. En général une surface est hydrophile lorsque l'angle de contact avec l'eau est inférieur à 90° , hydrophobe lorsque cet angle est compris entre 90 et 150° et superhydrophobe lorsque l'angle est supérieur à 150° .

La facilité qu'ont les gouttelettes d'eau de décoller des surfaces dépend ainsi en grande partie de leur angle de contact avec la surface. L'hydrophobicité est donc d'autant plus élevée que l'angle de contact est élevé.

La mouillabilité d'un support solide peut être modifiée par traitement chimique de la surface en modifiant sa composition c'est-à-dire en fonctionnalisant l'interface par des molécules à propriétés chimiques différentes, et/ou en formant un film mince sur la surface. On peut également jouer sur sa texturation en modifiant sa rugosité. On trouve dans la littérature, deux modèles (Figure 2.4) permettant de décrire l'influence de la morphologie des surfaces texturées sur le mouillage : le modèle de Wenzel et le modèle de Cassie-Baxter. Le modèle de Wenzel, pour les surfaces rugueuses, est le plus souvent appliqué dans le cas de surfaces texturées physiquement. Le modèle de Cassie-Baxter, pour les surfaces composites, est quant à lui appliqué dans le cas des surfaces texturées chimiquement. On arrive parfois à combiner ces deux modèles et avoir des surfaces composites.

La rugosité augmente la surface d'un solide. En supposant que le liquide suit les accidents de la surface (Figure 2.4a), une goutte va se contracter pour éviter un contact trop développé avec son support, lorsque ce dernier est hydrophobe : l'angle augmente (modèle de Wenzel). Mais il existe un autre point de vue : le substrat est une sorte de poreux (bidimensionnel) dans lequel l'eau pourrait bien ne pas pénétrer, puisqu'il est constitué d'un matériau hydrophobe. Une goutte repose alors sur un mélange de solide et d'air (Figure 2.4b), ce qui a pour effet de renforcer l'hydrophobie (modèle de Cassie) : l'angle de contact est intermédiaire entre celui sur le solide plan et 180° . L'idéal est alors de minimiser (par un design adéquat de la texture) la surface de contact solide/liquide, la goutte « flottant » ainsi sur son support comme le fakir sur son tapis de clous.



$$\cos \theta' = f_1 (\cos \theta_1 + 1) - 1$$

Figure 2.4 : Modèles de Wenzel et Cassie-Baxter permettant de rendre compte de l'augmentation de l'angle de contact dépendamment de la rugosité

2.3.2. Mécanisme d'adhérence de la glace

L'étude d'un revêtement hydrophobe ou glaciophobe ne peut se faire sans une compréhension des mécanismes d'adhérence glace/substrat.

Les principaux mécanismes expliquant l'adhérence de la glace aux surfaces sont d'ordre mécanique et physico-chimique [20]. La glace adhère aux surfaces par effet d'ancrage dans les creux en surface du substrat. Cette adhérence augmente avec la rugosité de la surface, car l'augmentation de la rugosité augmente le nombre de sites d'ancrage possibles [21]. Cependant, en présence de très fortes rugosités, l'adhérence de la glace peut diminuer. Cette diminution est causée par l'augmentation de bulles d'air à l'interface glace/revêtement [22].

D'un point de vue physico-chimique, à l'intérieur de la structure, on a la présence des forces de covalence (liaisons fortes) qui maintiennent les atomes des molécules en

agissant à des distances de 0,1nm à 0,2nm ou par la formation de liaisons covalentes entre les deux corps en contact (la liaison covalente résulte de la mise en commun de leurs électrons par deux atomes). Pour la majorité des matériaux, notamment ceux avec lesquels on fabrique les pales, il n'y a aucune affinité entre les molécules d'eau et le matériau. Le second type de liaisons concerne les forces de liaison intermoléculaires de Van der Waals qui n'ont pas un grand effet sur l'adhésion. À l'interface glace/substrat, des liens dispersifs de London seraient plutôt présents et, dans certains cas des liens hydrogènes [19] qui font d'ailleurs qu'il est impossible d'avoir une surface sur laquelle la glace n'adhère pas du tout.

Pour étudier l'effet de la présence des liens intermoléculaires à l'interface glace/substrat, on mesure la tension de surface (énergie de surface) du substrat ou l'angle de contact de l'eau sur celui-ci (mouillabilité). Un liquide tendra à mouiller la surface d'un substrat solide si sa tension superficielle est inférieure ou égale à l'énergie de la surface du substrat. Les matériaux hydrophobes ont donc des tensions superficielles faibles. Selon Saito et al. (1997), l'adhérence de la glace varie linéairement avec l'énergie libre superficielle (tension superficielle) des revêtements hydrophobes [21]. Ainsi plus la tension de surface d'un substrat est basse, moins l'eau le mouille et par conséquent moins la glace devrait y adhérer. Il a aussi démontré que l'adhérence de la glace augmente linéairement avec la rugosité pour un revêtement hydrophile. Par contre cette adhérence diminue avec la rugosité pour un revêtement superhydrophobe (angle de contact supérieur à 150°) [21]. Laforte (2001) [20] explique ce phénomène par le fait que la glace adhère aux surfaces par effet d'ancrage dans les aspérités en surface du substrat.

Un substrat possédant une rugosité macroscopique fournit des crochets mécaniques à la glace tout en augmentant la surface de contact. Donc, l'augmentation de la rugosité cause une augmentation de l'adhérence. Cependant, lorsque les deux surfaces solides possèdent moins d'affinité (cas d'une surface superhydrophobe qui possède peu d'affinité avec l'eau) et que la rugosité augmente, des aires non recouvertes se développent à l'interface et peuvent causer une diminution d'adhérence. Néanmoins plusieurs facteurs empêchent de faire une très bonne corrélation entre l'adhérence de la glace et l'angle de contact de la surface [12]. On a entre autres :

- le changement de phase de l'eau qui modifie le contact ou la surface de contact
- la déformation plastique qui est associée à la rupture à l'interface glace/matériau absorbe de l'énergie et fausse l'hypothèse selon laquelle la rupture de l'interface dépend seulement de W_A
- la composante électrostatique de W_A dans le cas de l'eau n'est pas la même chose dans le cas de la glace.

L'adhérence de la glace semble même indépendante du degré d'hydrophobicité du substrat selon Laforte (2001) [20]. Mais l'effet d'une surface superhydrophobe n'a pas été très étudié.

Les forces d'adhérence dépendent aussi du matériau constituant le substrat. La force d'adhérence glace/aluminium est par exemple environ cent fois plus grande que celle de l'interface glace/plexiglas [23]. Et la force d'adhérence de la glace diminue lorsque sa densité diminue en raison de la diminution de la surface de contact. Le givre mou adhère par exemple moins que le verglas [20]. L'adhérence de la glace est aussi attribuable aux

forces électrostatiques à l'interface entre les molécules de la glace et du substrat. Ce qui expliquerait la dépendance de l'adhérence de la glace à la température [20].

2.3.3. Revêtements glaciophobes

Les matériaux glaciophobes empêchent la glace d'adhérer à la surface à cause de leurs caractéristiques anti-adhérentes. A ce jour, il n'existe aucun revêtement glaciophobe. Les caractéristiques que doit posséder un matériau destiné à réduire la force d'adhérence entre la glace et n'importe quel substrat sont une efficacité considérable, une permanence, c'est-à-dire un produit qui ne s'effrite pas au bout de quelques cycles, une facilité d'application et un faible coût.

Les principales forces présentes lors du mécanisme de l'adhérence de la glace à part les forces mécaniques (l'eau s'étant transformée en glace) sont des forces électrostatiques. Les matériaux de constante diélectrique faible seraient donc de bons candidats pour réduire l'adhérence de la glace aux surfaces. Néanmoins le polytetrafluoroéthylène (PTFE ou Téflon) qui est un matériau de constante diélectrique faible est désastreux comme revêtement antigivre.

Les composés avec une énergie de surface faible sont de bons candidats. Au nombre de ceux-ci, les composés fluorés et les polysiloxane sont les meilleurs candidats [19], en particulier ceux avec des liaisons de type $-CF_3$ et $Si(CH_3)_2$ car ils ont une faible énergie de surface. Les surfaces superhydrophobes (angle de contact avec l'eau supérieur à 150°) ont le potentiel pour être des surfaces glaciophobes [19] [24], car ce sont des matériaux à faible énergie de surface.

Les techniques de mise au point de revêtement superhydrophobes ont fait l'objet d'intenses recherches et aujourd'hui il y a une panoplie de brevets relatifs aux revêtements superhydrophobes. Les meilleurs revêtements superhydrophobes sont actuellement ceux qui sont obtenus grâce aux nanomatériaux à faible énergie de surface. Combinés au téflon grâce aux techniques de dépôt appropriés, ces nanomatériaux donnent lieu à des surfaces hautement hydrophobes [25] et potentiellement glaciophobes [26].

En éolien, les revêtements glaciophobes sont un bon choix, dans le sens où ils permettent de réduire l'accumulation du givre (ou du verglas) alors que l'éolienne est en opération. On réduit donc les coûts potentiels dus à un arrêt de l'éolienne. Le meilleur revêtement doit protéger la pale contre la foudre, contre l'érosion, contre l'adhérence des insectes et enfin contre l'adhérence de la glace ou du givre. Il doit être solide et antiadhésif. Cette définition amène à exclure les revêtements graisseux et les fluides (non durables). Le revêtement doit être compatible avec les matériaux largement utilisés dans la fabrication des pales. En résumé, il faut tenir compte de:

- la nature du revêtement : il doit avoir un fini solide lorsqu'appliqué
- la couleur du revêtement (on évite par exemple les produits noirs dans les régions où la température est excessive en été)
- la diminution d'adhérence due au temps à cause de la dégradation due aux rayons ultraviolets.
- la rugosité du fini du revêtement car les pales sont sensibles à la rugosité pour un meilleur aérodynamisme [10]
- le mode d'application du revêtement

- la résistance à l'érosion due au vent, à la poussière et autres saletés qui dégradent significativement les revêtements.

Ainsi Dalili et al. (2007) suggère une orientation vers les époxydes silicone (« silicone-epoxy-based resins) car le silicone pourrait réduire l'adhérence à la glace et l'époxyde améliorerait la résistance face à l'érosion [12]. D'ailleurs une équipe de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) a fait état de bons résultats obtenus en pulvérisant sur des échantillons de pale d'éolienne des nanoparticules de silicium [27]. Ces nanoparticules ont été préalablement mélangées à de la résine à base d'époxyde.

Quelques entreprises ont déjà utilisé ou utilisent actuellement des revêtements dans le cadre de l'exploitation de leurs éoliennes en milieux froids. Le Excel-R de 7.5kW de la compagnie Bergey WindPower Co (BWC) est revêtu de polyuréthane censé protéger ses pales contre l'érosion et dont la couleur noire (dans les régions nordiques) les protègent aussi contre le givre [28]. Comme rapporté plus haut (section 2.2.2) l'entreprise *Yukon Energy* a utilisé pendant quelques années sur ses pales d'éoliennes, le Staclean™ Black de Polytech Services Company en région nordique et rapporte une bonne efficacité du produit [29].

2.3.4. Revêtements antigel

Le principe des substances chimiques antigel consiste à faire baisser le point de congélation de l'eau de telle sorte qu'elle ne gèle pas à 0°C mais à une température beaucoup plus basse. En laboratoire, l'Institut des matériaux et des procédés d'ingénierie de la Haute école des sciences appliquées de Zurich développe actuellement une méthode pour

prévenir la formation de givre et de glace sur les pales des éoliennes. Adoptant une approche originale imitant l'effet antigel des protéines naturelles présentes dans le sang des poissons vivant dans les eaux arctiques, les chercheurs ont rapporté avoir mis au point un revêtement glaciophobe. « L'eau gèle en deux à trois minutes à la température de moins dix degrés, mais avec ce revêtement, l'eau est encore liquide après trois heures.» [30].

CHAPITRE 3

MATÉRIELS ET MESURES EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE 3

MATÉRIELS ET MESURES EXPÉRIMENTALES

3.1. Montage expérimental

Le montage expérimental présenté à la Figure 3.1 se base sur le stage de Servant (2008) [31]. Il a conçu un modèle réduit de type caisson pour la pale qui est composée de cinq nervures ("*ribs*"), de deux longerons d'aile ("*spars*") et d'une pellicule de recouvrement en thermoplastique thermodurcissable dans un premier temps, mais remplacé plus tard par une pellicule en aluminium (Voir la section 3.2 pour plus de détail sur le choix du matériau de pale). Le modèle est bidimensionnel de 25,4 cm de long (Voir Figure 3.2) composé d'un profil NACA 63-415 (Voir Figure 3.3) dont la corde est égale à 10,16 cm. Cette dimension a été choisie pour respecter la nature et la largeur de la section d'essai de la soufflerie réfrigérée. Pour éliminer les effets de bords, deux sections d'ailes de 10,16 cm sont ajoutées aux extrémités de la section centrale et sont maintenues chauffées de sorte de diminuer les effets de bord aérodynamique et thermique.

Le profil NACA 63-415 a été retenu car il est un profil caractéristique des pales des éoliennes de grande puissance. Chaque section de pale est munie de deux éléments chauffants de 1,27cm ($\frac{1}{2}$ po) de large par 25,4cm (10 po) de long chacun. Les éléments chauffants sont installés au niveau du bord d'attaque à l'intérieur de la pale et des capteurs thermiques sont placés à la surface interne de la pale pour le contrôle des éléments chauffants (Figure 3.1). T_1 , T_2 , T_3 et T_4 sont les températures mesurées par les

thermocouples. Le système de contrôle du chauffage a été développé par le LIMA. La Figure 3.4 présente la pale montée dans la section d'essai de la soufflerie.

Avant de revêtir les pales avec le produit sélectionné, une pellicule plastique a d'abord été installée. L'information sur cette pellicule plastique est donnée plus en détail à l'**annexe D**. L'influence de la présence de cette pellicule a été analysée et présentée dans la **section 4.2**.

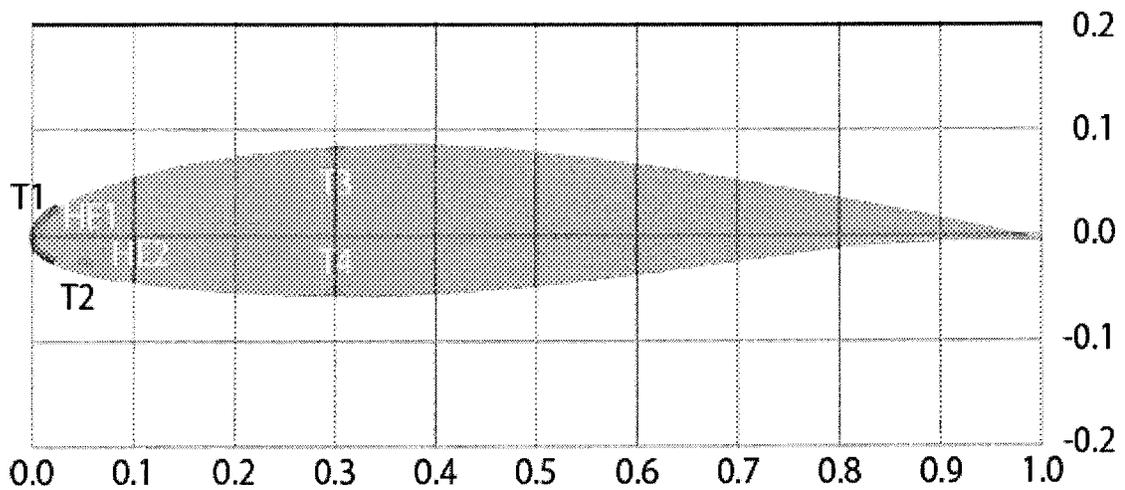


Figure 3.1 : Schéma du profil avec la position des deux éléments chauffants

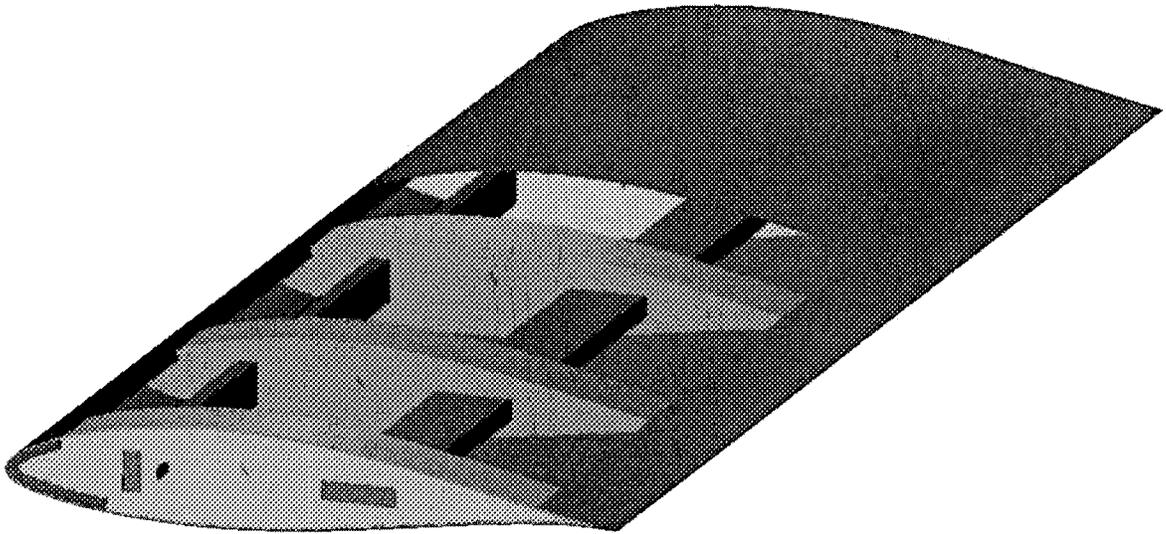


Figure 3.2 : Schéma en 3-D du modèle de pale

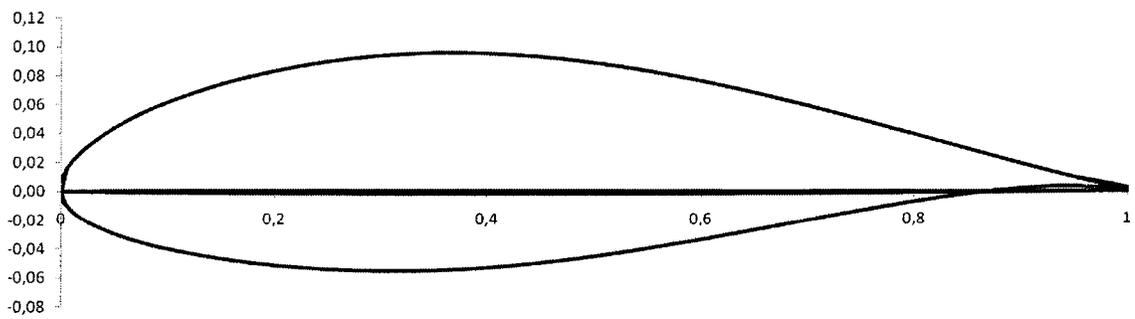


Figure 3.3 : Schéma d'un profil NACA 63-415

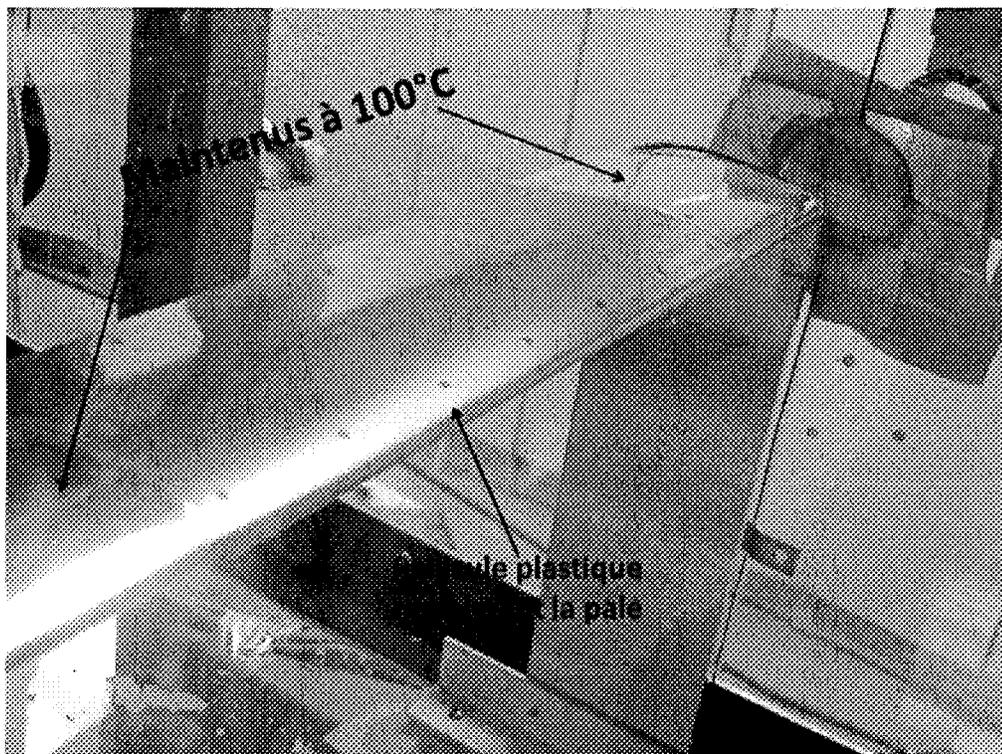


Figure 3.4 : Vue du modèle réduit de pale monté dans la section d'essai

3.2. Choix et validation du matériau de pale

Dans l'industrie, les matériaux utilisés pour la conception des pales sont :

- le bois (pale de petites tailles : 2 à 3 m au maximum)
- le lamellé-collé (pale de 5 à 6 m ayant une bonne tenue en fatigue)
- les alliages d'aluminium (pales allant jusqu'à 20m de long, légères, résistantes à la corrosion et à la fatigue)
- les matériaux composites : Ces matériaux ont comme renfort soit des tissus en fibres de verre, en carbone ou en Kevlar et des matrices qui sont en général des résines époxy ou des polyesters (thermodurcissables). Ils permettent la réalisation de toutes les

formes et dimensions, permettant de faire varier la quantité de matière le long de la pale et l'obtention de caractéristiques mécaniques exactes. On a donc des pales de faible masse, résistantes à la corrosion et ayant une bonne tenue en fatigue.

Des pales de petite taille peuvent être fabriquées avec une matrice constituée de polypropylène (thermoplastique) car les thermoplastiques sont plus économiques et faciles à usiner. Le plastique est un matériau solide dont la principale composante est un polymère organique de masse molaire élevée. Parmi les matériaux polymères, on distingue les thermoplastiques et les thermodurcissables. Le plastique suggéré pour les sections de pale de notre étude, est un thermoplastique. Il est peu rigide, léger et doit être utilisé à des températures inférieures à 200°C.

Pour le choix du matériau utilisé dans la fabrication des sections de pale, des considérations d'ordre thermique ont été retenues. Il s'agissait de choisir un matériau qui se rapproche de ceux utilisés en industrie en termes de comportement thermique, dans l'optique de faire plus tard une certaine généralisation. Mais puisque les températures en jeu dans le dégivrage sont supérieures à la température ambiante, il devient difficile d'éliminer les pertes thermiques dues au matériau de la pale dans les calculs. Il faut donc prendre en considération la diffusivité thermique α des matériaux en lieu et place de leur conductivité thermique κ . On sait que :

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho \times C_p} \quad (5)$$

La conductivité thermique de la plupart des polymères est de l'ordre de 0,3W/m.K [32], ce qui est comparable à celle de la fibre de verre. La diffusivité thermique du

thermoplastique et de la fibre de verre sont dans le même ordre de valeur (voir le Tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Tableau comparatif de différents matériaux pour la fabrication des sections de pales

Matériau	Conductivité thermique κ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Masse volumique ρ [kg·m ⁻³]	Capacité thermique C_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Diffusivité thermique α [m ² /s]
Aluminium	237	2700 ^a	900	97.53×10^{-6}
Fibre de verre	0.693 ^b	2580 ^a	810 ^a	0.33×10^{-6}
Thermoplastique	0.3	905 ^a	1925 ^a	0.172×10^{-6}

^a Les valeurs pour l'aluminium ont été prises pour l'alliage 6061, celles pour le thermoplastique sont celles du polypropylène et celle pour la fibre de verre sont celle de la fibre de verre E.

^b Valeur pour une fibre de verre de fraction volumique de fibre égale à 78% (et résine polyester Leguval W 45). Ce type de fibre se rapproche le plus de celui utilisé par Mayer pour la fabrication de sa section de pale [18].

3.3. Essais préliminaires

Les premiers essais qui ont été conduits sur la section de pale en thermoplastique n'ont pas été concluants. La chaleur n'est pas bien conduite à travers le matériau en plastique et se diffuse peu entre les fils conducteurs des éléments chauffants. Si bien qu'il était difficile, voire impossible d'évaluer l'impact du dégivrage thermique sur le comportement des revêtements. Pour pouvoir conduire des essais concluants, il fallait

hausser les températures, néanmoins la nature du matériau (plastique) limitait cette température à une valeur trop faible. Face à cette problématique, il est apparu évident qu'il fallait un matériau conducteur pour la pale, de sorte à avoir des essais concluants lorsque le dégivrage électrothermique était couplé à un revêtement. Le choix s'est porté sur l'aluminium, matériau beaucoup plus conducteur et plus facilement usinable. Les essais comparatifs montrent d'ailleurs qu'à puissance égale, l'aluminium est plus conducteur (voir Figure 3.5)



Figure 3.5 : Image montrant le comportement de la pale en plastique et de celle en aluminium lors d'un dégivrage avec puissance égale

3.4. Sélection des revêtements

La revue de littérature a suggéré une orientation vers des revêtements solides, des revêtements superhydrophobes et vers les époxydes silicones. Ainsi les deux produits retenus sont un époxyde silicone (Wearlon Super F1-Ice) et un revêtement

superhydrophobe (HIREC 1450). Ainsi le « HIREC 1450 » est un revêtement superhydrophobe de *NTT Advanced Technologie Corporation* [33], alors que le « Wearlon Super F1-Ice », de *Wearlon® Coatings* est un époxyde silicone à caractère glaciophobe qui réduit la force d'adhérence de la glace. Ce produit a déjà été évalué au LIMA (Voir Figure 3.6). Enfin le troisième revêtement est un fluoroéthane : le StaClean™. C'est un revêtement hydrophobe utilisé au Yukon et qui a été présenté plus tôt à la section 2.2.2. Ce revêtement ayant déjà des résultats sur site réel a été inclus dans l'étude pour voir si une corrélation est possible. Il sera utilisé comme référence pour extrapoler le comportement des revêtements superhydrophobes sur les éoliennes. Le Tableau 3.2 donne le résumé des principales caractéristiques des trois produits évalués.

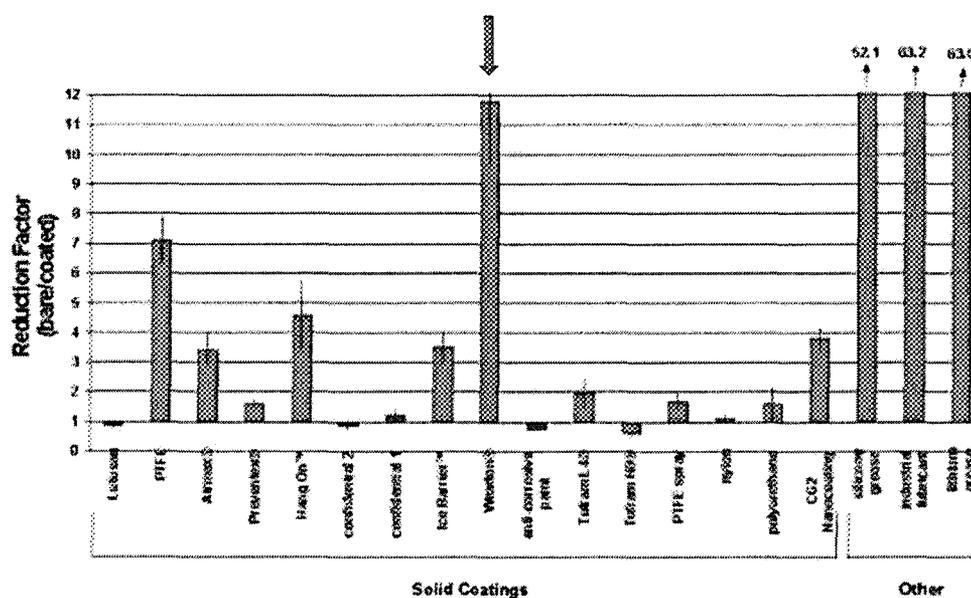


Figure 3.6 : Résultats de la mesure par force centrifuge de l'adhérence de la glace sur certains revêtements [34]

Tableau 3.2 : Résumé des caractéristiques des produits évalués

Surface #	Revêtement	Nature chimique	Mouillabilité	Couleur et aspect	Épaisseur
1	Aucun	n/d	Hydrophile	n/d	0
2	Pellicule plastique	Polyuréthane	Hydrophile	Transparent	210 μm
3	Wearlon F1-Ice	Epoxyde silicone	Hydrophobe	Noir	25 μm
4	HIREC 1450	Résine fluorée	Superhydrophobe	Blanc translucide	15 μm
5	StaClean™	Fluoroéthane	Hydrophobe	Noir	38,1 à 127 μm (*)
(*) Épaisseur dépendant du substrat					

3.5. Conditions expérimentales et similitude

3.5.1. Conditions réelles

Les conditions climatiques retenues sont des conditions sévères de givrage permettant de simuler la formation de givre et de verglas. Hochart et al. (2007) [35] a suggéré de dégivrer le bord d'attaque de la moitié inférieure de la pale, car d'après ses observations, c'est la partie la plus affectée lors du givrage (Figure 3.7). La zone la plus affectée d'après cette figure est située entre les positions $r=10$ (m) et $r=35$ (m). Pour tenir compte de cette recommandation, trois positions radiales ont été choisies sur la pale grandeur réelle de l'étude, dont deux sont retenues à la fin de la similitude effectuée pour

passer en soufflerie. Les conditions évaluées en soufflerie sont celles correspondantes aux deux positions situées à 0,52 et 0,77 du moyeu de la pale, 1 étant le bout de la pale (Figure 3.8). Il s'agit de 20,77m et de 30,68m du moyeu sur une pale de longueur 40m.

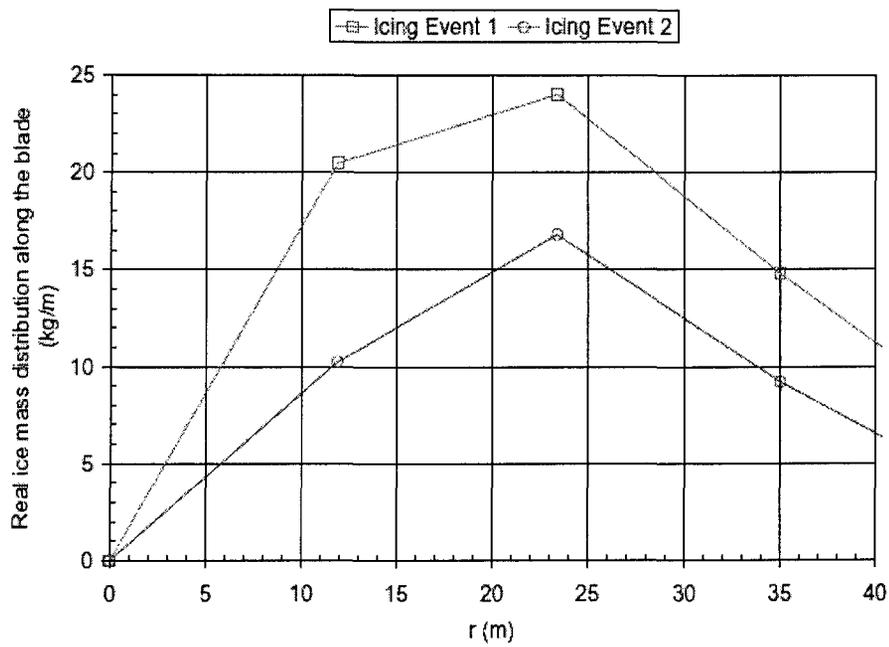


Figure 3.7 : Masse de glace accumulée le long d'une pale [35]

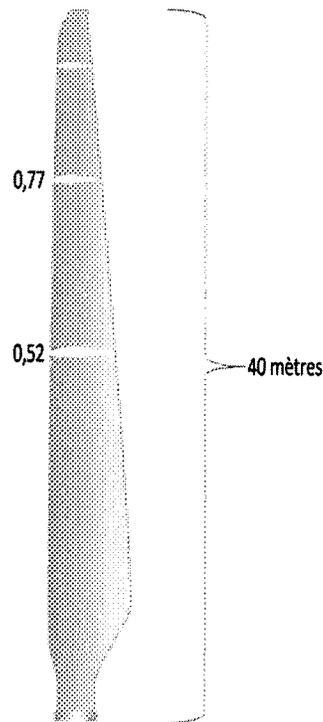


Figure 3.8 : Schéma montrant les deux positions radiales retenues

La pale grandeur réelle (de type Vestas V80) mesure 40 mètres de long (rayon R du rotor) alors que le modèle de pale réduit présenté plus haut dans la section 3.1 a une longueur de 25,4cm et une corde de 10,16cm. En effet, les dimensions de la soufflerie ne permettant pas de faire des essais sur une pale grandeur réelle, une mise à l'échelle était nécessaire. Cette mise à l'échelle se base sur une similitude de la captation de l'eau et de l'accrétion de la glace entre la pale grandeur réelle et le modèle réduit utilisé en soufflerie pour les essais (voir l'annexe A). La corde de la pale réduite ne variant pas longitudinalement, contrairement à la corde de la pale grandeur réelle, la similitude de l'eau captée et de l'accrétion de la glace dépend de la position radiale choisie sur la pale réelle.

La position radiale est caractérisée par la corde c à cette position et la vitesse relative U_{rel} correspondante. La Figure 3.9 présente les vitesses sur une section d'un élément de pale à un rayon r du moyeu.

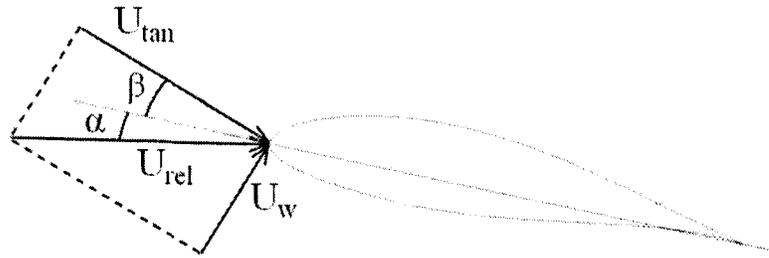


Figure 3.9 : Vitesses du vent au niveau d'un profil de pale [16]

La vitesse relative U_{rel} est la combinaison de la vitesse du vent U_w qui arrive sur la pale et de la vitesse tangentielle due à la rotation de la pale U_{tan} . Ainsi :

$$U_{rel} = \sqrt{U_w^2 + U_{tan}^2} \quad (6)$$

$$\text{Or } U_w = (1 - a) \times U_\infty \quad (7)$$

Avec

a : facteur d'induction axial

U_∞ : vitesse de l'écoulement non perturbé.

La vitesse tangentielle U_{tan} quant à elle est donnée par la relation :

$$U_{tan} = (1 + a') \times \omega \times r \quad (8)$$

Avec

a' : facteur d'induction tangentiel

ω : vitesse de rotation de la pale (dans ce cas-ci, elle est de 15,5tr/min)

r : distance de la section analysée par rapport au moyeu de la pale.

D'après la théorie du disque rotor, lorsque l'air est considéré comme un gaz parfait, les performances optimales sont obtenues quand les facteurs d'induction axial a et tangentiel a' ont les valeurs ci-après[36] :

$$a = \frac{1}{3} \quad (9)$$

$$a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \times \mu^2} \quad (10)$$

Où λ est le rapport de vitesses en bout de pale et μ , le rapport des rayons.

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{U_\infty} \quad (11)$$

$$\mu = \frac{r}{R} \quad (12)$$

Pour une pale de 40mètres de long, la corde c à une position radiale r est donnée par l'équation (13) [36] :

$$c(r) = -0,086857 \times r + 3,954285 \quad (13)$$

Le tableau 3.3 présente les résultats des calculs pour les trois positions radiales choisies grâce aux équations précédentes.

Tableau 3.3 : Paramètres réels choisis

r (m)	$\mu = r/R$	$c_{réelle}$ (m)	a'	U_{tan} (m/s)	U_{rel} (m/s)	U_w (m/s)	U_∞ (m/s)
40	1	0,48	0,0034	65	$65,2 \approx 65$	5,33	8
37,28	0,93	0,71	0,0039	60,6	$60,8 \approx 61$	5,33	8
30,68	0,77	1,29	0,0057	50	$50,3 \approx 50$	5,33	8
20,77	0,52	2,15	0,0125	34,07	$34,5 \approx 35$	5,33	8

3.5.2. Similitude et conditions expérimentales

La restriction de la section d'essai étant due à ses dimensions, une similitude s'avérait nécessaire pour trouver les conditions des essais en soufflerie. Ces conditions sont celles qui permettront d'avoir des formes de glace en soufflerie similaires à celles qu'on observerait sur une pale grandeur réelle sur site réel. La mise à l'échelle est basée sur la méthode de Anderson (2004) [37] qui permet de calculer les paramètres de similitude de l'accrétion entre la pale réelle et le modèle réduit évalué en soufflerie. L'annexe A présente la mise à l'échelle des conditions expérimentales. On retrouve au Tableau 3.4, les conditions de givrage réelles alors que le Tableau 3.5 présente les conditions mises à l'échelle qui seront utilisées dans la soufflerie. Dans le Tableau 3.5, on remarque que juste deux positions ont été reproduites en soufflerie. Ce choix a été fait car les essais préliminaires ont montré que le temps d'expérimentation total pour chaque essai était trop

long. Le calendrier imparti au projet ne permettait donc pas de simuler 3 positions réelles en soufflerie. On s'est donc limité à deux positions réelles qui ont conduites à 4 conditions climatiques pour la soufflerie (voir Tableau 3.5).

Tableau 3.4 : Conditions de givrage réelles

Position #	Position radiale r (m)	Position radiale (adimensionnelle)	Vitesse U (m/s)	Corde $C_{Réelle}$ (m)	MVD _{Réelle} (μm)	LWC _{Réelle} (g/m^3)
1	37,28	0,93	60	0,71	30	0,1
						0,3
2	30,68	0,77	50	1,29	30	0,1
						0,3
3	20,77	0,52	35	2,15	30	0,1
						0,3

MVD : Diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau ; LWC : Teneur en eau liquide

Tableau 3.5 : Résumé des conditions climatiques retenues

Position radiale (m)	$C_{Réelle}$ (m)	C_{scale} (m)	$U_{Réelle}$ (m/s)	U_{scale} (m/s)	T_{scale} ($^{\circ}\text{C}$)	LWC _{Réelle} (g/m^3)	LWC _{scale} (g/m^3)
20,77	2,15	0,1016	35	21	-5	0,3	0,4
20,77	2,15	0,1016	35	21	-20	0,3	0,4
30,68	1,29	0,1016	50	33	-5	0,3	0,4
30,68	1,29	0,1016	50	33	-20	0,3	0,4

3.6. Soufflerie réfrigérée et module de chauffage

Les essais sont réalisés dans la soufflerie réfrigérée du LIMA (Voir Figure 3.10 et Figure 3.11) de dimension 1,7 m x 0,914 m x 0,762 m. La soufflerie a été étalonnée et ajustée pour pouvoir répondre à la norme SAE ARP 5905 *Calibration and Acceptance of Icing Wind Tunnels*. Elle fonctionne en boucle fermée et à faible vitesse. La soufflerie peut opérer jusqu'à des températures de -20°C en refroidissant l'air à l'aide d'un échangeur thermique de dimension 1,6 m par 1,6 m. L'échangeur est composé d'un compresseur de 26,1 kW alimentant une pompe puisant dans un réservoir de 205 L de glycol. L'air dans la soufflerie circule grâce à un ventilateur d'un diamètre de 0,927 m actionné par un moteur de 37,3 kW permettant un flux de 31 kg/s dans la section d'essai.

La soufflerie dispose d'une rampe de sept gicleurs fonctionnels (numérotés de 2 à 8) équidistants en amont de la zone d'essai. Dans la soufflerie du LIMA, on est capable de simuler des teneurs en eau liquide variant de 0,11 à 27,58 g.m⁻³ dont les gouttelettes ont des diamètres moyens variant entre 10 et 40 µm. Afin d'homogénéiser la teneur en eau dans la section d'essai, la rampe de gicleurs effectue un balayage vertical à une fréquence contrôlée et préétablie. Des capteurs sont installés dans la soufflerie pour mesurer et contrôler les paramètres tels que : les températures, la vitesse, etc. Des systèmes d'acquisition de données et des modules de contrôle sont aussi installés pour une meilleure gestion des paramètres de givrage et de dégivrage des pales (Figure 3.12), notamment *Soufflerie 2000* qui est le logiciel de contrôle des paramètres d'expérimentation mis au point au LIMA. La **Figure 3.13** présente l'interface du logiciel *Soufflerie 2000*.

Les essais pour l'étalonnage de la teneur en eau liquide dans la soufflerie sont présentés à l'annexe B. Enfin, pour une description plus détaillée du fonctionnement de la soufflerie, se référer à la thèse de Mayer (2007) [16].

Il est à noter ici qu'on a remarqué que la teneur en eau n'est pas parfaitement uniforme sur la largeur de la section d'essai.

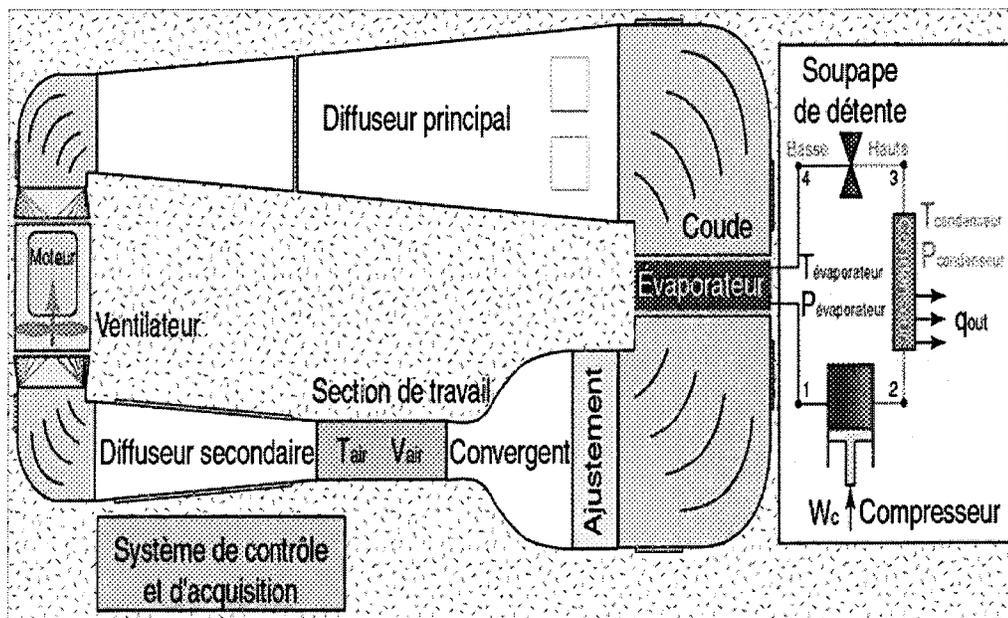


Figure 3.10 : Schéma de la soufflerie réfrigérée

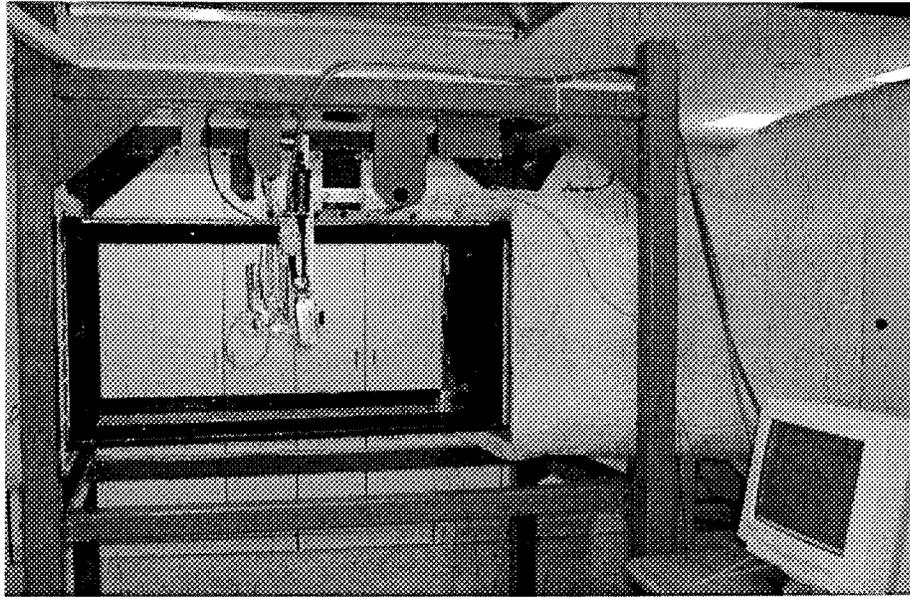


Figure 3.11 : Photo montrant la section d'essai

Logiciel de contrôle des conditions climatiques



Système de contrôle du chauffage

Figure 3.12 : Station de contrôle et d'acquisition de données lors des expérimentations

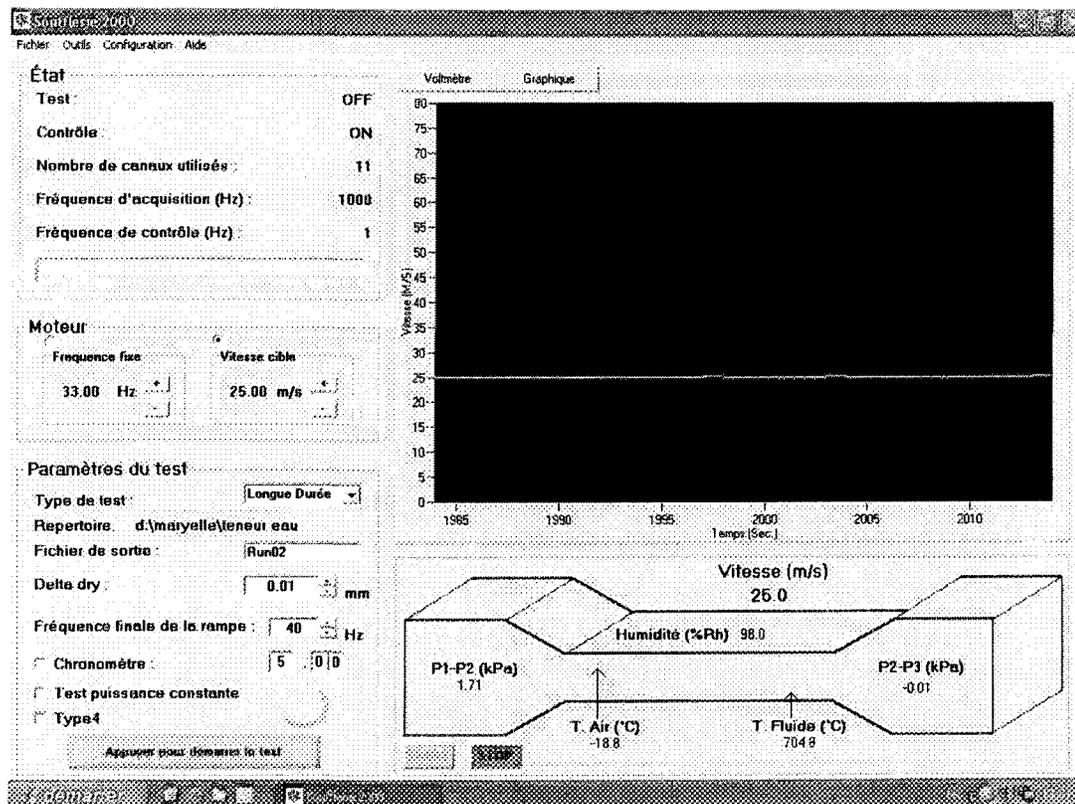


Figure 3.13 : Logiciel d'acquisition de données et de contrôle des paramètres climatiques

Le système de contrôle du chauffage (Figure 3.12) est constituée de :

- (1) : 3 multimètres digitaux
- (2) : une minuterie électronique GraLab modèle 545
- (3) : une source d'alimentation DC de laboratoire
- (4) : un enregistreur de données Graphtec modèle midi logger GL800,

enregistrant les données de températures.

3.7. Procédures expérimentales

Cette section concerne les procédures expérimentales utilisées pour caractériser et évaluer les revêtements sélectionnés. Le terme « pale non revêtue » utilisé dans cette section veut dire que la pale en aluminium est recouverte d'une pellicule plastique qui a déjà été mentionnée dans la **section 3.1**.

3.7.1. Mesure de l'angle de contact de l'eau

La mesure de l'angle de contact consiste à mesurer l'angle de la tangente du profil de la goutte déposée sur le substrat, avec la surface du substrat. Elle permet de calculer l'énergie de surface du liquide ou du solide. La mesure de l'angle de contact permet d'accéder à l'énergie libre de la surface. Elle permet aussi la discrimination de la nature polaire ou apolaire des interactions à l'interface liquide/solide. On peut ainsi déduire le caractère hydrophile (petit angle, grande énergie de surface) ou hydrophobe (grand angle, faible énergie de surface) de la dite surface si on utilise l'eau comme liquide de mesure d'angle de contact.

En pratique, une goutte de liquide, en général de l'eau déminéralisée est déposée à l'aide d'une seringue sur la surface de l'échantillon à analyser. Il existe 2 modes de mesure des angles de contact. Le mode statique et le mode dynamique.

En mode statique, la goutte est déposée sur l'échantillon à analyser et l'angle est mesuré directement. En mode dynamique, l'on mesure deux types d'angles, l'angle avançant (θ_a) et l'angle reculant (θ_r). L'angle avançant est mesuré lorsque le volume de la

goutte est augmenté, l'angle reculant est mesuré lorsque le volume de la goutte est diminué (Figure 3.14).

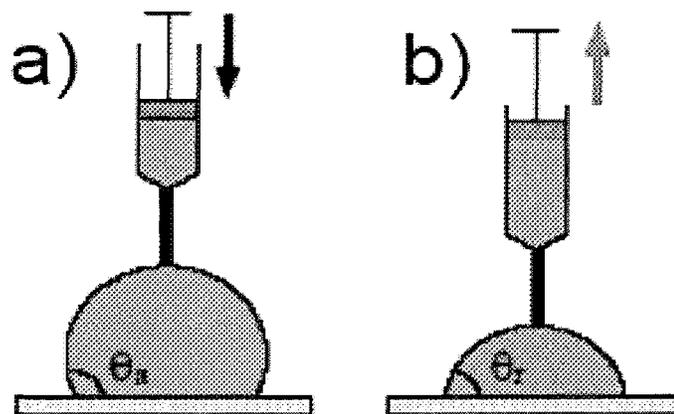


Figure 3.14 : a) Mesures d'angles d'avancée et b) de reculée sur une surface

L'angle de contact θ permet de définir si une surface est hydrophile ou hydrophobe (si $\theta < 90^\circ$, on dira que la surface est hydrophile et si $\theta > 90^\circ$, on dira que la surface est hydrophobe). Une surface superhydrophobe quand à elle est une surface avec un angle de contact supérieur à 150° .

L'appareil utilisé (Figure 3.15) est spécialement conçu pour mesurer les angles de contact statiques d'une goutte de liquide sur un substrat solide. Il est principalement composé d'une seringue micrométrique, d'une caméra vidéo grossissante couplée à un ordinateur et/ou un moniteur. L'image vidéo est arrêtée sur un plan de la goutte sur la surface (Figure 3.16). Un logiciel de traitement d'image est fourni pour déterminer l'angle de contact. Le matériel utilisé est constitué des échantillons de lame d'aluminium à caractériser, de l'eau déminéralisée (environ 10mL) et de l'appareil de mesure qui est un VCA Optima de AST Product (Figure 3.15). Les mesures de l'angle se calculent grâce au

logiciel VCA version 1.71 for Windows 95, AutoFast version 2.33 dont une image de la barre d'outils est présentée à la **Figure 3.17**.

Une goutte d'eau de volume donné (entre 3 et 4 μL) est déposée à l'aide d'une micropipette. L'image de la goutte est capturée par une caméra vidéo. La mesure de l'angle est effectuée de façon statique. Des marqueurs L, R, T, 1, 2 sont placés sur l'image figée (Figure 3.18) et les angles de contact gauche et droit sont obtenus par simple clic. Une moyenne des deux mesures est calculée ainsi que l'écart-type correspondant. On vérifie les mesures en déposant une gouttelette sur au moins quatre endroits différents de la surface.

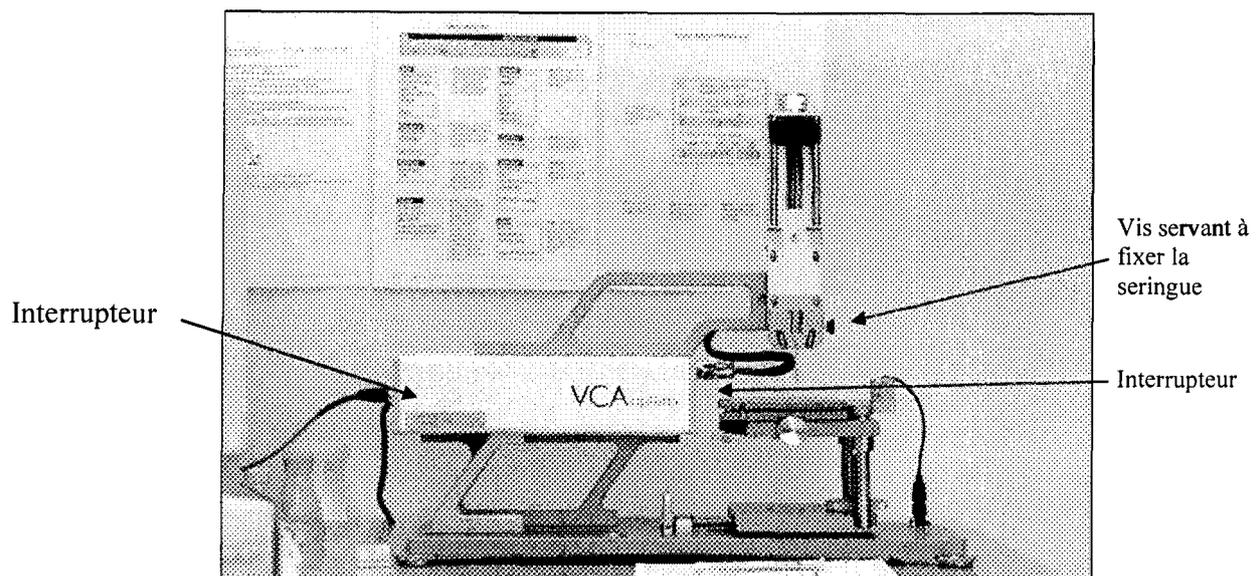


Figure 3.15 : Photographie de l'appareil de mesure d'angles de contact

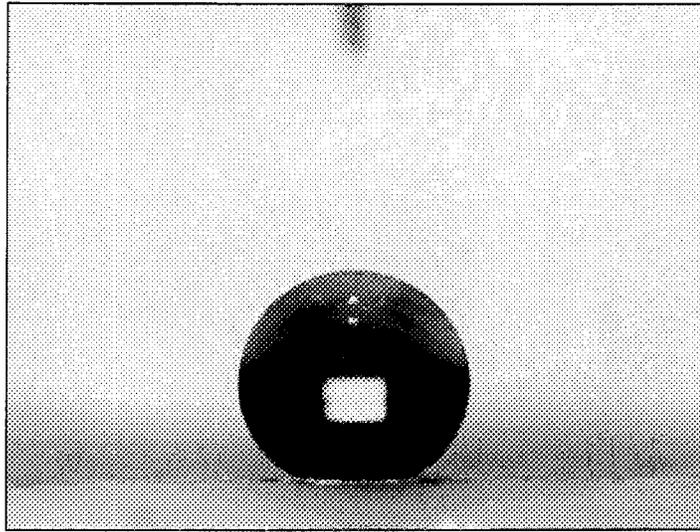


Figure 3.16 : Goutte d'eau sur une surface hydrophobe

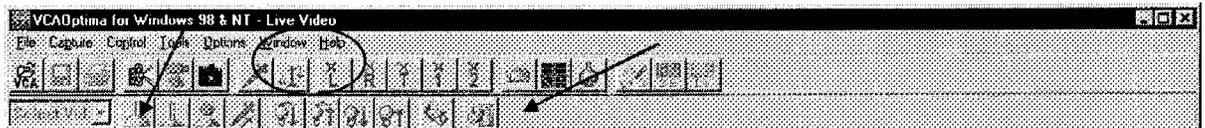


Figure 3.17 : Barre d'outils

Angle de contact de
gauche et droit

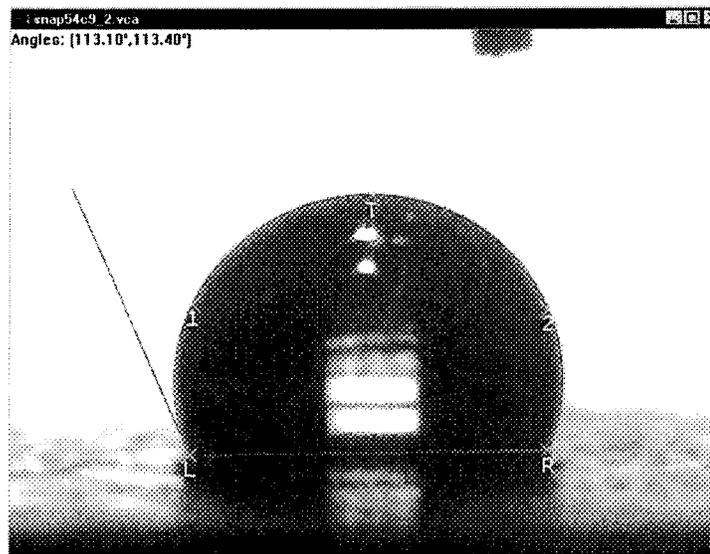


Figure 3.18 : Emplacement des marqueurs et calcul automatique de l'angle de contact gauche et droit

3.7.2. Essais en soufflerie réfrigérée

Trois séries d'essais ont été effectués dans la soufflerie réfrigérée du LIMA. La première série concerne des essais simples d'accumulation de glace sans dégivrage alors que les deux autres séries concernent des essais de dégivrage de la pale, en modes « antigivrage » et « dégivrage ».

En mode « antigivrage », les essais ont été menés dans un premier temps pour une seule vitesse (21 m/s) pour deux températures de l'air (-5 et -20°C). A la suite des essais pour ces deux conditions climatiques, le revêtement qui avait le meilleur comportement a été retenu. Ensuite, des essais comparatifs ont été menés à 33 m/s pour les deux températures (-5 et -20°C) sur la pale non revêtue et sur le revêtement retenu à partir de la série d'essais précédente.

En mode « dégivrage », les essais ont été menés sur le revêtement retenu et sur la pale non revêtue. Il a été pris pour acquis que ce revêtement était aussi le meilleur en mode dégivrage. Les conditions climatiques sont une vitesse de 33 m/s deux températures de l'air (-5 et -20°C).

CHAPITRE 4

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

CHAPITRE 4

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Dans la soufflerie les essais ont été réalisés à deux températures de l'air (-5 et 20°C) et pour deux différentes vitesses (21 m/s et 33 m/s). Les essais ont été présentés en détail dans l'annexe C, suivant le mode de dégivrage qui a été utilisé. Compte tenu de la durée de chaque essai en soufflerie, et compte tenu de la disponibilité de la soufflerie réfrigérée, juste la série d'essais en mode antigivrage a été faite en comparant la pale non revêtue avec tous les revêtements. Après cette étude, des essais en mode dégivrage ont été réalisés en comparant la pale sans revêtement avec le meilleur revêtement hydrophobe (retenu après la série d'essais en mode antigivrage) et le revêtement superhydrophobe.

La procédure des essais se divise en plusieurs étapes regroupées en 3 groupes nommés a, b et c.

a) Mise en route de la soufflerie

Deux heures avant le début des essais, il faut mettre en route la soufflerie en démarrant le logiciel de contrôle de la soufflerie. Celui-ci permet de régler la vitesse d'écoulement et la température de l'air aux valeurs souhaitées via l'interface. Il faut ensuite régler la température du compresseur du système de refroidissement en fonction de la température et de la vitesse de l'air dans la soufflerie. Le groupe d'étapes suivantes consiste à allumer le compresseur, laisser la soufflerie en fonctionnement jusqu'à ce que la température cible soit atteinte et stable.

b) Branchement des circuits d'air et d'eau

Lors du refroidissement de la soufflerie, il faut ajuster la rampe des gicleurs. Celle-ci est utilisée pour simuler le nuage givrant représenté par une teneur en eau liquide (LWC) et un diamètre moyen des gouttelettes (MVD) présentes dans un nuage. On allume ensuite le système de chauffage de la rampe de gicleurs. On raccorde les circuits d'air et d'eau sur le réservoir, on ouvre le circuit d'eau, on ajuste les débitmètres pour obtenir la teneur en eau liquide souhaitée et on ajuste la pression de l'air dans les gicleurs pour obtenir le diamètre moyen de gouttelettes souhaitées.

c) Déroulement de l'essai

Les étapes suivantes correspondent au déroulement de chaque essai et à l'enregistrement des informations issues de l'essai. Ces étapes dépendent donc du type d'essai effectué : essai d'accumulation, essai en mode antigivrage ou essai en mode dégivrage. Cette étape est donc détaillée dans la section correspondant à chaque type d'essai.

En dehors des essais en soufflerie, des mesures d'angle de contact ont été faites sur chacun des revêtements à l'étude.

4.1. Mesure de l'angle de contact pour les revêtements

Les résultats de la mesure de l'angle de contact de l'eau fait sur chacun des revêtements sont consignés au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Résultats de l'angle de contact

Revêtement	Angle de contact gauche ($\pm 0,1^\circ$)	Angle de contact droit ($\pm 0,1^\circ$)	Angle de contact moyen ($\pm 0,1^\circ$)
Wearlon F1-Ice	115	115	115
HIREC 1450	152	152	152
StaClean™	101	101	101
Pellicule plastique	70	70	70

Comme déjà précisé plus haut (section 2.3.1), une surface est hydrophile lorsque l'angle de contact avec l'eau est inférieur à 90° , hydrophobe lorsque cet angle est compris entre 90 et 150° et superhydrophobe lorsque l'angle est supérieur à 150° . Les résultats obtenus pour la mesure de l'angle de contact de l'eau avec chacune des surfaces montrent que la surface recouverte de pellicule plastique est hydrophile. Les revêtements Wearlon F1-Ice et StaClean™ sont hydrophobes alors que le revêtement HIREC 1450 est superhydrophobe. Ces mesures confirment donc le degré d'hydrophobicité de chaque revêtement.

4.2. Influence de la présence de la pellicule plastique

Avant de revêtir les pales avec le produit sélectionné, une pellicule plastique a d'abord été installée. L'information sur cette pellicule plastique est donnée plus en détail à l'**annexe D**. L'influence de la présence de cette pellicule est analysée et présentée dans cette section-ci. Pour ce faire, des essais en mode antigivrage ont été faits aux températures

-5 et -20°C et à des vitesses de 21 et 33 m/s sous conditions froides (sans précipitations) et sous précipitations givrantes. Les résultats sont présentés aux figures ci-dessous (Figure 4.1 à Figure 4.3). Ces figures montrent les courbes des températures de surface le long des pales recouvertes de la pellicule plastique ou non.

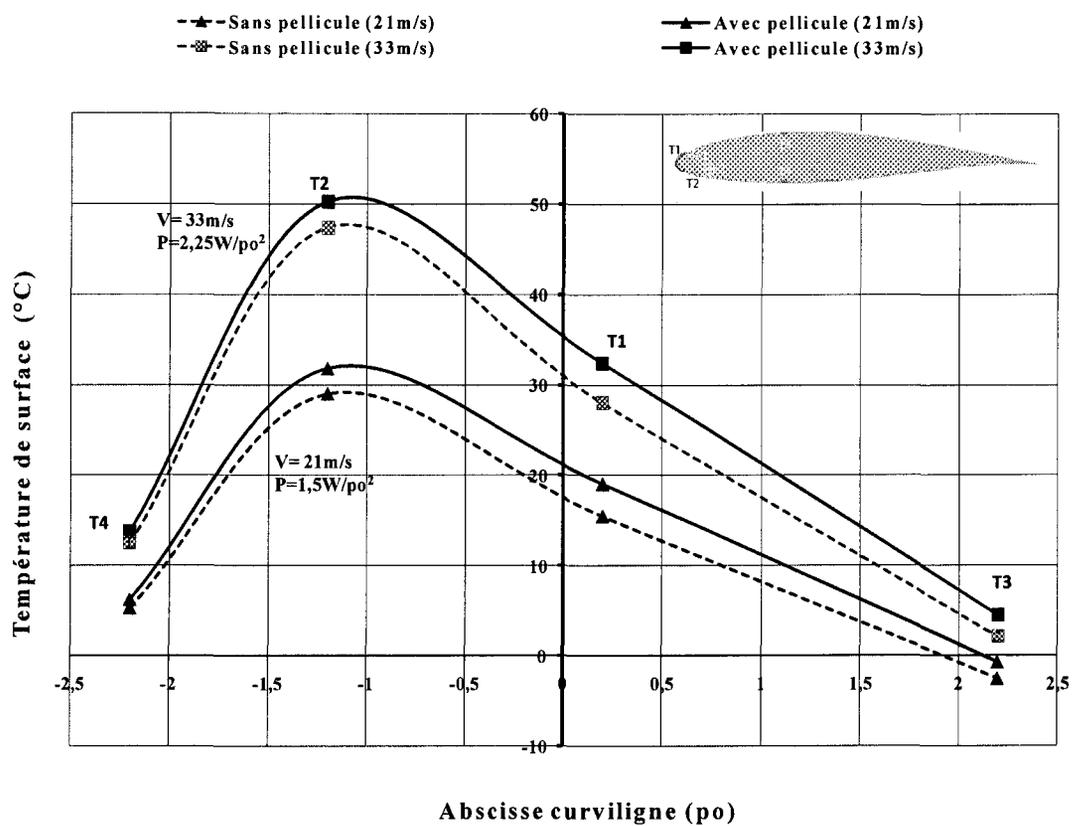


Figure 4.1 : Essais sans précipitations (à -20°C)

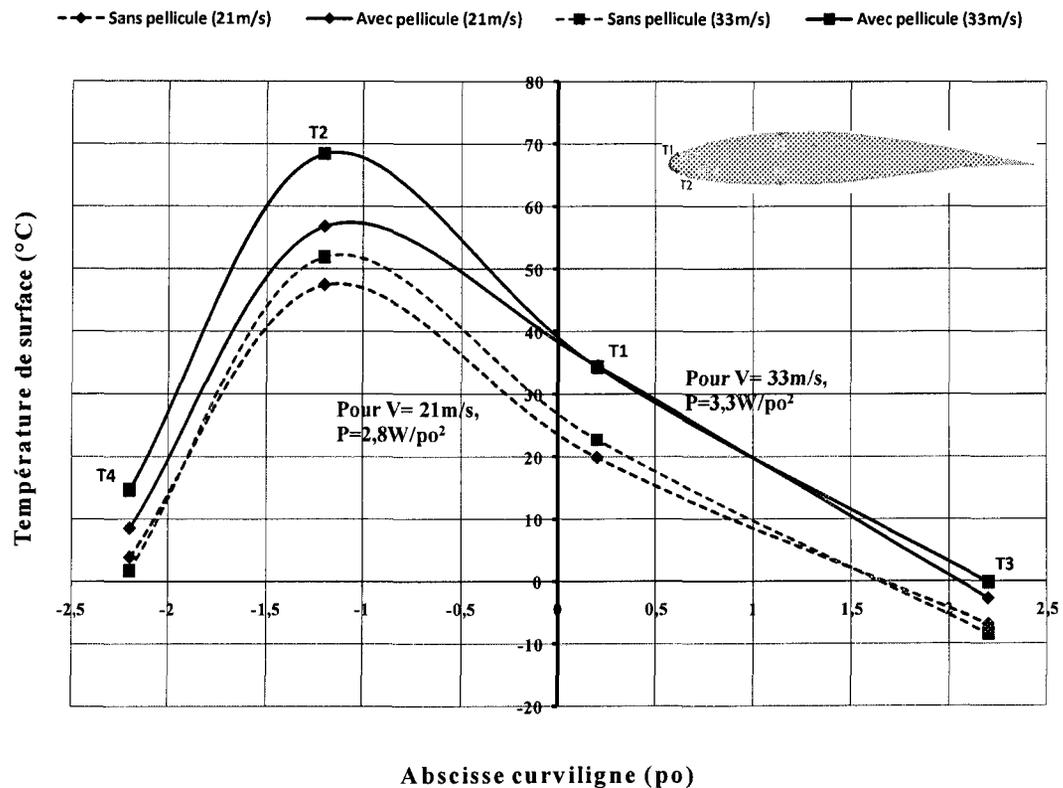


Figure 4.2 : Essais avec précipitations (à -20°C)

À la Figure 4.1, on remarque que la température de surface est plus élevée en présence de la pellicule plastique sur le profil en aluminium (10% environs). Cette augmentation est sans doute due au fait que la pellicule plastique joue un rôle d'isolant et réduit les pertes thermiques par convection dans l'air. A une température de -20°C , pour une vitesse de 21 m/s en présence de précipitations, la pellicule plastique accroît la température de surface au niveau du bord d'attaque d'environ 28% alors qu'à 33 m/s ce gain est d'environ 20%. Mais cette différence décroît dès qu'on s'éloigne du bord d'attaque. La même tendance est observée lorsqu'il y a une précipitation (Figure 4.2). La

température à -2,2 po du bord d'attaque correspond au thermocouple situé sur la partie inférieure du profil à environ au tiers de la corde (T4). Comme ce thermocouple est près de l'élément chauffant situé sur la partie inférieure, sa température est plus élevée que celle mesurée dans la partie supérieure du profil au tiers de la corde (T3) ; ce thermocouple étant situé à une distance plus importante de l'élément chauffant installé sur le bord d'attaque. La température mesurée à 1,2 po du bord d'attaque (T2), se situe au milieu de l'élément chauffant situé dans la partie inférieure du profil et celle mesurée à 0,2 po, (T1) est légèrement décentré du milieu de l'élément chauffant vers la partie supérieure du profil. A puissance égale pour les éléments chauffants, la température T2 est plus élevée que la température T1 en raison du transfert de chaleur par convection plus faible. La température dans la partie supérieure du profil au tiers de la corde est la plus faible, elle s'accroît en s'approchant du bord d'attaque pour atteindre sa valeur maximale à -1,1 po du bord d'attaque dans la partie inférieure du profil. Par la suite elle diminue dans la partie inférieure du profil jusqu'au tiers de la corde. Ce comportement est similaire avec ou sans pellicule (Figure 4.1) et lorsque la vitesse (Figure 4.1) et la température (Figure 4.3) augmentent.

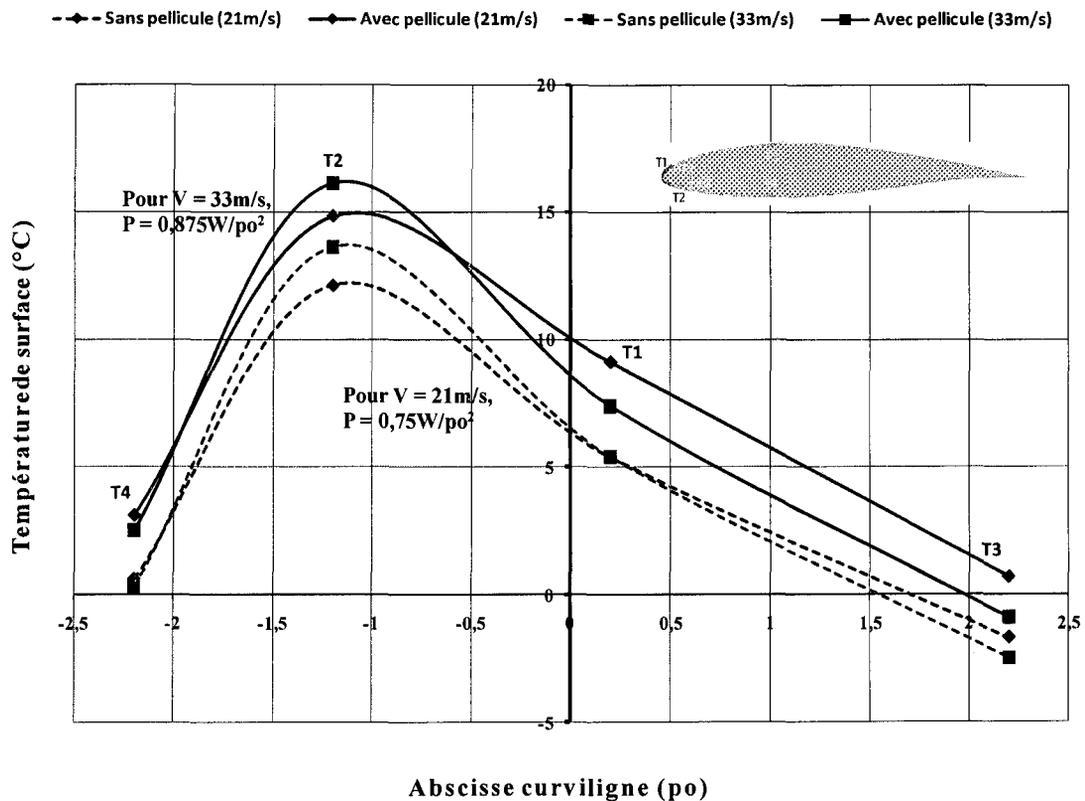


Figure 4.3 : Essais avec précipitations (à -5°C)

Sous précipitations givrantes, à une température de -20°C , l'écart de température avec et sans pellicule augmente, passant de 55% pour la vitesse de 21 m/s à 88% pour celle de 33 m/s pour le thermocouple T4 (Figure 4.2). Cet écart est encore plus grand pour le thermocouple T3. La même tendance est observée à une température de -5°C (Figure 4.3). De même, sous précipitations givrantes, pour maintenir le bord d'attaque libre de glace, la puissance fournie aux éléments chauffants augmente lorsque la vitesse augmente et la température diminue en raison des échanges convectifs qui augmentent avec

l'accroissement de la vitesse et la diminution de la température. Elle passe de 2,8 W/po² à 21 m/s à 3,3 W/po² à 33 m/s et de 0,75 W/po² à -5°C à 2,8 W/po² à -20°C.

En conclusion, la pellicule plastique simulait bien l'effet de la pale d'éolienne et que l'aluminium simulait la chaleur de l'élément chauffant par conduction jusqu'au point 3 et 4.

4.3. Essais d'accumulation

Les essais d'accumulation effectués qui consistent à laisser la glace s'accumuler sur la pale ont pour but de vérifier s'il y a un lien entre le degré d'hydrophobicité des revêtements et le volume de givre ou de verglas accumulé sur la pale. Ces essais ont été réalisés sans système de dégivrage de la pale et pour un temps d'accumulation de 6 minutes. Les conditions des essais sont résumées au Tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Tableau résumant les conditions utilisées

Condition #	Régime d'accrétion	Conditions climatiques			Caractéristiques et forme de glace
		Vitesse (m/s)	T _{air} (°C)	LWC (g/m ³)	
1	Humide	21	-5	0,4	Verglas (forme en cornes)
2		33			
3	Sec	21	-20	0,4	Givre (forme épousant la forme du profil)
4		33			

4.3.1. Description d'un essai-type

Lors d'un essai-type, la soufflerie est réfrigérée jusqu'à la température cible, et une fois que cette température est atteinte et stable la précipitation givrante est maintenue sur la pale pendant 6 minutes. Ensuite, l'essai est arrêté et les mesures des valeurs caractéristiques des formes de glace sont prises (Figure 4.4).

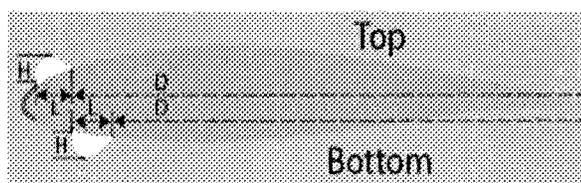


Figure 4.4 : Schéma montrant les valeurs caractéristiques des formes de glace

A la Figure 4.4, les termes « Top » et « Bottom » représentent respectivement l'extrados et l'intrados de la pale. La distance D représente la position de la glace solidifiée par rapport au bord de fuite alors que H représente la hauteur de la glace accrétée et L la longueur sur laquelle l'eau s'est étalée avant de se solidifier. Pour chaque régime d'accrétion, les essais ont été faits à 21 m/s (conditions 1 et 3) sur toutes les surfaces et à 33 m/s (condition 2 et 4) sur la surface superhydrophobe et les surfaces sans revêtement hydrophobe (pale recouverte de pellicule plastique et pale non recouverte de pellicule plastique). La liste des essais d'accumulation effectués est présentée au Tableau 4.3 et au Tableau 4.4 alors que les essais sont présentés en détail à l'**annexe C.1**.

Tableau 4.3 : Liste des essais d'accumulation effectués

Condition #	Revêtement	Objectifs	N° d'essai
1	Pellicule plastique	Forme de glace en régime humide	38
	HIREC 1450	Forme de glace en régime humide Comparaison avec les essais n°38, 67,74	56
	StaClean™	Forme de glace en régime humide Comparaison avec les essais n°38, 56,74	67
	Wearlon F1-Ice	Forme de glace en régime humide Comparaison avec les essais n°38, 56, 67	74
	Aucun, sans pellicule plastique	Comparaison avec la pale revêtue de la pellicule pour voir l'influence de la présence de la pellicule	131
2	Pellicule plastique	Forme de glace en régime humide à forte vitesse	40
	Pellicule plastique	Reprise de l'essai précédent	93
	HIREC 1450	Forme de glace en régime humide à forte vitesse Comparaison avec l'essai n°40	99
3	Pellicule plastique	Forme de glace en régime sec	27
	HIREC 1450	Forme de glace en régime sec Comparaison avec les essais n°27, 61, 81	50
	HIREC 1450	Reprise de l'essai n°50	138
	StaClean™	Forme de glace en régime sec Comparaison avec les essais n°27, 50, 81	61
	Wearlon F1-Ice	Forme de glace en régime sec Comparaison avec les essais n°27, 50, 61	81
	Aucun, sans pellicule plastique	Comparaison avec la pale revêtue de la pellicule pour voir l'influence de la présence de la pellicule	126

Tableau 4.4 : Liste des essais d'accumulation effectués (fin)

Condition #	Revêtement	Objectifs	N° d'essai
4	Pellicule plastique	Forme de glace en régime sec à forte vitesse	26
	HIREC 1450	Forme de glace en régime sec à forte vitesse Comparaison avec l'essai n°26	89
	HIREC 1450	Reprise de l'essai n°89	141
	Aucun, sans pellicule plastique	Comparaison avec la pale revêtue de la pellicule pour voir l'influence de la présence de la pellicule	129

4.3.2. Résultats

Dans le cas de la température de -20°C , une glace laiteuse et opaque se forme sur le bord d'attaque et épouse la forme du profil correspondant à du givre (Figure 4.5). Dans le cas de la température de -5°C , la glace observée est transparente et des cornes se forment, correspondant à du verglas (Figure 4.6) quelle que soit la vitesse.

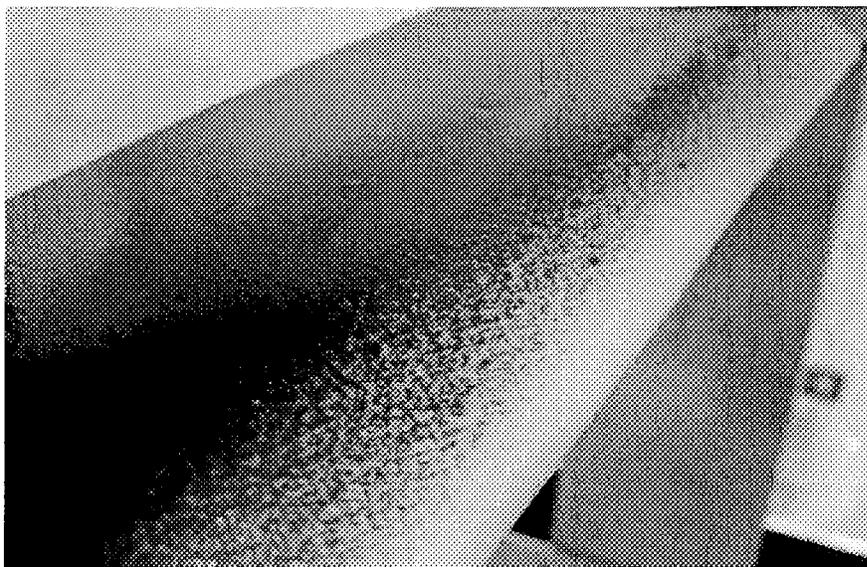


Figure 4.5 : Photo montrant le givre qui épouse la forme du profil de pale

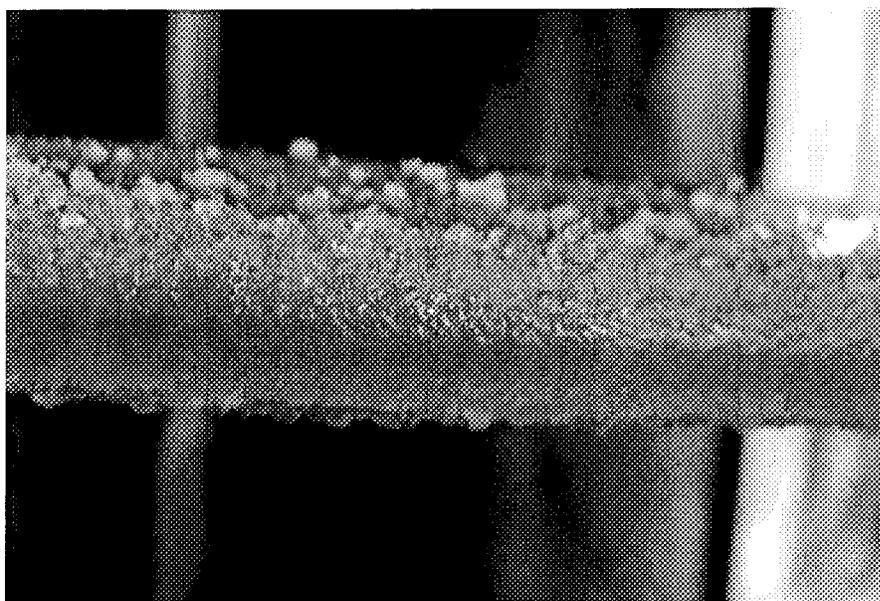


Figure 4.6 : Photo montrant la forme en corne pour le verglas

La Figure 4.7 présente les images montrant l'accumulation de la glace selon le régime d'accrétion et le type de revêtement. En régime sec, la glace est opaque et laiteuse correspondant à du givre alors qu'en régime humide elle est transparente, correspondant à du verglas. La forme de glace ne dépend donc pas de l'hydrophobicité de la surface mais bien du régime d'accrétion.

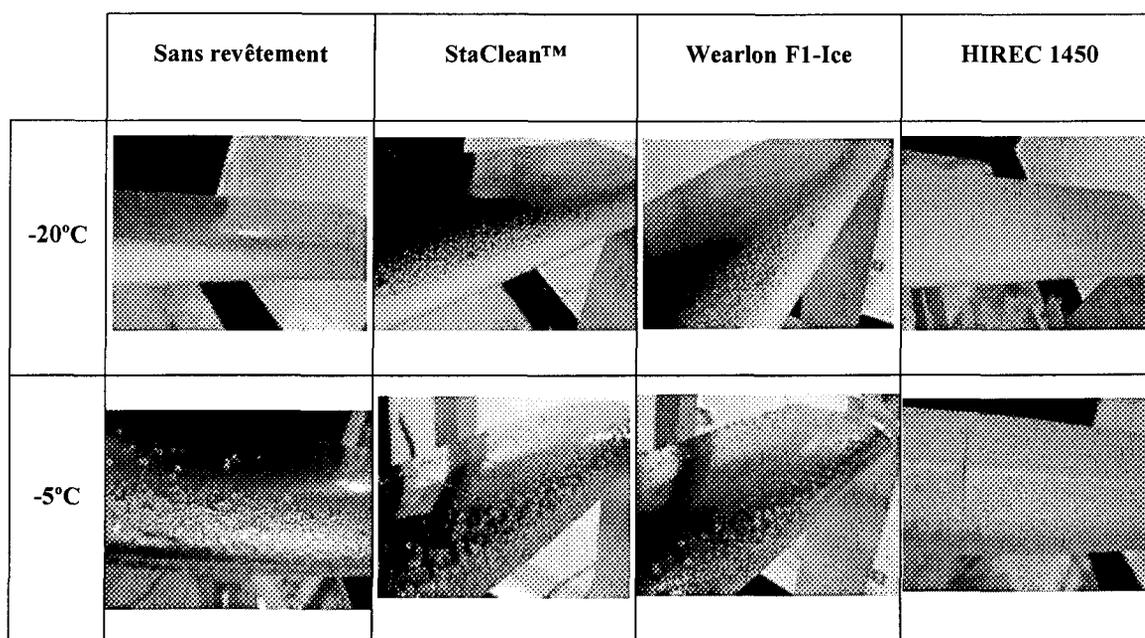


Figure 4.7 : Photos présentant l'accumulation de la glace selon le régime d'accrétion et le type de revêtement

Une estimation du volume de glace accumulé sur chaque revêtement lors des essais en régime humide et en régime sec a été faite. Le volume de glace est estimé en considérant le bord d'attaque de la pale comme un demi-cylindre de hauteur égale à la longueur de la pale et dont la base a pour caractéristiques (L x H). Le Tableau 4.5 et le Tableau 4.6 montrent un résumé des dimensions des formes de glace mesurées lors des essais et le

volume de glace correspondant. Dans tout les cas, l'accrétion se localise au niveau du bord d'attaque du profil.

Tableau 4.5 : Tableau résumant les valeurs caractéristiques des formes de glace en régime sec

Revêtement	Formes de glace (extrados)			Formes de glace (intrados)			Volume de glace (cm ³)
	D (cm)	L (cm)	H (cm)	D (cm)	L (cm)	H (cm)	
Pellicule plastique	7,882	2,228	0,459	7,936	1,912	0,459	48,3
HIREC 1450	8,316	2,166	0,112	8,437	0,838	0,1	8,3
StaClean™	7,774	2,344	0,1	8,490	1,254	0,1	9,1
Wearlon F1-Ice	7,774	2,294	0,184	8,990	1,2	0,140	14,99

Tableau 4.6 : Tableau résumant les valeurs caractéristiques des formes de glace en régime humide

Revêtement	Formes de glace (extrados)			Formes de glace (intrados)			Volume de glace (cm ³)
	D (cm)	L (cm)	H (cm)	D (cm)	L (cm)	H (cm)	
Pellicule plastique	7,732	2,336	0,144	8,059	1,854	0,224	19,1
HIREC 1450	8,038	2,296	0,08	8,614	1,292	0,032	5,72
StaClean™	8,159	2,429	0,086	8,496	0,954	0,086	7,39
Wearlon F1-Ice	7,9	1,942	0,104	9,067	0,764	0,074	6,57

La **Figure 4.8** montre le volume de glace accumulé pour chacun des régimes d'accumulation en fonction de l'angle de contact et du régime d'accrétion. On remarque qu'en régime humide, les revêtements hydrophobes (Staclean et Wearlon) réduisent d'environ 60% l'accumulation de glace sur la pale alors que le revêtement superhydrophobe réduit de 70% cette accumulation, faisant apparaître une possible corrélation avec le degré d'hydrophobicité de la surface. En régime sec, la corrélation n'est pas aussi parfaite, mais la tendance est similaire. Le Wearlon réduit le volume de glace accrété de 69%, le Staclean de 81% et le HIREC de 82.8%. Un seul essai ayant été réalisé dans chaque cas, l'essai avec le Wearlon peut avoir été perturbé par des causes inconnues.

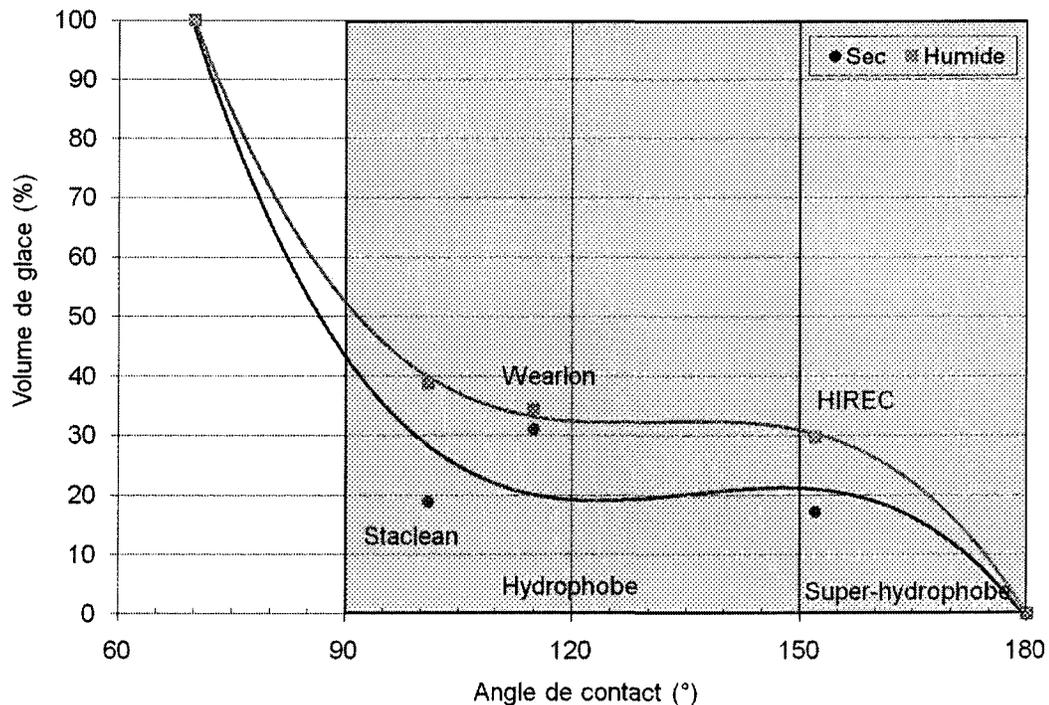


Figure 4.8 : Graphiques montrant le pourcentage de réduction du volume de glace accumulé en fonction de l'hydrophobicité du revêtement

4.4. Comportement des revêtements en mode antigivrage

Les essais des sections 4.4 et 4.5 ont pour but d'évaluer le comportement des matériaux hydrophobes sous précipitations givrantes lorsqu'ils sont combinés à un système de dégivrage électrothermique. Dans cette section, le système de dégivrage électrothermique opère en mode antigivrage. Les essais ont été effectués sur les 4 surfaces (sans revêtement, Wearlon, Staclean et HIREC) pour 4 conditions climatiques. Ces conditions climatiques présentées au **Tableau 4.7** permettent d'évaluer les revêtements suivant les deux régimes d'accrétion et à différentes vitesses. Pour chaque condition climatique et pour chaque surface, la puissance de dégivrage minimale qui conduit au ruissellement est déterminée. Cette puissance minimale appelée «puissance seuil de ruissellement» est déterminée visuellement. Des essais ont aussi été effectués sur les surfaces, pour chaque condition climatique, à une puissance de dégivrage ne pouvant occasionner du ruissellement. Cette puissance est égale à la moitié de la «puissance seuil de ruissellement de la pale sans revêtement». Ainsi au total, ce sont 42 essais qui ont été retenus et leur liste est présentée aux **Tableau 4.8** à **Tableau 4.12** par condition climatique. Les **sections C.2.1** à **C.2.42** présentent de façon détaillée tous ces essais.

Tableau 4.7 : Description des conditions climatiques testées

Condition #	U_{air} (m/s)	T_{air} (°C)	LWC (g/m^3)	Régime d'accrétion et type de glace
1	21	-5	0,4	Humide (verglas)
2	33			
3	21	-20	0,4	Sec (givre)
4	33			

Tableau 4.8 : Liste des essais pour le mode antigivrage pour la condition climatique n°1

Surface	Condition de dégivrage	Essai n°	Puissance (W)	Objectifs
Pellicule plastique, sans revêtement	Ruissellement (P3)	37	30	Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour la pellicule plastique
Sans pellicule plastique, sans revêtement	P3	133	30	Comparaison avec les essais n°37, 55,68 et 73
Pellicule plastique + HIREC	P3	55	30	Comparaison avec les essais n°37, 133, 68 et 73
Pellicule plastique + Staclean	P3	68	30	Comparaison avec les essais n°37, 133, 55, et 73
Pellicule plastique + Wearlon	P3	73	30	Comparaison avec les essais n°37, 133, 55, et 68
Pellicule plastique + Wearlon	50% de P3	79	15	Comparaison avec l'essai n°73
Pellicule plastique + HIREC	Ruissellement (P6)	60	19,5	Trouver P_{seuil} pour le revêtement suprhdrophobe, le HIREC
Pellicule plastique + Staclean	P6	69	19,5	Comparaison avec les essais n°60 et 76
Pellicule plastique + Wearlon	P6	76	19,5	Comparaison avec les essais n°60 et 69
Pellicule plastique + Staclean	Ruissellement (P8)	72	26,1	Trouver P_{seuil} pour le revêtement Staclean et faire une comparaison avec les essais n°37,60 et 77
Pellicule plastique + Wearlon	P8	78	26,1	Comparaison avec l'essai n°72
Pellicule plastique + Wearlon	Ruissellement (P9)	77	25,3	Trouver P_{seuil} pour le revêtement Wearlon et faire une comparaison avec les essais n°37,60 et

Tableau 4.9 : Liste des essais retenus pour le mode antigivrage pour la condition climatique n°2

Surface	Condition de dégivrage	Essai n°	Puissance (W)	Objectifs
Pellicule plastique, sans revêtement	Ruissellement (P12)	97	35	Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour la pellicule plastique et faire une comparaison avec l'essai n°103
Sans pellicule plastique, sans revêtement	P12	134	35	Comparer avec les essais n°97 et 100
Pellicule plastique + HIREC	P12	100	35	Comparer avec les essais n°97 et 134
Pellicule plastique, sans revêtement	50% de P12	98	17,5	Comparer avec l'essai n°101
Pellicule plastique + HIREC	50% de P12	101	17,5	Comparer avec l'essai n°98
Pellicule plastique + HIREC	Ruissellement (P13)	103	30,5	Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le HIREC et faire une comparaison avec l'essai n°97

Tableau 4.10 : Liste des essais retenus pour le mode antigivrage pour la condition climatique n°3

Surface	Condition de dégivrage	Essai n°	Puissance (W)	Objectifs
Pellicule plastique, sans revêtement	Ruissellement (P1)	22	115	Trouver P_{seuil} pour la pellicule plastique et faire une comparaison avec les essais n°54,64 et 88
Sans pellicule plastique, sans revêtement	P1	136	115	Comparer avec les essais n°22, 48, 63 et 82

Tableau 4.11 : Liste des essais retenus pour le mode antigivrage pour la condition climatique n°3 (suite)

Surface	Condition de dégivrage	Essai n°	Puissance (W)	Objectifs
Pellicule plastique + HIREC	P1	48	115	Comparer avec les essais n°22, 136, 63 et 82
Pellicule plastique + Staclean	P1	63	115	Comparer avec les essais n°22, 136, 48 et 82
Pellicule plastique + Wearlon	P1	82	115	Comparer avec les essais n°22, 136, 48 et 63
Pellicule plastique, sans revêtement	50% de P1	21	57,5	Comparer avec les essais n° 51, 65 ou 66 et 84
Pellicule plastique + HIREC	50% de P1	51	57,5	Comparer avec les essais n°21, 65 et 84
Pellicule plastique + Staclean	50% de P1	65	57,5	Comparer avec les essais n°21, 51, et 84
Pellicule plastique + Wearlon	50% de P1	84	57,5	Comparer avec les essais n°21, 51 et 65
Pellicule plastique + HIREC	Ruissellement (P5)	54	99	Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le HIREC et faire une comparaison avec les essais n°22,64 et 88
Pellicule plastique + HIREC	P5	139,142	99	Reprises de l'essai n°54
Pellicule plastique + Staclean	P5	62	99	Comparer avec les essais n°54 et 83
Pellicule plastique + Wearlon	P5	83	99	Comparer avec les essais n°54 et 62
Pellicule plastique + Staclean	Ruissellement (P7)	64	108	Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le Staclean et faire une comparaison avec les essais n°22,54 et 88
Pellicule plastique + Wearlon	P7	85	108	Comparer avec l'essai n°64
Pellicule plastique + Wearlon	Ruissellement (P10)	88	106,5	Trouver P_{seuil} pour le Wearlon et faire une comparaison avec les essais n°22,54 et 64

Tableau 4.12 : Liste des essais retenus pour le mode antigivrage pour la condition climatique n°4

Surface	Condition de dégivrage	Essai n°	Puissance (W)	Objectifs
Pellicule plastique, sans revêtement	Ruissellement (P2)	28	131	Trouver P_{seuil} pour la pellicule plastique et faire une comparaison avec l'essai n°92
Pellicule plastique + HIREC	P2	90	131	Comparer avec les essais n°28 et 137
Sans pellicule plastique, sans revêtement	P2	137	131	Comparer avec les essais n°28 et 90
Pellicule plastique, sans revêtement	50% de P2	31	65,5	Comparer avec l'essai n°28
Pellicule plastique + HIREC	Ruissellement (P11)	92	120	Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le HIREC et faire une comparaison avec l'essai n°28
Pellicule plastique + HIREC	P11	140,143	120	Reprises de l'essai n°92

4.4.1. Description d'un essai-type

Avant chaque essai, la soufflerie est amenée à la température voulue avec la pale instrumentée montée dans la section d'essai. Une fois que la température cible est atteinte et stable dans la section d'essai, on débute le chauffage des deux côtés latéraux de la pale qui sont par la suite maintenus chauffés au dessus de 100°C. On débute l'enregistrement des températures internes de la pale et on ajuste les paramètres de chauffage (tension et courant) aux valeurs désirées grâce au module de contrôle. Le module utilisé permet de contrôler la puissance de dégivrage des éléments chauffants (ensemble ou séparément). En

mode dégivrage, les deux éléments chauffants sont contrôlés séparément, tandis qu'en mode antigivrage, ils sont contrôlés simultanément, c'est-à-dire la puissance de dégivrage lue est celle des deux éléments chauffants.

Des essais préliminaires ont permis de conclure qu'une durée de 10 minutes était suffisante pour la stabilisation de la température des éléments chauffants lors des essais. Après cette durée, débutait l'envoi des précipitations givrantes. Les données enregistrées sont les températures internes T_1 , T_2 , T_3 et T_4 . Ce sont respectivement les températures au niveau des éléments chauffants 1 et 2 et les températures prises à 2,2 po (0,056m) du bord d'attaque sur l'extrados et sur l'intrados. T_1 est prise à 0,2 po du bord d'attaque alors que T_2 est prise à 1,2 po. La Figure 4.9 présente un exemple de fichier d'enregistrement des températures internes lors d'un essai en mode antigivrage. Cette figure montre une rampe d'augmentation des températures internes pendant environ 3 minutes, suivie d'un plateau de stabilisation d'environ 7 minutes. Cette durée de 10 minutes correspond à la période de préchauffage de la pale. Après cette période, on procède à l'envoi des précipitations givrantes pendant 6 minutes. On note alors une chute des températures T_1 , T_2 , T_3 et T_4 , chute plus ou moins importante dépendamment du revêtement à la surface de la pale. Il s'ensuit alors une période de stabilisation des températures internes (Figure 4.9 et Figure 4.10). Les températures moyennes retenues pour étude ont été celles de la zone de stabilisation (Figure 4.10). Les thermocouples 1 et 2 étant situés près des éléments chauffants 1 et 2, les températures T_1 et T_2 sont plus élevées que les températures T_3 et T_4 des thermocouples 3 et 4 car ceux-ci sont situés plus loin des éléments chauffants.

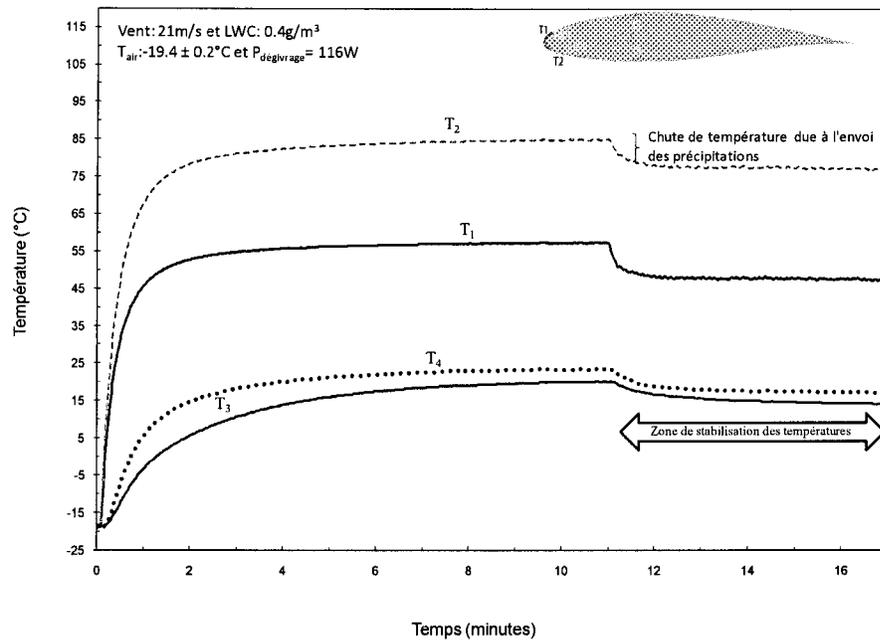


Figure 4.9 : Courbe des températures internes lors d'un essai en mode antigivrage

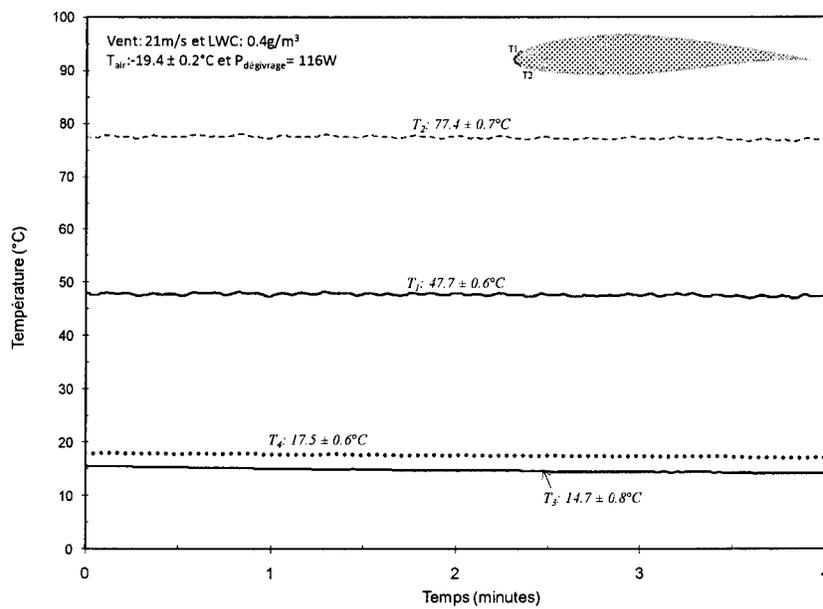


Figure 4.10 : Zone de stabilisation agrandie

4.4.2. Investigation de la puissance seuil de ruissellement

En mode antigivrage, il faut que le bord d'attaque du profil reste libre de toute accrétion de glace. La puissance minimale requise dans chaque cas pour maintenir le bord d'attaque libre de glace, correspond à la puissance seuil P_{seuil} , appelée puissance de ruissellement dans le reste de ce document. Les essais de cette section ont été effectués à 21m/s à une température de -20°C pour le givre et à -5°C pour le verglas.

Des essais ont donc eu lieu pour déterminer à quelle puissance minimale on avait du ruissellement et ce, pour chaque revêtement y compris la pale non revêtue. Cette puissance minimale est la puissance de ruissellement P_{seuil} . Elle est déterminée pour chaque revêtement en fonction du régime d'accrétion. Les résultats des essais sont résumés dans le Tableau 4.13. Lors de ces essais, la limite de ruissellement a été déterminée visuellement.

Tableau 4.13 : Résumé des puissances seuil de ruissellement (P_{seuil})

Type de glace	Sans revêtement		StaClean™		Wearlon F1-Ice		HIREC 1450	
	P_{seuil} (W)	Réduction (%)	P_{seuil} (W)	Réduction (%)	P_{seuil} (W)	Réduction (%)	P_{seuil} (W)	Réduction (%)
Givre	114	n/d	108	5,3	106	7	99	13
Verglas	29	n/d	26,1	11,5	25,3	14	19,5	33,9

La puissance minimale nécessaire pour avoir du ruissellement sur la pale non revêtue est de 114W pour le givre et de 29W dans le cas du verglas. Le revêtement superhydrophobe permet de réduire cette puissance de 13% dans le cas du givre et de 33% dans le cas du verglas, lorsque comparé à la pale non revêtue. Les revêtements hydrophobes

permettent quand eux une réduction minimale de 5% pour le givre et de 11,5% pour le verglas. Des deux revêtements hydrophobes, le Wearlon F1-Ice affiche le meilleur comportement et les meilleurs résultats. La **Figure 4.11** montre une extrapolation des résultats de la réduction de puissance en fonction de l'angle de contact de l'eau sur les revêtements, en supposant que pour un angle de contact de 180°, cette réduction de puissance serait de 100%.

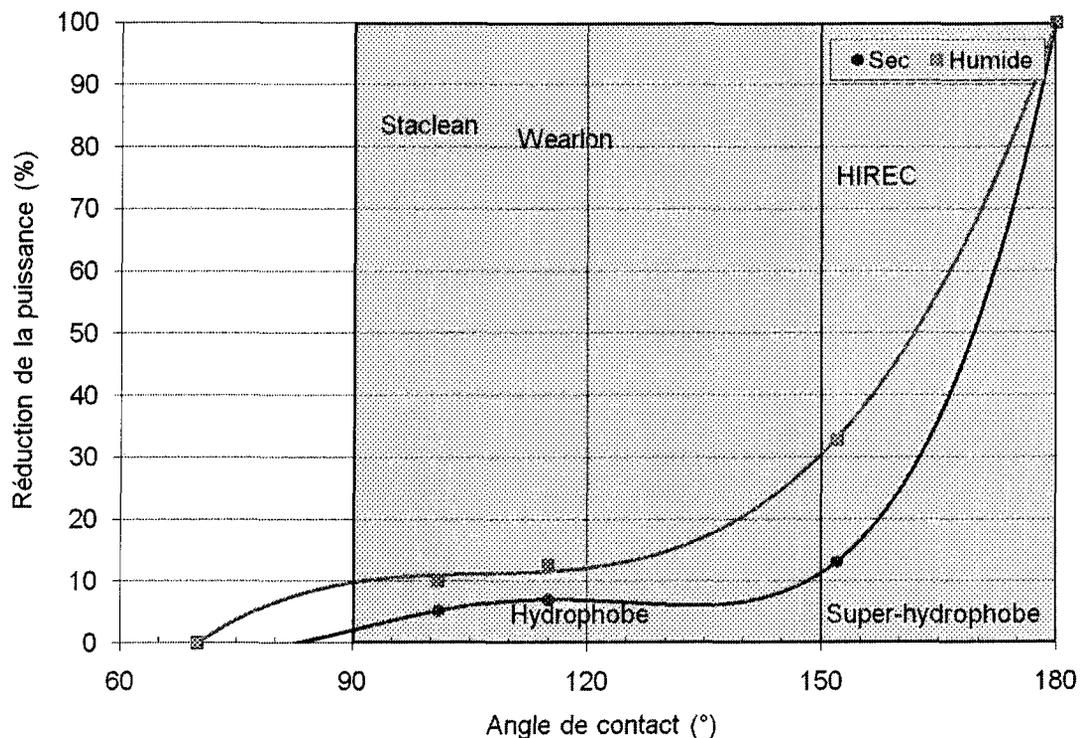


Figure 4.11 : Extrapolation de la réduction de la puissance de dégivrage minimale en fonction de l'hydrophobicité de la surface du revêtement

On remarque que plus le revêtement est hydrophobe plus la puissance nécessaire au dégivrage diminue. A partir d'un angle de contact de 150°, cette réduction fait un bond très

prononcé. Quelque soit le degré d'hydrophobicité, la réduction est plus importante en régime humide qu'en régime sec. Pour un angle de contact de 180° , la réduction de la puissance sera de 100% par comparaison à la pale non revêtue, et ceci indépendamment du régime d'accrétion.

Le **Figure 4.12** et la **Figure 4.13** présentent les courbes des températures internes le long de la pale pour les trois revêtements et la pale non revêtue, lorsqu'ils sont soumis à leur puissance de ruissellement. La **Figure 4.12** présente les résultats obtenus en régime sec alors que la Figure 4.13 présente ceux du régime humide.

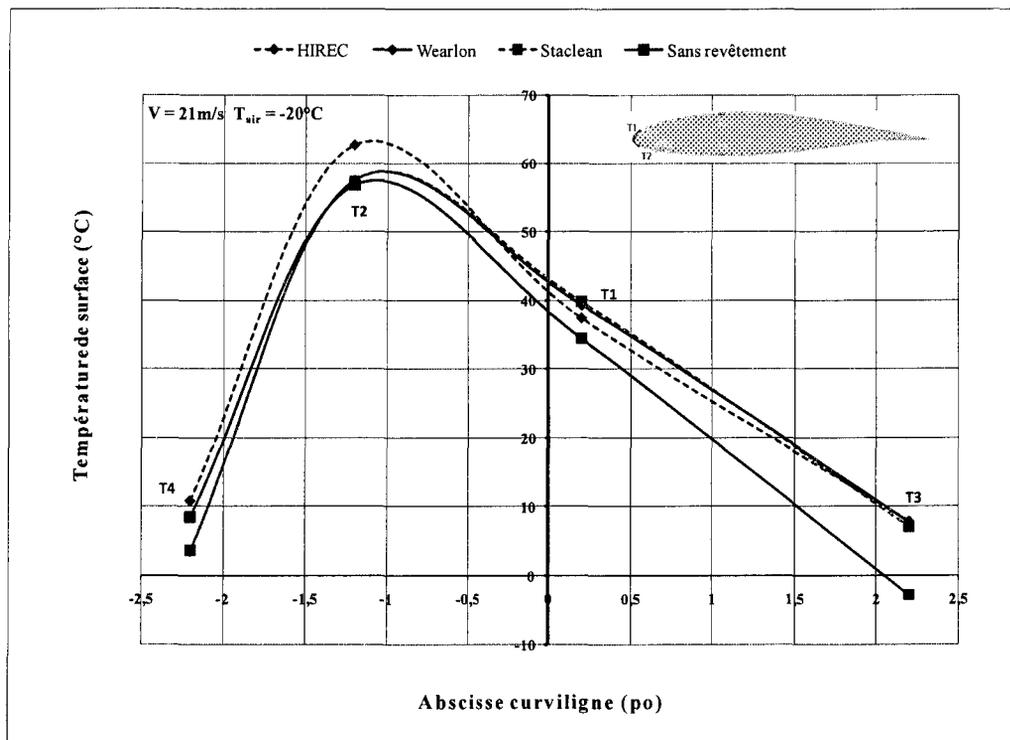


Figure 4.12 : Profil des températures internes en régime sec

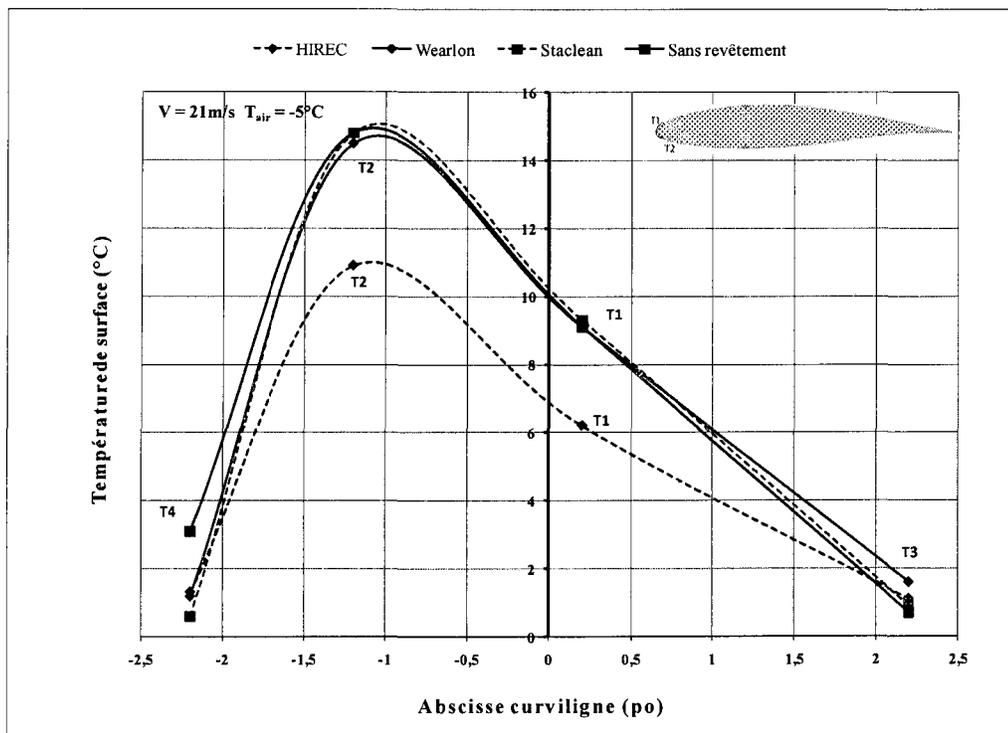


Figure 4.13 : Profil des températures internes en régime humide

D'après les figures, pour les revêtements hydrophobes (StaClean™ et Wearlon F1-Ice), le ruissellement débute lorsque la température de surface au point 4 (température T_4 sur la Figure 3.1) est d'environ 3°C pour le givre (Figure 4.12) et de 1°C environ pour le verglas (Figure 4.13). Pour la pale non revêtue, à puissance égale, cette température est de 8,5°C pour le givre (Figure 4.12) et de 3°C pour le verglas (Figure 4.13).

Dans le cas du givre (Figure 4.12), on observe que la température de surface du revêtement superhydrophobe (le HIREC) est plus élevée dans la partie inférieure du profil que pour les deux autres revêtements et la pale non revêtue, en dépit d'une puissance consommée beaucoup plus faible que les autres. Du bord d'attaque à la partie supérieure du

profil, les températures de surface du revêtement superhydrophobe et des revêtements hydrophobes coïncident.

Dans le cas du verglas (Figure 4.13), on remarque que la température de surface du revêtement HIREC est moins élevée que celle des deux autres revêtements et celle de la pale non revêtue le long de la partie chauffée. Néanmoins, en dépit d'une puissance plus faible générant une température de surface faible, le revêtement garde le bord d'attaque libre de glace. En réalité, c'est la superhydrophobicité du revêtement qui lui permet de refouler l'eau issue du chauffage. Sur des pales en fonctionnement sur site, on peut penser que le revêtement superhydrophobe serait encore plus efficace en raison des forces centrifuges.

La **Figure 4.14** montre une photographie de l'intrados et de l'extrados du profil à la fin des essais antigivre pour la pellicule, le Staclean, le Wearlon et l'HIREC. Que ce soit le givre ou le verglas, le bord d'attaque est généralement libre de glace et les parties supérieure et inférieure du profil sont recouvertes d'une quantité de glace en raison du ruissellement de l'eau qui gèle dans les zones non chauffées. Par contre, la densité de la glace due au ruissellement diminue avec l'augmentation de l'hydrophobicité du revêtement. Ainsi pour le matériau superhydrophobe (HIREC 1450), il y a très peu de glace présente à la surface du profil et il y a moins de glace à la surface du Wearlon F1-Ice que du StaClean™. Rappelons que le Wearlon F1-Ice est légèrement plus hydrophobe que le StaClean™.

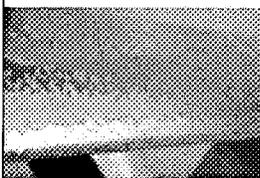
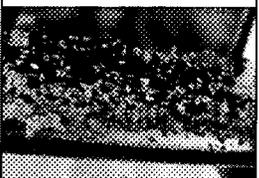
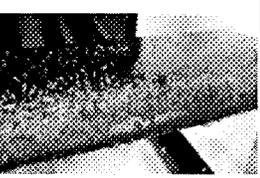
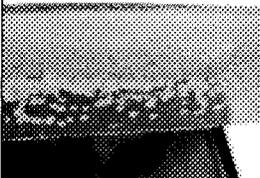
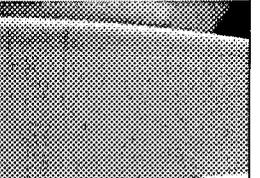
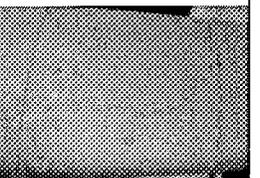
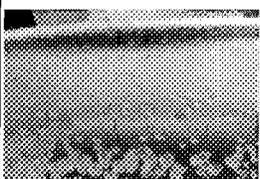
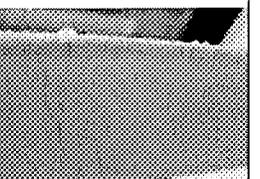
Type de glace	Sans revêtement	StaClean™	Wearlon F1-Ice	HIREC 1450
givre	Extrados	Extrados	Extrados	Extrados
				
givre	Intrados	Intrados	Intrados	Intrados
				
verglas	Extrados	Extrados	Extrados	Extrados
				
verglas	Intrados	Intrados	Intrados	Intrados
				

Figure 4.14 : Photos des revêtements à la fin des essais antigivre lorsque la puissance de dégivrage est égale à la puissance minimale de ruissellement (P_{seuil})

4.4.3. Essais à 50% de la puissance de ruissellement

L'objectif de cet essai est d'observer le comportement des revêtements lorsqu'on dégivre les pales avec une puissance inférieure à la puissance de ruissellement. L'étude de l'efficacité des trois revêtements et de la pale non revêtue s'est faite grâce aux valeurs caractéristiques des formes de glace (D , L et H). La Figure 4.15 montre les valeurs D et L des formes de glace pour les trois revêtements et la pale non revêtue. Les mots « *Top* » et « *Bottom* » renvoient respectivement à l'extrados et à l'intrados de la pale. La longueur L est la longueur de ruissellement avant solidification de la glace et D est la distance entre la fin de cette solidification et le bord de fuite de la pale. Ainsi comme le montre la Figure 4.15 pour tous les trois revêtements et aussi pour la pale non revêtue, la longueur de ruissellement avant solidification de la glace est comprise entre 1,6 et 2 cm dans la partie supérieure de la pale et entre 0,8 et 1 cm dans la partie inférieure. Il n'y a donc pratiquement pas de différence dans la répartition de la glace entre la pale non revêtue et celles revêtues. Le niveau de dégivrage doit être suffisant pour générer du ruissellement pour profiter de la caractéristique hydrophobe du revêtement et espérer une réduction de la puissance de dégivrage.

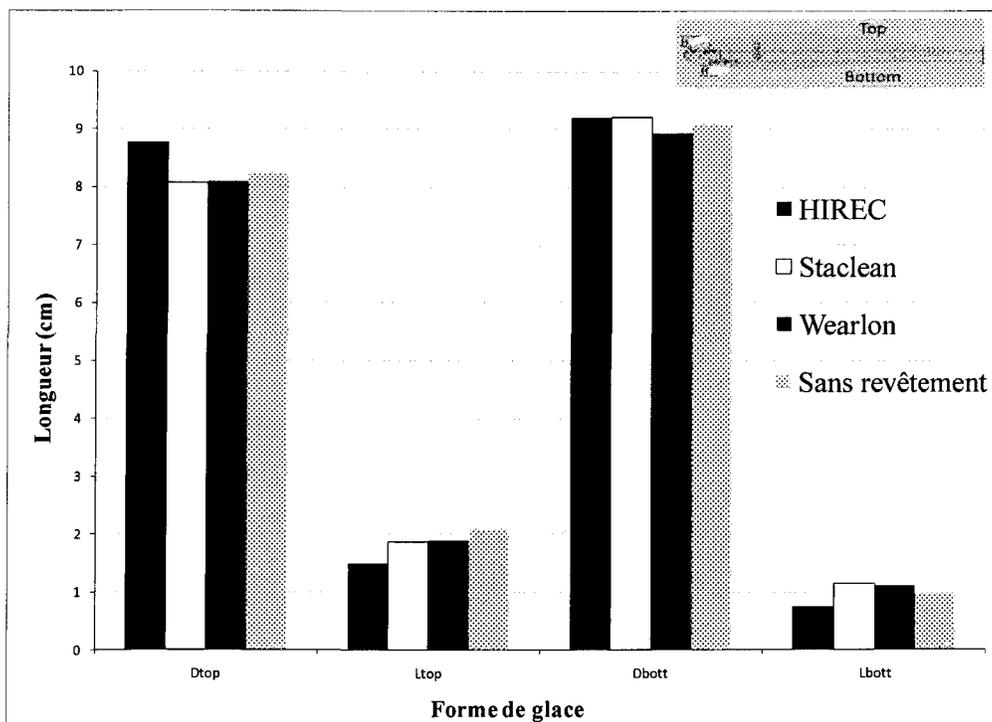


Figure 4.15 : Forme de glace lors du dégivrage à faible puissance

4.4.4. Effet du ruissellement

Dans la revue bibliographique, on avançait l'idée que l'un des avantages des revêtements hydrophobes pourrait être leur aptitude à améliorer le ruissellement dû au dégivrage thermique. En effet l'eau de ruissellement issue du chauffage de la pale ruissellerait beaucoup plus loin, améliorant ainsi l'aérodynamisme de la pale. Les revêtements ont été utilisés à la même puissance de ruissellement que la pale non revêtue ; une puissance suffisamment élevée pour occasionner du ruissellement sur toutes les surfaces. La Figure 4.16 donne un aperçu des résultats obtenus pour les valeurs caractéristiques des formes de glace (D, L et H), valeurs expliquées plus tôt dans la section précédente.

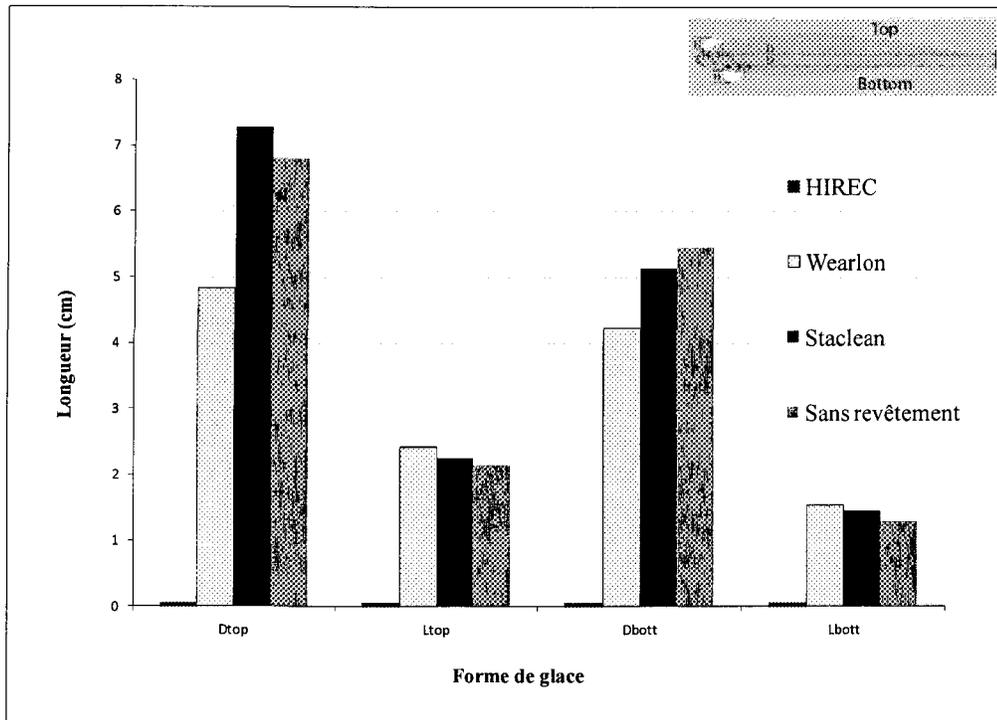


Figure 4.16 : Graphique montrant l'influence du revêtement sur les formes de glace en dégivrage

D'après la Figure 4.16 le revêtement superhydrophobe (HIREC) démontre très bien les gains encourus lorsque la surface du profil est recouverte, car pratiquement aucune glace n'est présente sur la surface du profil (L_{top} et L_{bott} sont pratiquement nulles). A l'intrados, la longueur D pour tous les deux revêtements hydrophobes est plus faible que celle de la pale sans revêtement. Le ruissellement à l'intrados sur ces revêtements s'est donc étalé plus loin du bord d'attaque que dans le cas de la pale sans revêtement. L'efficacité des revêtements est étudiée en comparant la distance R qui est la distance par rapport au bord d'attaque sur laquelle l'eau a ruisselé avant solidification. On pose :

$$R = C - (D + L) \quad (14)$$

Où C est la corde du profil et D et L , les valeurs caractéristiques de la forme de glace. Plus R sera grand, meilleur sera le ruissellement car R représente le refoulement de l'eau par rapport au bord d'attaque. Le **Tableau 4.14** présente les résultats des calculs pour le ruissellement.

Tableau 4.14 : Influence des revêtements sur le ruissellement

Revêtement	Ruissellement sur l'extrados R_{top} (cm)	Augmentation par rapport à la pale non revêtue (%)	Ruissellement sur l'intrados R_{bot} (cm)	Augmentation par rapport à la pale non revêtue (%)
HIREC 1450	10	733	10	194
Wearlon F1-Ice	2,9	141,7	4,4	29
StaClean™	0,66	-45 ^(*)	3,6	6
Sans revêtement	1,2	0	3,4	0

(*) : Ici on a plutôt une réduction du ruissellement comparée à la pale non revêtue.

Comme pressenti plus l'angle de contact du revêtement avec l'eau est élevé, meilleur est le ruissellement sur l'intrados et sur l'extrados, les valeurs de R étant plus élevées (Tableau 4.14). Le revêtement superhydrophobe (HIREC 1450) affiche le ruissellement le plus notable, que ce soit sur l'extrados ou sur l'intrados. Les matériaux hydrophobes améliorent quant à eux surtout le ruissellement sur l'intrados, jusqu'à 29% dans le cas du Wearlon F1-Ice. En général, une nette amélioration du ruissellement est observée sur l'intrados, quelque soit le type de revêtement.

4.5. Comportement des revêtements en mode de dégivrage

En mode dégivrage, les essais ont été effectués sur le revêtement hydrophobe ayant démontré les meilleurs comportements en mode antigivrage, sur le revêtement hydrophobe, sur la pale non revêtue et sur la pale revêtue de la pellicule plastique. Deux différentes façons de dégivrage ont été utilisées pour évaluer leur comportement en dégivrage. Durant la première série appelée « dégivrage de l'intrados », HE1 est maintenu chauffé continuellement permettant de garder le bord d'attaque de la pale libre de glace tout au long de l'essai. On laissait la glace s'accumuler pendant un certain temps (t_{off}) sur l'intrados et on activait le chauffage pour son élimination. Le temps (t_{on}) au bout duquel le morceau de glace décollait était noté et ce temps variait avec le type de surface. La seconde série d'essais intitulée « dégivrage du bord d'attaque » permettait de maintenir l'intrados de la pale libre de glace et le chauffage était activé lorsque la glace du bord d'attaque avait atteint une certaine épaisseur.

4.5.1. Description d'un essai-type en mode dégivrage

La procédure pré-essai ressemble à celle des essais en mode antigivrage. Ainsi avant chaque essai, la soufflerie est réfrigérée jusqu'à la température voulue avec la pale instrumentée montée dans la section d'essai. Une fois que la température cible est atteinte (et stable) dans la section d'essai, on débute le chauffage des deux côtés latéraux de la pale. On ajuste les paramètres de la puissance de dégivrage (tension et courant) aux valeurs désirées et on programme le cycle de dégivrage. Durant tout le cycle de dégivrage, les pales sont soumises à la précipitation. Le cycle de dégivrage se compose d'une durée t_{off} pendant

laquelle la glace se forme, et d'un temps t_{on} durant lequel les éléments chauffants sont activés jusqu'à ce que le morceau de glace se détache. Le cycle de dégivrage est relié au système de contrôle du chauffage (décrit dans la section 3.6). En mode dégivrage, les deux éléments chauffants sont contrôlés séparément. Lors des essais en mode dégivrage, la source de courant était réglée manuellement. L'enregistrement des données de température se faisait sur une clé USB et les données étaient ensuite transférées sur un ordinateur. Une limite maximale de température pouvant être atteinte par les éléments chauffants a été programmée dans l'enregistreur et dès que cette température maximale est atteinte, l'enregistreur désactive le chauffage des éléments chauffants. C'est une sécurité pour ne pas détruire le revêtement des pales. La Figure 4.17 et la Figure 4.18 sont des exemples de fichiers de températures lors d'un essai en mode dégivrage. La Figure 4.17 montre l'essai en entier, alors que la Figure 4.18 présente deux cycles de dégivrage.

L'enregistrement des températures débute avec le début du préchauffage de la pale. Lors du préchauffage qui dure 12 minutes, toutes les températures augmentent rapidement et ensuite restent constantes jusqu'à l'envoi des précipitations givrantes. Ces précipitations durent pendant un temps t_{off} au cours duquel la glace se forme. Ensuite pendant un temps t_{on} les éléments chauffants sont activés jusqu'à ce que le morceau de glace se détache. Ensuite un nouveau cycle débute avec l'envoi des précipitations pendant un temps t_{off} , suivi d'un temps t_{on} pendant laquelle la glace est expulsée, et le cycle recommence.

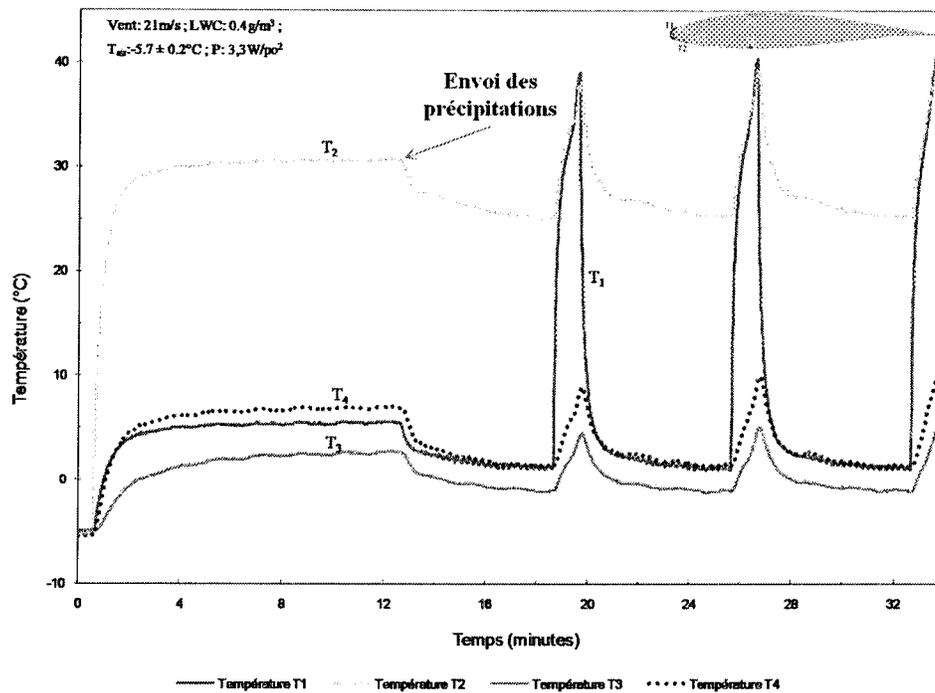


Figure 4.17 : Exemple de fichier des températures internes en fonction du temps lors d'un essai de dégivrage

Les températures T1 et T2 étant les températures lues par les thermocouples des deux éléments chauffants, ces températures sont les plus élevées. La température, lue par le thermocouple situé au niveau de l'élément qui reste activé durant tout l'essai, est la plus élevée. Les pics pour les températures T1, T2, T3 et T4 sont atteints dès que la glace formée est expulsée de la pale. La Figure 4.18 montre un exemple de deux cycles successifs.

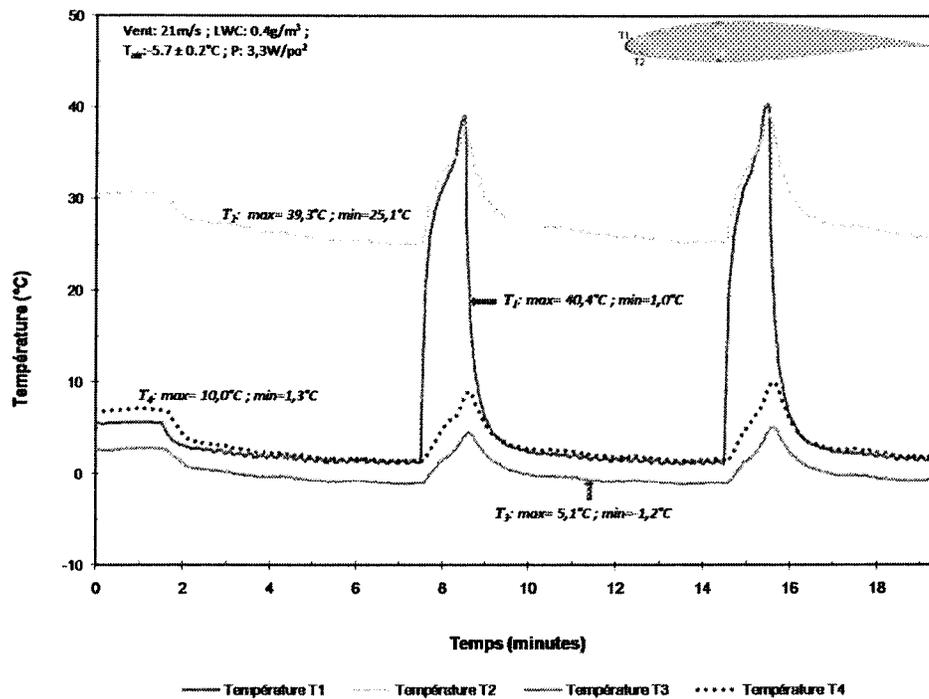


Figure 4.18 : Vue agrandie des températures internes en fonction du temps sur deux cycles de dégivrage

4.5.2. Dégivrage de l'intrados

Lors de ce type de dégivrage, comme spécifié plus tôt dans ce document, HE1 est maintenu chauffé continuellement permettant de garder le bord d'attaque de la pale libre de glace tout au long de l'essai. La Figure 4.19 présente un aperçu du circuit électrique utilisé. La minuterie permet de lancer ou d'arrêter l'interrupteur du circuit cyclique (circuit 1) alors que le circuit 2 fonctionne sans minuterie car l'élément 1 reste activé durant tout l'essai.

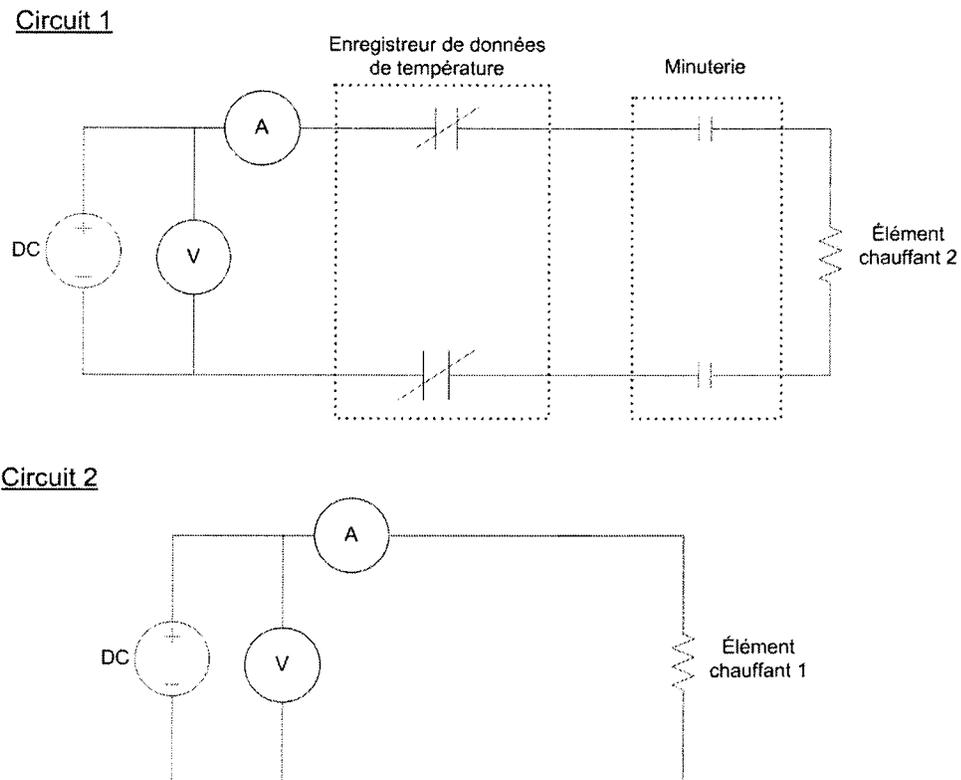


Figure 4.19 : Circuits électriques montrant le chauffage des éléments chauffants 1 et 2 lors du dégivrage de l'intrados

La glace s'accumule pendant un certain temps (t_{off}) sur l'intrados, ensuite le chauffage est activé pour l'enlever. Le temps (t_{on}) au bout duquel le morceau de glace décollait était noté et ce temps variait avec le type de surface. La puissance surfacique est donnée par l'équation (15) où P_1 et P_2 sont les puissances consommées respectivement par l'élément chauffant 1 et l'élément chauffant 2. L'épaisseur de glace expulsée est de 2 mm.

$$P_{surf} = P_1 + P_2 \left(\frac{t_{on}}{t_{off} + t_{on}} \right) \quad (15)$$

Les essais ont été effectués sur différentes surfaces à savoir :

- la pale en aluminium non recouverte
- la pale en aluminium recouverte de la pellicule plastique
- la pale en aluminium recouverte de la pellicule plastique et d'une couche du

revêtement superhydrophobe (HIREC 1450).

Les essais ont été effectués à une température de -20°C et pour deux vitesses différentes (21 et 33 m/s) et sont présentés en détail à l'**annexe C.3.1**. Le but des ces essais est de comparer les différentes surfaces à puissance de dégivrage égale. Cette comparaison se fait par l'analyse des courbes des températures internes. Rappelons que c'est le chauffage de l'élément chauffant 2 qui est cyclique alors que l'élément 1 est gardé ouvert durant tout le cycle. Les résultats des essais pour la vitesse de 21m/s sont présentés au Tableau 4.15.

Tableau 4.15 : Liste des essais effectués en mode dégivrage de l'intrados à faible vitesse

Surface	Condition			Puissances (W)		Temps (s)		P_{surf} (W/po ²)
	Vitesse (m/s)	T_{air} (°C)	LWC (g/m ³)	P1	P2	t_{on}	t_{off}	
Aluminium	21	-20	0,4	88,6	99	45	540	9,6
Aluminium + pellicule plastique	21	-20	0,4	88,5	99	45	540	9,6
Aluminium + pellicule plastique +HIREC	21	-20	0,4	90	100	45	540	9,77

Les courbes de températures, découlant des essais présentés au tableau précédent sont présentées à la Figure 4.20 et à la Figure 4.21. La Figure 4.22, quand elle montre les images des pales à la fin des essais. La puissance de dégivrage est d'environ $9,6 \text{ W/po}^2$ avec un temps t_{off} de 9 minutes. Ce temps était suffisant pour qu'une bonne épaisseur de glace se forme. Les essais à 33 m/s sont présentés un peu plus loin dans le document (Tableau 4.16 et Tableau 4.17). La Figure 4.20 montre les températures T1 (prise aux alentours de l'élément chauffant 1) et T3 en fonction du temps.

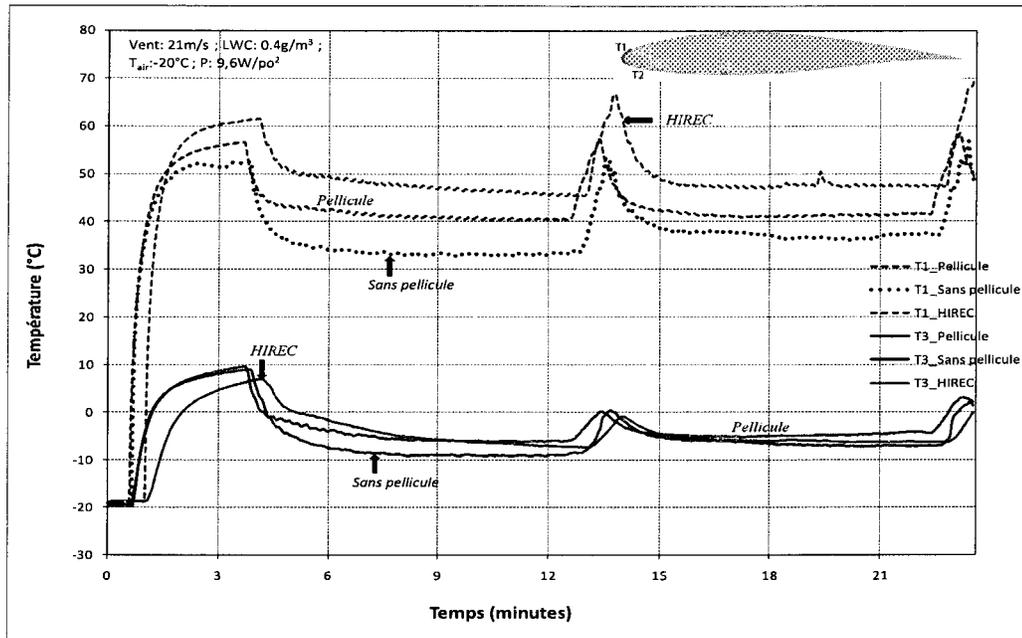


Figure 4.20 : Comparaison à puissance égale: graphes des températures T1 et T3 en fonction du temps

Dans tous les cas, la température T3 est plus faible que la température T1, car le thermocouple 3 est plus loin de l'élément chauffant 1. La température T1 de la pale revêtue de pellicule est plus élevée que celle de la pale non revêtue de pellicule. Mais c'est le

HIREC qui a la valeur la plus élevée lors de l'essai. Cette différence serait probablement due au fait que la pale revêtue du HIREC serait plus isolée thermiquement que les deux autres. En effet la pale revêtue du HIREC est constituée à la surface de pellicule, en dessous du revêtement. La pale revêtue de la pellicule serait donc logiquement aussi plus isolante que la pale sans pellicule plastique et sans revêtement. D'où sa température T1 plus élevée que celle de la pale sans pellicule.

La Figure 4.21 montre les courbes des températures T2 (prise aux alentours de l'élément chauffant 2) et T4 en fonction du temps.

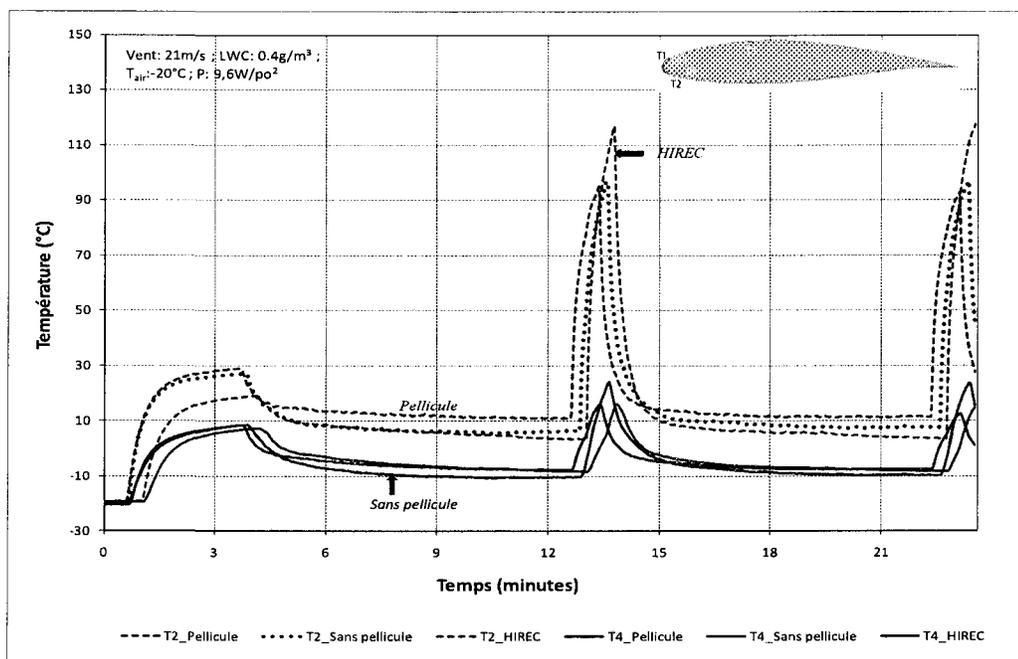


Figure 4.21 : Comparaison à puissance égale : graphes des températures T2 et T4 en fonction du temps

Les températures T2 et T4 des trois surfaces ont des moyennes presque égales. Il n'y a que les pics qui sont différents. Pour les températures T2, c'est le HIREC qui a le pic

de température le plus élevé. Cela peut être dû au fait que la glace de la pale revêtue du HIREC décollait avant les 45 secondes durant lesquelles l'élément 2 restait activé. Dans le cas des températures T4 c'est la pale sans pellicule plastique qui a le pic le plus élevé. Ceci peut-être dû au fait que l'aluminium sans aucune autre couche de revêtement est plus conducteur.

Les images de l'intrados et de l'extrados des pales à la fin des essais sont présentées à la Figure 4.22.

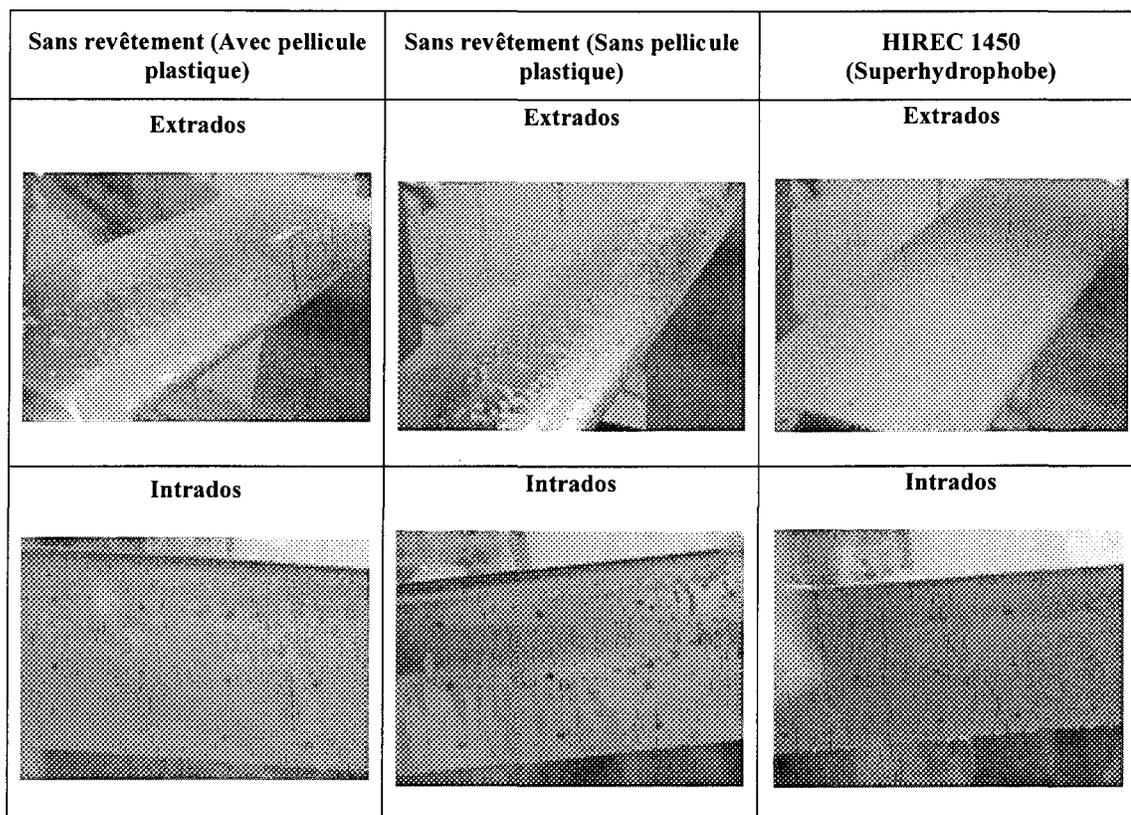


Figure 4.22 : Comparaison à puissance égale : images des pales à la fin de deux cycles de dégivrage

On remarque sur la Figure 4.22 qu'il y a moins de glace sur l'intrados de la pale recouverte du HIREC que sur celui des deux autres. Sur l'extrados, la glace est refoulée plus loin du bord d'attaque dans le cas du HIREC.

Les tableaux 4.16 et 4.17 présentent les résultats obtenus à forte vitesse en utilisant le modèle du dégivrage de l'intrados. Les puissances seuil (P_{seuil}) pour dégivrer chaque surface ont été répertoriées au tableau 4.17. On ne remarque pas une nette différence entre P_{seuil} de la pale de surface superhydrophobe et les pales non hydrophobes pour une même condition climatique. Visuellement on a remarqué que le revêtement superhydrophobe avait un comportement moins bon que la pale non revêtue. Ceci peut être dû au fait que l'épaisseur de glace accumulée sur l'intrados avant l'expulsion n'était pas assez grande pour que la différence entre les puissances de dégivrage P_{seuil} soit intéressante, ou que la partie couverte par l'élément 1 est trop grande, ce qui nécessite une plus grande puissance.

Tableau 4.16 : Liste des essais effectués en mode dégivrage de l'intrados à forte vitesse

Surface	Condition			Puissances (W)		Temps (s)		P_{surf} (W/po ²)
	Vitesse (m/s)	T _{air} (°C)	LWC (g/m ³)	P1	P2	t _{on}	t _{off}	
Aluminium + Pellicule plastique	33	-20	0,4	103	115	45	540	11,2
HIREC	33	-20	0,4	105	116	45	540	11,4
Pellicule plastique	33	-20	0,4	105	116	20	540	10,9
Aucun	33	-20	0,4	105	116	20	540	10,9

Tableau 4.17 : Résumé des puissances seuil de « dégivrage »

Surface	Conditions climatiques			$P_{\text{seuil}} \text{ (W/po}^2\text{)}$
	U (m/s)	$T_{\text{air}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	LWC (g/m ³)	
Sans revêtement (Avec pellicule plastique)	21	-20	0,4	9,3
Sans revêtement (Sans pellicule plastique)	21	-20	0,4	9,2
HIREC 1450 (Superhydrophobe)	21	-20	0,4	9,4
Sans revêtement (Avec pellicule plastique)	33	-20	0,4	11,2
HIREC 1450 (Superhydrophobe)	33	-20	0,4	11,4

4.5.3. Dégivrage du bord d'attaque

Les essais pour ce mode de dégivrage ont été effectués pour les deux types de glace, à savoir le givre et le verglas. Les essais ont été faits avec le meilleur revêtement hydrophobe, le revêtement superhydrophobe et la pale non revêtue (elle est recouverte quand même de la pellicule plastique à cause des raisons déjà présentées dans la section 4.2). La Figure 4.23 présente un aperçu du circuit électrique utilisé.

La puissance seuil de dégivrage (puissance minimale suffisante pour causer le dégivrage de chacune des surfaces sélectionnées) a été déterminée pour chacune des surfaces retenues et ceci pour chaque type de glace. Les résultats sont présentés au Tableau 4.18. La puissance surfacique dans ce cas-ci est donnée par l'équation 16:

$$P_{surf} = P_2 + P_1 \left(\frac{t_{on}}{t_{off} + t_{on}} \right) \quad (16)$$

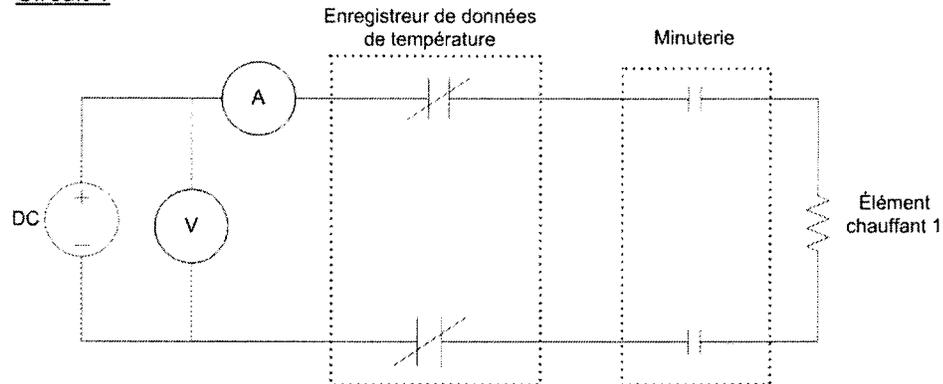
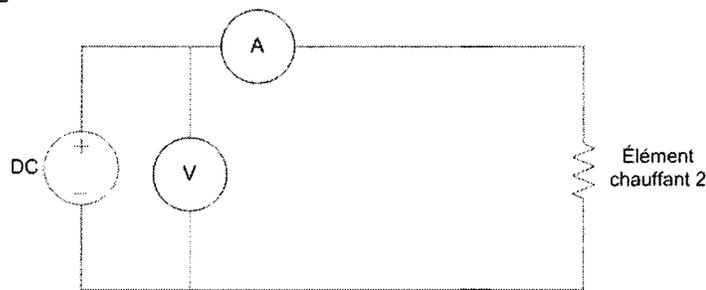
Circuit 1Circuit 2

Figure 4.23 : Circuits électriques montrant le chauffage des éléments chauffants 1 et 2 lors du dégivrage du bord d'attaque

Le tableau 4.18 montre que les revêtements ont permis une bonne réduction de la puissance minimale de dégivrage. En régime sec (givre), les revêtements ont permis une réduction moyenne de 9% de la puissance de dégivrage. En régime humide (verglas), le revêtement hydrophobe a permis une réduction de la puissance de 8% alors que le revêtement superhydrophobe a permis de réduire 2 fois plus, soit 15%.

Tableau 4.18 : Tableau comparatif des puissances minimales de dégivrage

Type de glace	Conditions climatiques			Revêtement	P _{seuil} (W/po ²)	Réduction de la puissance seuil par rapport à la pale non revêtue (%)
	U (m/s)	T _{air} (°C)	LWC (g/m ³)			
verglas	21	-5	0,4	Pellicule plastique	3,9	0
	21	-5	0,4	HIREC (revêtement superhydrophobe)	3,3	15
	21	-5	0,4	Wearlon (revêtement hydrophobe)	3,6	8
givre	21	-20	0,4	Pellicule plastique	9,4	0
	21	-20	0,4	HIREC (revêtement superhydrophobe)	8,7	8
	21	-20	0,4	Wearlon (revêtement hydrophobe)	8,5	10

Le comportement des températures internes T1, T2, T3 et T4 a aussi été étudié lors de ces essais. Il s'en est suivi une comparaison des résultats obtenus. La Figure 4.24 et la Figure 4.25 présentent l'évolution des températures internes en fonction du temps pour le régime humide alors que la Figure 4.26 et la Figure 4.27 présentent la comparaison de l'évolution des températures lors du dégivrage en régime sec.

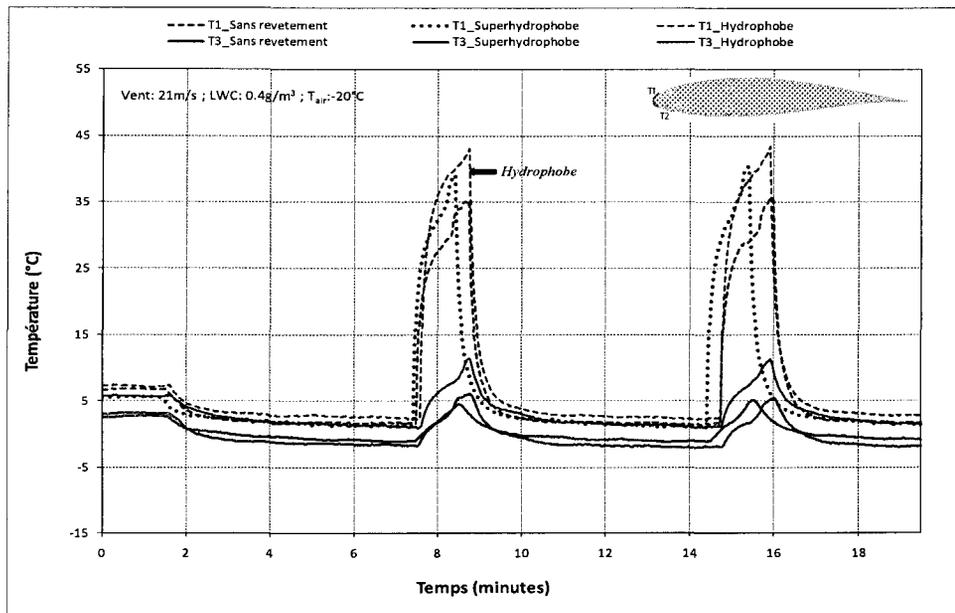


Figure 4.24 : Régime humide : graphes de T₁ et T₃ en fonction du temps lors du dégivrage à puissance

seuil pour chacune des surfaces

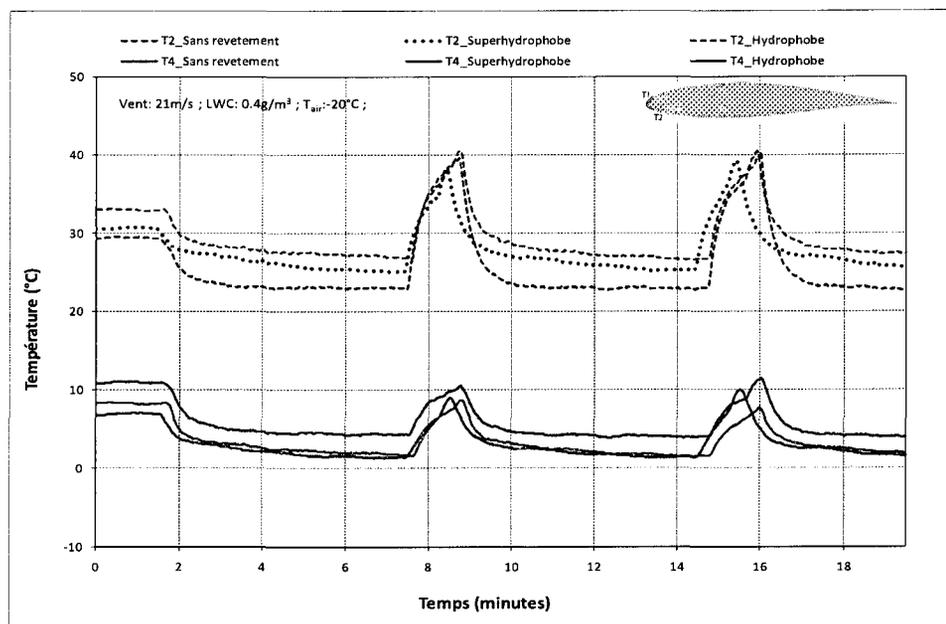


Figure 4.25 : Régime humide : graphes de T₂ et T₄ en fonction du temps lors du dégivrage à puissance

seuil pour chacune des surfaces

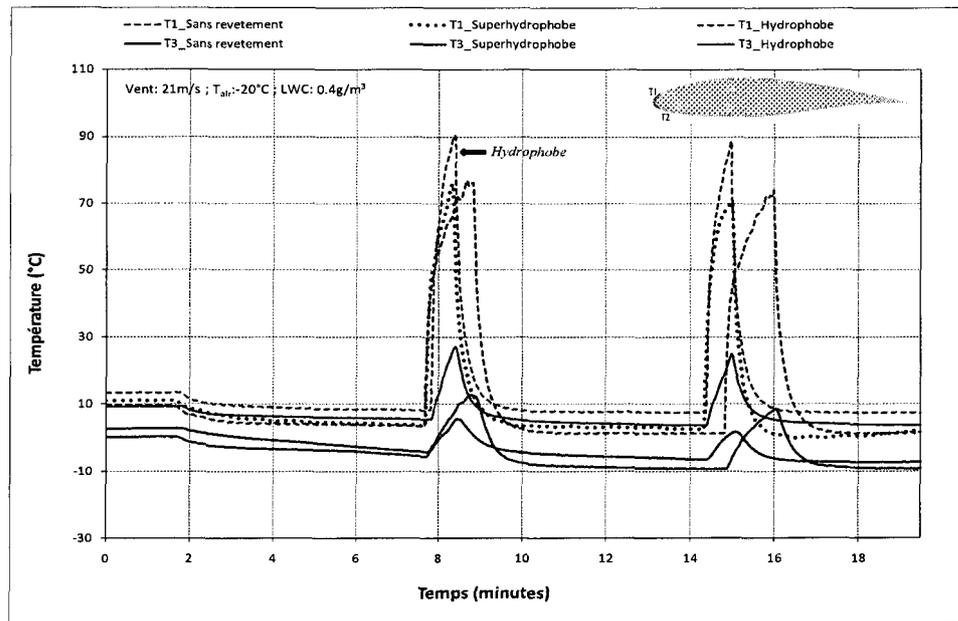


Figure 4.26 : Régime sec : graphes de T_1 et T_3 en fonction du temps lors du dégivrage à puissance seuil pour chacune des surfaces

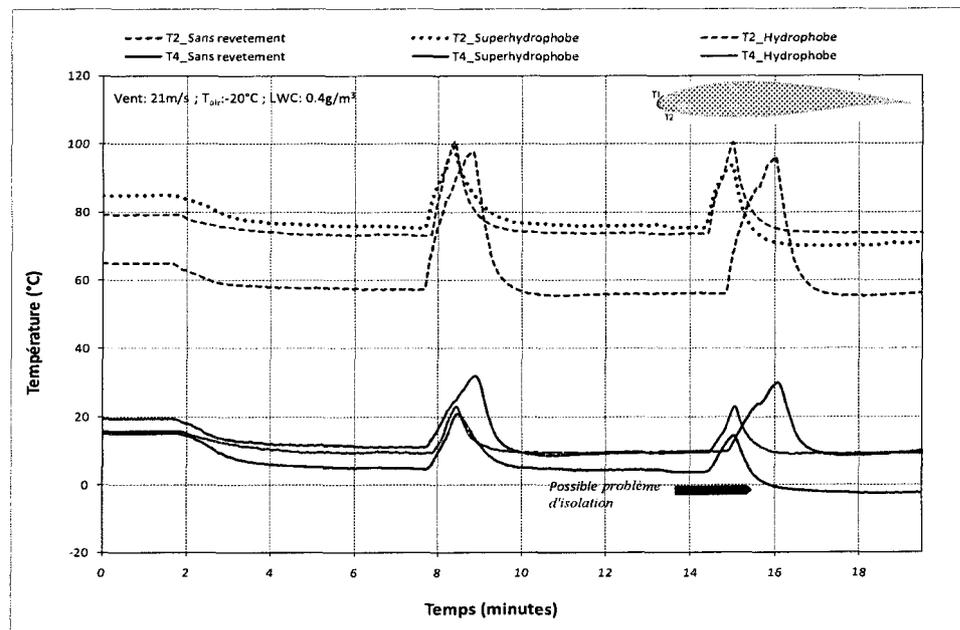


Figure 4.27 : Régime sec : graphes de T_2 et T_4 en fonction du temps lors du dégivrage à puissance seuil pour chacune des surfaces

La Figure 4.24 et la Figure 4.25 montrent que pour le verglas, les courbes des températures internes sont quasi identiques pour toutes les surfaces. Le ruissellement de l'eau sur les surfaces ne dépendrait donc pas de l'hydrophobicité de la surface mais dépendrait plutôt de la température de surface. Pour le givre, la Figure 4.26 et la Figure 4.27 amènent à la même conclusion. Néanmoins pour le givre, la nature isolante des revêtements conduit à des températures internes aux alentours de l'élément chauffant 2 (qui reste continuellement activé) plus élevées.

Les images des surfaces à la fin du dégivrage (Figure 4.28 et Figure 4.29) montrent que le revêtement superhydrophobe (HIREC) est meilleur en ce qui concerne la glace accumulée et le ruissellement au niveau de l'intrados. En effet l'accumulation de givre ou de verglas est beaucoup moindre sur la pale revêtue de HIREC que sur celle recouverte de Wearlon F1-Ice ou sur celle sans revêtement. De plus l'eau est refoulée plus loin du bord d'attaque dans le cas du HIREC comparativement aux deux autres.

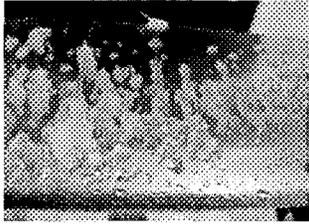
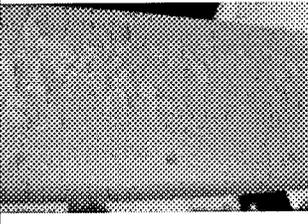
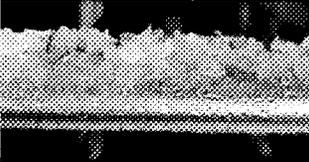
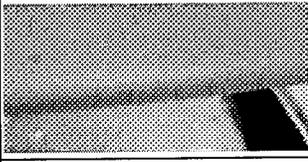
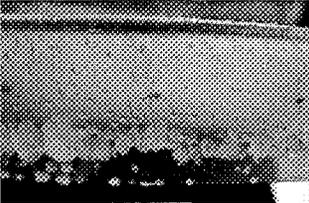
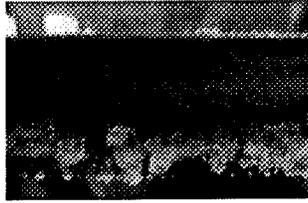
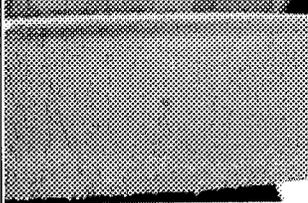
Régime d'accrétion et type de glace	Sans revêtement	Wearlon F1-Ice	HIREC 1450
Humide (verglas)	Extradors 	Extradors 	Extradors 
	Bord d'attaque 	Bord d'attaque 	Bord d'attaque 
	Intrados 	Intrados 	Intrados 

Figure 4.28 : Images des surfaces à la fin de deux cycles de dégivrage pour le régime humide

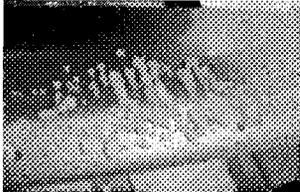
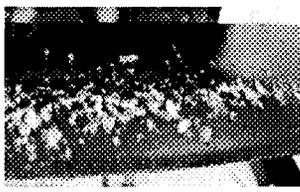
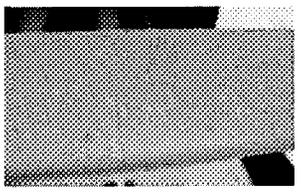
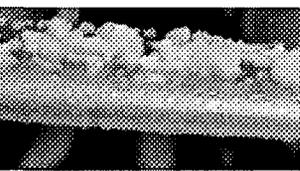
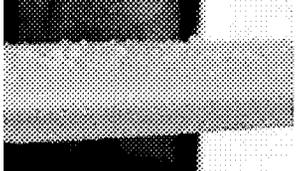
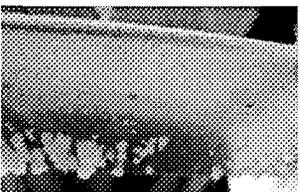
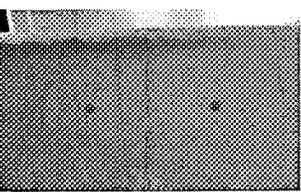
Régime d'accrétion et type de glace	Sans revêtement	Wearlon F1-Ice	HIREC 1450
Sec (givre)	Extrados 	Extrados 	Extrados 
	Bord d'attaque 	Bord d'attaque 	Bord d'attaque 
	Intrados 	Intrados 	Intrados 

Figure 4.29 : Images des surfaces à la fin de deux cycles de dégivrage pour le régime sec

4.6. Reproductibilité et répétitivité des essais

4.6.1. Théorie

4.6.1.1. Reproductibilité

La reproductibilité est l'étroitesse de l'accord entre les résultats obtenus pour une même mesure effectuée en faisant varier les conditions de mesure. Pour qu'une expression de la reproductibilité soit valable, il est nécessaire de spécifier les conditions que l'on fait varier. Celles-ci peuvent comprendre : le principe de mesure, la méthode de mesure, l'observateur, l'instrument de mesure, l'étalon de référence, le lieu, les conditions d'utilisation et le temps. La reproductibilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats. La reproductibilité des essais est vérifiée en comparant les essais effectués en novembre 2009 et en juin 2010.

4.6.1.2. Répétitivité

La répétitivité est l'étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs d'une même mesure effectuée dans la totalité des mêmes conditions de mesure (même méthode de mesure, - même observateur, - même instrument de mesure, - même lieu, - mêmes conditions d'utilisation, - répétition sur une courte période de temps). La répétitivité peut s'exprimer quantitativement par une caractéristique de dispersion des résultats. Cela caractérise donc la capacité d'un instrument de mesure à reproduire la même valeur de sortie lorsque la valeur de la grandeur mesurée et la procédure de mesure restent constantes. La répétitivité des essais est vérifiée en comparant les essais effectués en juillet 2010.

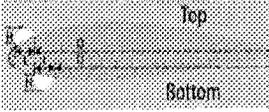
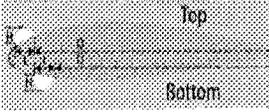
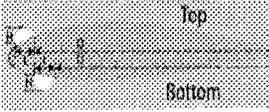
4.6.2. Reproductibilité : résultats pour les essais sans dégivrage

Les essais effectués dans cette section ont pour but de voir s'il y a une reproductibilité des essais. La condition qui varie est le mois d'expérimentation. Le Tableau 4.19 présente les conditions expérimentales utilisées pour quantifier la reproductibilité et le Tableau 4.20 donne le résumé des résultats obtenus sur la mesure caractérisant la forme de la glace. Le temps d'accumulation de la glace est de 6 minutes pour tous les essais.

Tableau 4.19 : Résumé des conditions de reproductibilité

Série d'essais	Nom	N° d'essai	Conditions climatiques			Mois d'expérimentation	Revêtement
			Vitesse (m/s)	T _{air} (°C)	LWC (g/m ³)		
Série 1	Essai 1	50	21	-20	0,4	Novembre 2009	HIREC
	Essai 2	138	21	-20	0,4	Juin 2010	HIREC
Série 2	Essai 1	89	33	-20	0,4	Décembre 2009	HIREC
	Essai 2	141	33	-20	0,4	Juin 2010	HIREC

Tableau 4.20 : Résultats

Série d'essais	Nom	Formes de glace (extrados)			Formes de glace (intrados)			
		D (cm)	L (cm)	H (cm)	D (cm)	L (cm)	H (cm)	
Série 1	Essai 1	8,316	2,166	0,112	8,437	0,838	0,122	
	Essai 2	8,300	1,824	0,120	8,324	1,316	0,130	
Série 2	Essai 1	7,444	2,766	0,365	8,535	1,494	0,352	
	Essai 2	7,960	2,232	0,100	8,200	1,300	0,100	

L'erreur commise varie entre $\pm 0.1\%$ à $\pm 22\%$ sur la position (D) et la longueur (L) de la glace recouvrant le profil en comparant les essais 1 et 2 quelque soit la vitesse de l'essai. Par contre pour la hauteur de la glace (H), l'erreur est de moins de $\pm 4\%$ pour la vitesse de 21 m/s et de $\pm 57\%$ pour la vitesse de 33 m/s. L'erreur est relativement élevée, par contre la valeur à mesurer est faible et difficilement mesurable. Il pourrait s'agir d'une erreur de l'opérateur.

La comparaison visuelle entre les essais 1 et 2 de la série 2 telle que présentée à la Figure 4.30 ne montre pas de différence majeure entre la glace observée pour l'essai 1 et celle observée pour l'essai.

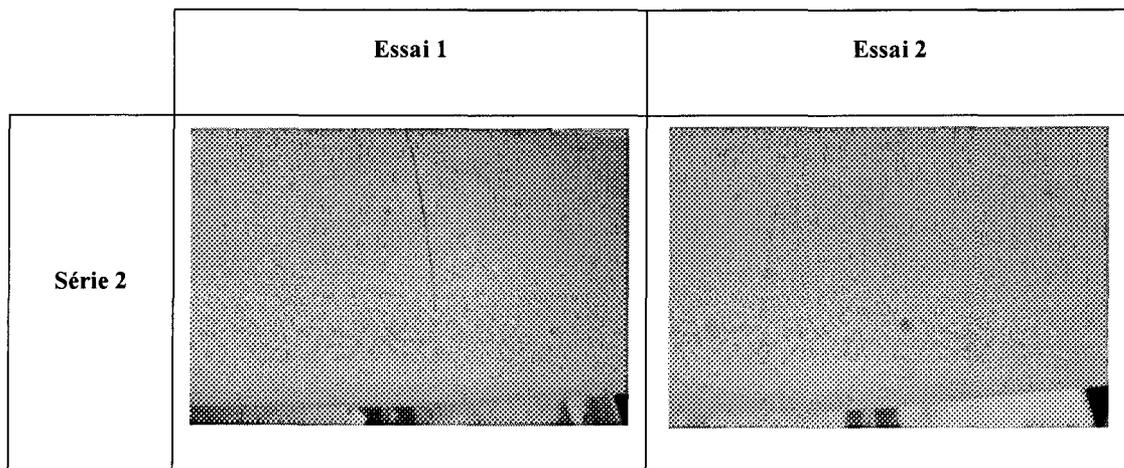


Figure 4.30 : Comparaison visuelle de la glace pour les deux essais de la série 2

En résumé, les essais effectués sans dégivrage de la pale ont permis de conclure à une certaine reproductibilité des essais avec une erreur relative de moins de $\pm 22\%$. Cette erreur se situe dans la partie haute de l'erreur pour ce genre d'essai qui se situe entre ± 10 à $\pm 20\%$.

4.6.3. Répétabilité : résultats pour la stratégie antigivrage de la pale

Deux séries d'essais (série 3 et 4) ont été réalisés comportant chacune trois essais (essai 1, essai 2 et essai 3) à -20°C . La première série a été réalisée à une vitesse de vent de 21 m/s alors que la seconde a été effectuée à 33 m/s. Les conditions des essais sont présentées au Tableau 4.21.

Tableau 4.21 : Résumé des conditions de répétabilité

Série d'essais	Nom	Essai n°	Conditions climatiques			Revêtement	Puissance de dégivrage
			Vitesse (m/s)	T _{air} (°C)	LWC (g/m ³)		
Série 3	Essai 1	54	21	-20	0,4	HIREC	100
	Essai 2	139					
	Essai 3	142					
Série 4	Essai 1	92	33	-20	0,4	HIREC	120
	Essai 2	140					
	Essai 3	143					

Les figures (Figure 4.31 à Figure 4.34) montrent les résultats obtenus pour les deux séries d'essais, en ce qui concerne les températures internes.

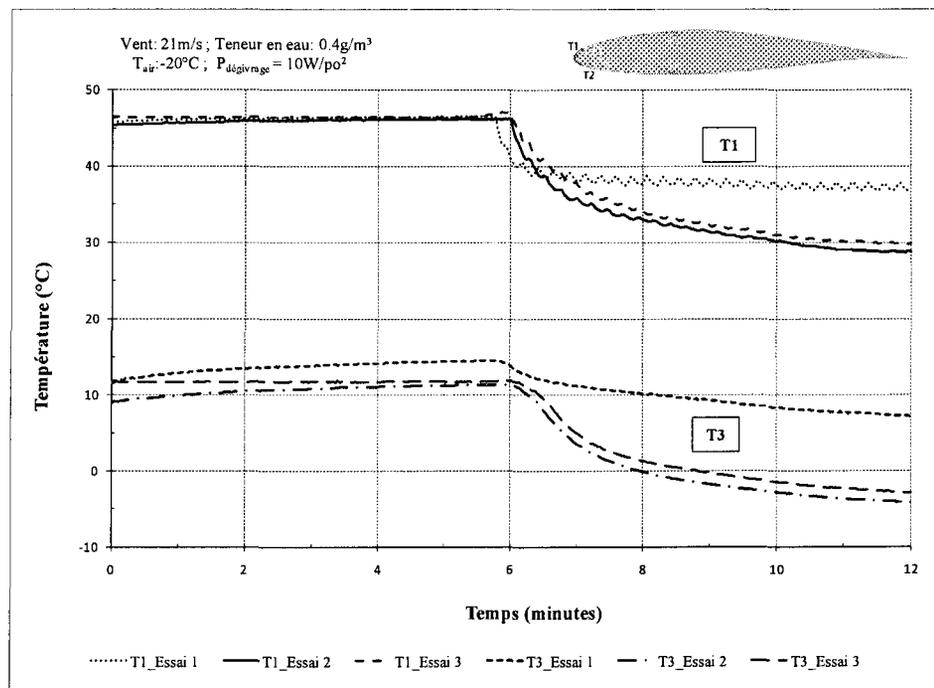


Figure 4.31 : Graphes montrant T1 et T3 en fonction du temps pour les essais de la série 3

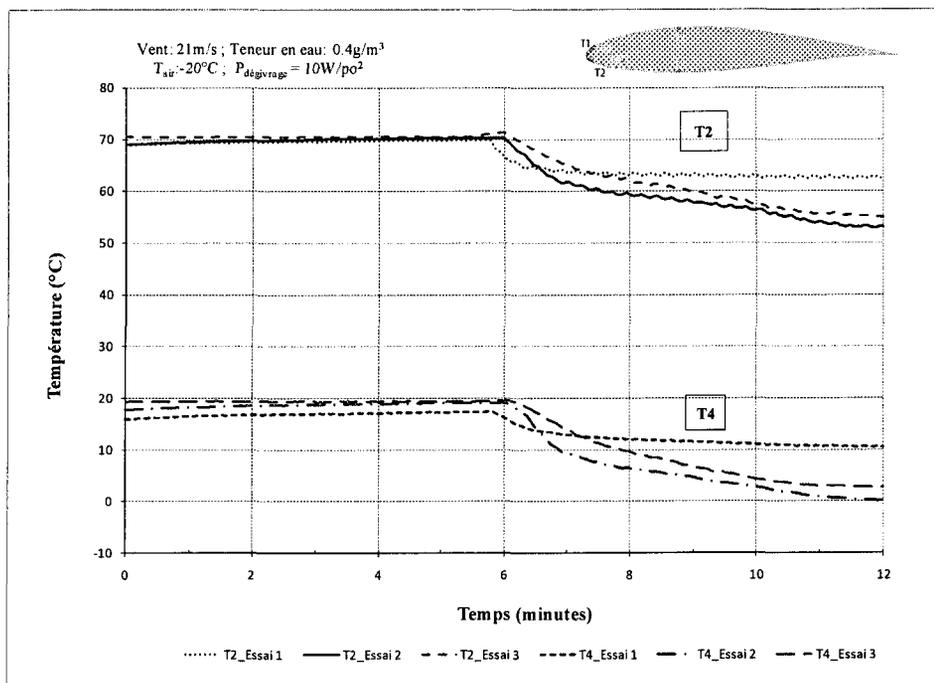


Figure 4.32 : Graphes montrant T2 et T4 en fonction du temps pour les essais de la série 3

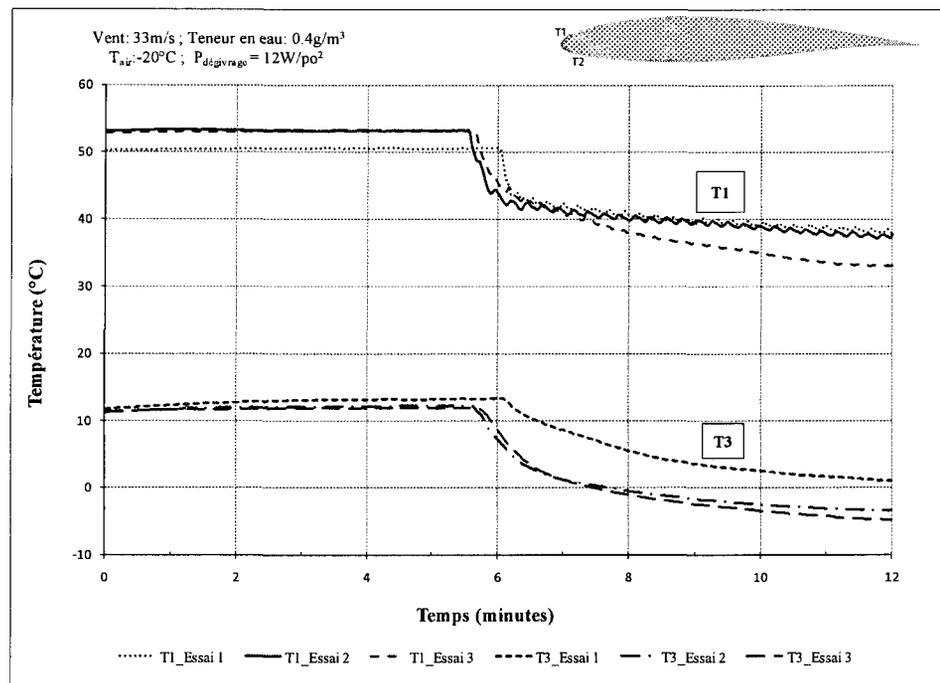


Figure 4.33 : Graphes montrant T1 et T3 en fonction du temps pour les essais de la série 4

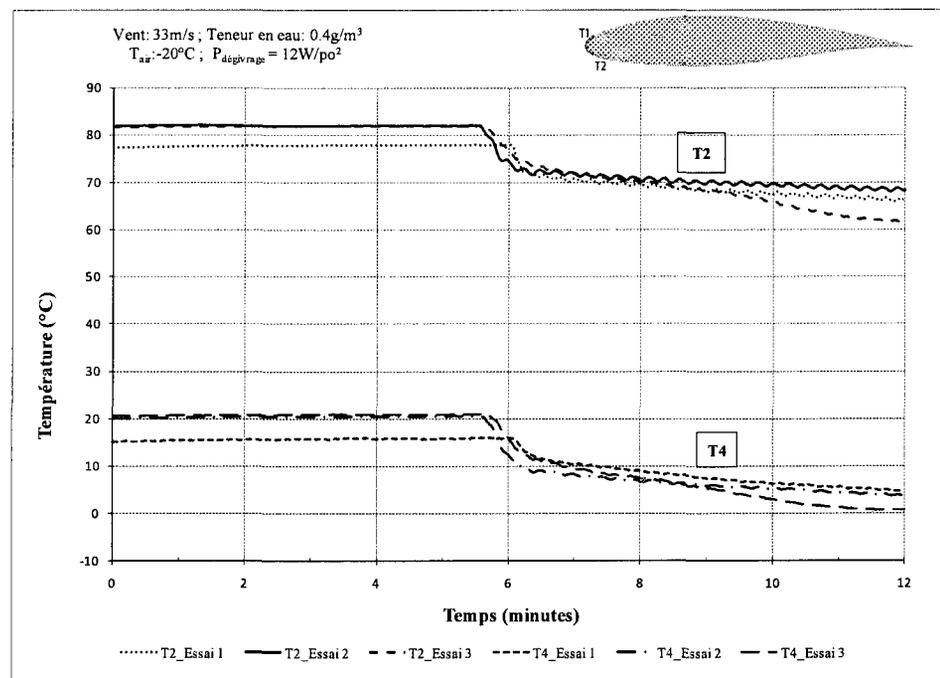


Figure 4.34 : Graphes montrant T2 et T4 en fonction du temps pour les essais de la série 4

Pour toutes les deux séries 3 et 4, on remarque que pour tous les essais, les températures maximales atteintes au niveau des éléments chauffants HE1 et HE2 (il s'agit des températures T1 et T2) sont sensiblement pareilles pour les 3 essais indépendamment de la série d'essai avec un écart de 4°C, ainsi que pour les températures mesurées au tiers de la corde à partir du bord d'attaque, les températures T3 et T4. La chute de température enregistrée au début de la précipitation est plus prononcée lors des deux derniers essais qui ont eu lieu en juin 2010. Cette chute plus prononcée est peut-être due à la qualité de l'isolation des éléments chauffants de la section de la pale car l'étalonnage de la teneur en eau effectué en novembre 2009 et en juin 2010 a permis de conserver celle-ci. On exclut donc l'effet potentiel d'une teneur en eau qui serait différente entre novembre 2009 et juin 2010. Cette variation de la température a affecté les formes de glace rendant du coup une affirmation de reproductibilité des essais discutables et pouvant expliquer le pourcentage d'erreur élevée sur la mesure de la hauteur de la glace. Néanmoins, les essais sont répétitifs car les deux essais de juillet 2010 (essais 2 et 3) ont des profils de température et des formes de glace assez similaires.

Les différences de formes de glace observées entre les essais 1 et 2 (ou 3) (Figure 4.35) peuvent être dues à la dégradation du revêtement; dégradation due aux cycles de dégivrage successifs.

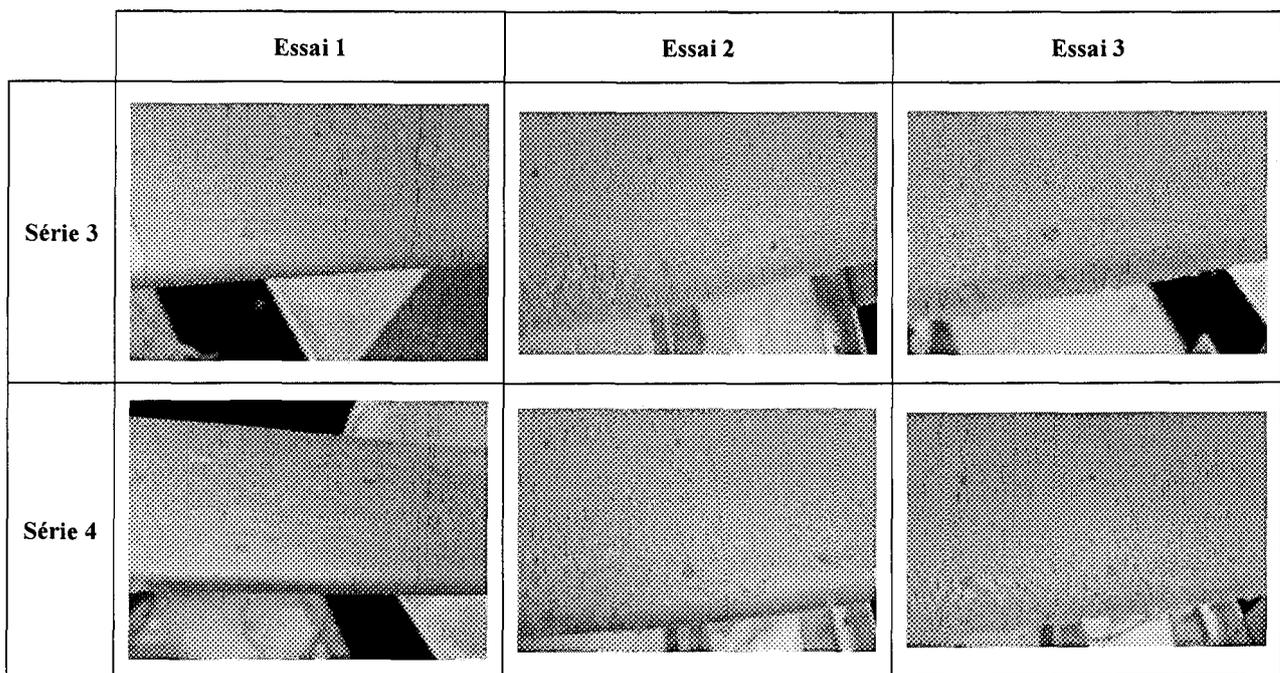


Figure 4.35 : Comparaison visuelle des essais des séries 3 et 4

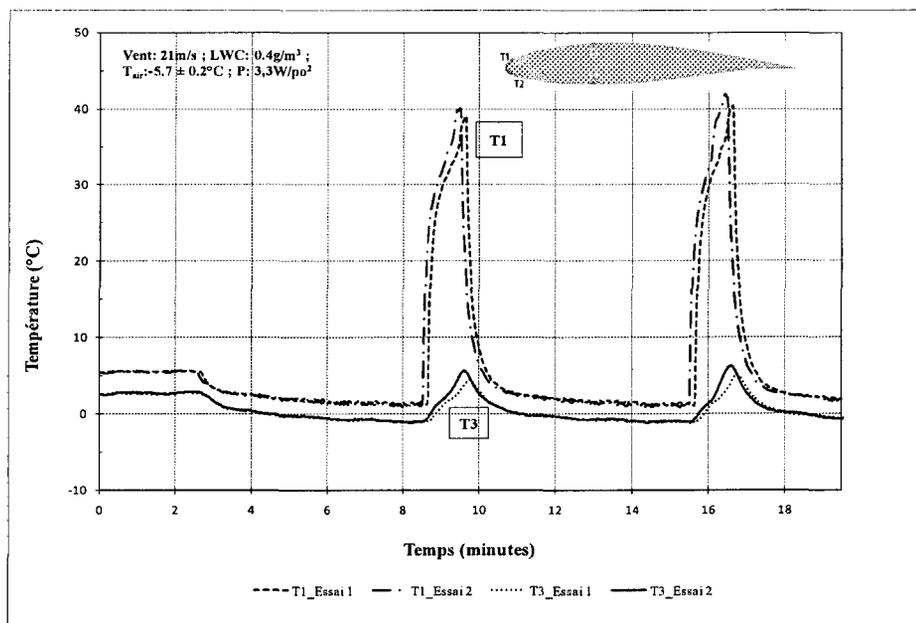
4.6.4. Répétabilité : résultats pour la stratégie dégivrage (« de-icing ») de la pale

La répétabilité des essais a été vérifiée aussi grâce à deux séries d'essais en mode dégivrage (série 5 et 6). Les essais ont été réalisés sur la pale recouverte du revêtement HIREC 1450 pour le verglas (série 5) et le givre (série 6). Les conditions des essais sont présentées au Tableau 4.22 alors que ceux-ci sont présentés plus en détail à la section C.3.2 de l'annexe C.

Tableau 4.22 : Résumé des conditions de répétabilité

Série d'essais	Essai n°	Conditions climatiques			Revêtement	Puissance de dégivrage
		Vitesse (m/s)	T _{air} (°C)	LWC (g/m ³)		
Série 5	155	21	-5	0,4	HIREC	3,3W/po ²
	156					
Série 6	148	21	-20	0,4	HIREC	8,7W/po ²
	150					

Les figures (Figure 4.36 à Figure 4.39) montrent les courbes de températures obtenues lors des essais pour les deux séries d'essais.

Figure 4.36 : Graphes montrant T₁ et T₃ en fonction du temps pour les essais de la série 5

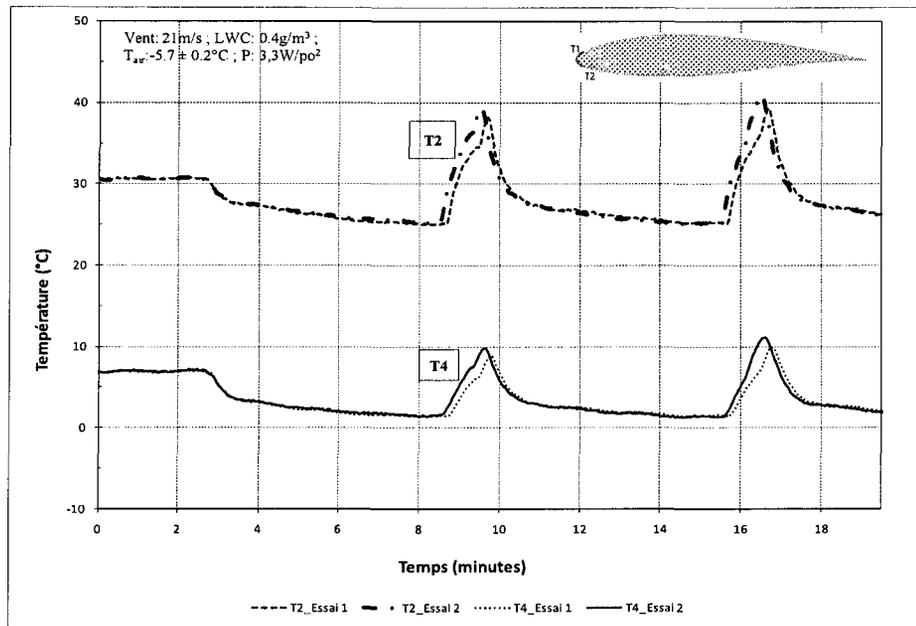


Figure 4.37 : Graphes montrant T_2 et T_4 en fonction du temps pour les essais de la série 5

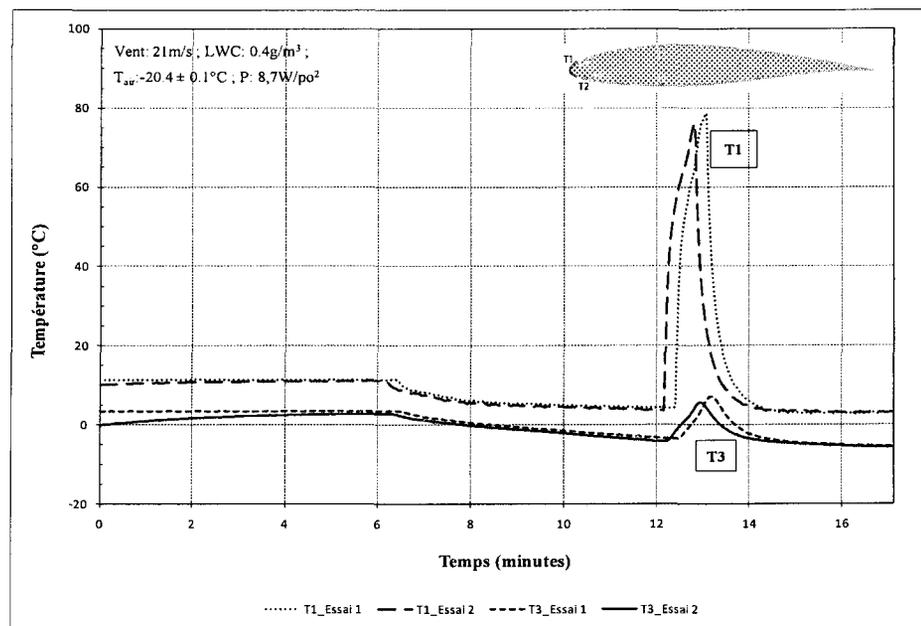


Figure 4.38 : Graphes montrant T_1 et T_3 en fonction du temps pour les essais de la série 6

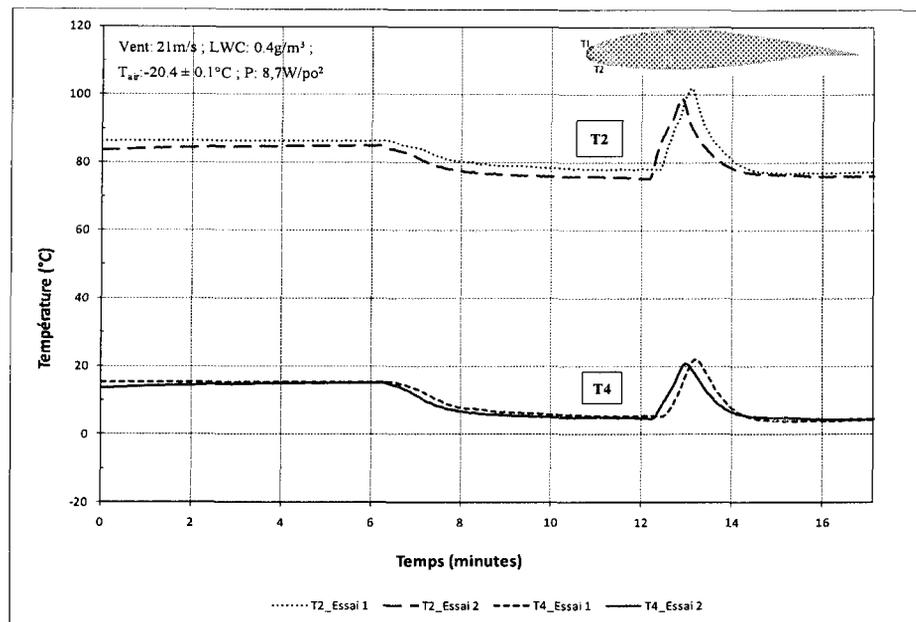


Figure 4.39 : Graphes montrant T2 et T4 en fonction du temps pour les essais de la série 6

Que ce soit la série 5 (Figure 4.36 et Figure 4.37) ou la série 6 (Figure 4.38 et Figure 4.39) on remarque que les courbes de températures se superposent quasiment. Les profils et les valeurs des températures sont quasi identiques. Les séries d'essais démontrent donc une bonne répétitivité. Ceci est d'ailleurs confirmé par la comparaison visuelle de la glace pour les essais (Figure 4.40).

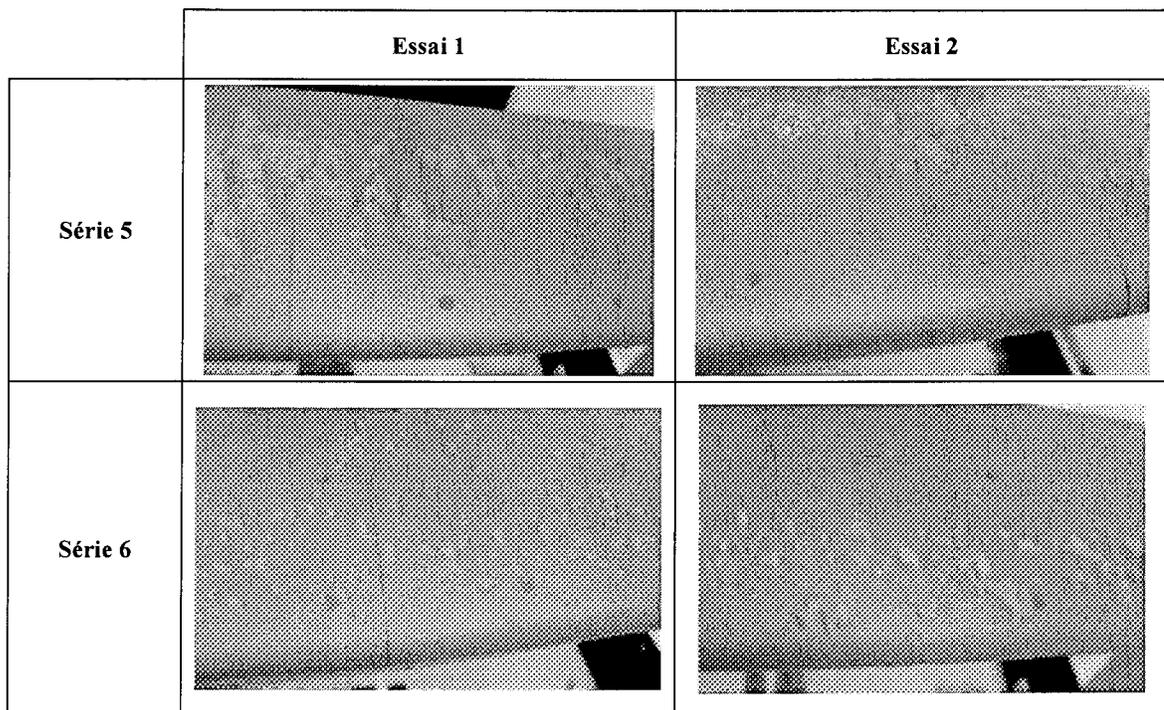


Figure 4.40 : Comparaison visuelle des essais des séries 5 et 6

CHAPITRE 5

EXTRAPOLATION DU COÛT DE DÉGIVRAGE

CHAPITRE 5

EXTRAPOLATION DU COÛT DE DÉGIVRAGE

Ce chapitre présente l'extrapolation de la puissance à allouer au dégivrage d'une pale, d'une éolienne et d'un parc en se basant sur les résultats obtenus au cours de cette étude. L'extrapolation est faite en se basant sur les parcs érigés par 3Ci sur les monts Copper et Miller de Murdochville qui comptent 60 éoliennes de type Vestas V80 de 1,8MW ([38]) pour une puissance totale de 108 MW. Chaque turbine est munie d'un rotor d'un diamètre de 80 mètres.

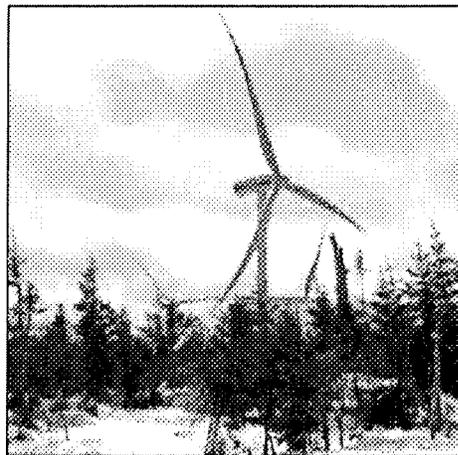


Figure 5.1 : Éolienne Vestas de 1,8 MW installée à Murdochville [38]

La pale de l'éolienne Vestas V80 est composée de deux profils aérodynamiques, soit le NACA 63 XXX et le FFA W3 XX. Le profil exact étant inconnu, un profil aérodynamique NACA 63 415 est choisi tout au long de la pale car c'est un profil similaire

qui est généralement utilisé pour la confection des pales d'éoliennes [36]. La distribution de la corde le long de la pale est supposée linéaire [36]. L'équation de la corde à une position radiale donnée est donnée à la **section 3.5.1**. Il s'agit de l'équation 13. La corde varie le long de la pale de 3,52 m à la racine de la pale à 0,48 m en bout. La corde moyenne pour la pale est de 2 m ce qui correspond à une surface totale de 160 m².

En laboratoire la pale utilisée a une corde de 0,1016 m (4 po) et une longueur de 0,254 m (10 po). La surface totale est donc de 0,0516128 m² (80 po²). La surface chauffée est de 0,0064516 m² (10 po²). La surface chauffée représente 12,5% de la surface totale. Ainsi la surface correspondante pour une pale de la Vestas V80 est d'environ 20 m².

Tableau 5.1 : Densité de puissance en fonction de la surface et du mode de dégivrage utilisé

Surfaces	Densité de puissance de la zone chauffée en utilisant le mode antigivrage	Densité de puissance de la zone chauffée en utilisant le mode dégivrage
Pellicule (Pale non revêtue)	17,7 kW/m ² ou 11,4 W/po ²	14,6 kW/m ² ou 9,4 W/po ²
Wearlon (surface hydrophobe)	16,4 kW/m ² ou 10,6 W/po ²	13,2 kW/m ² ou 8,5 W/po ²
HIREC (surface superhydrophobe)	15,3 kW/m ² ou 9,9 W/po ²	13,5 kW/m ² ou 8,7 W/po ²

Le **Tableau 5.1** présente les principaux résultats expérimentaux obtenus pour les densités de puissances dépendamment des deux modes de chauffage et des surfaces étudiées. Les puissances consommées sont moins élevées dans le cas du mode dégivrage

comparativement au mode antigivrage. Rappelons ici que les conditions climatiques mises à l'échelle dans le cas de cette étude sont des conditions de givrage très sévères.

Les tableaux 5.2 et 5.3 présentent les résultats des calculs d'extrapolation de la puissance à allouer au dégivrage en utilisant le mode antigivrage (**Tableau 5.2**) et le mode dégivrage (**Tableau 5.3**).

Tableau 5.2 : Extrapolation de la puissance consommée pour le mode antigivrage

Extrapolation	Pellicule	Hydrophobe	Superhydrophobe
Pale grandeur réelle	0,354 MW	0,328 MW	0,306 MW
Éolienne	1,062 MW	0,984 MW	0,918 MW
Parc éolien	64 MW	59 MW	55 MW
Pour 60 jours de dégivrage	10,5 MW ou 9,7% de la production annuelle	9,7 MW ou 8,9% de la production annuelle	9,1 MW ou 8,4 % de la production annuelle

D'après les extrapolations du tableau 5.2, pour 60 jours de givrage sévère et si les pales ne sont pas protégées environs 9,7% de la production annuelle servirait au chauffage des pales lorsqu'on utiliserait le mode antigivrage. L'utilisation de revêtements hydrophobes permet de ne consommer que 8,9% de la production, soit une économie d'énergie de presque 1 % en comparant avec la pale sans revêtement. L'économie serait de 1,3% pour un matériau superhydrophobe si on compare toujours avec la pale sans revêtement.

La même tendance est observée pour le mode dégivrage (Tableau 5.3). Les revêtements permettent une économie d'énergie qui varie suivant le type de revêtement.

Tableau 5.3 : Extrapolation de la puissance consommée pour le mode dégivrage

Extrapolation	Pellicule	Hydrophobe	Superhydrophobe
Pale grandeur réelle	0,292 MW	0,264 MW	0,270 MW
Éolienne	0,876 MW	0,792 MW	0,810 MW
Parc éolien	53 MW	48 MW	49 MW
Pour 60 jours de dégivrage	8,6 MW ou 7,9% de la production annuelle	7,8 MW ou 7,2% de la production annuelle	8,0 MW ou 7,4 % de la production annuelle

Le tableau 5.3 montre donc qu'en mode dégivrage et sans revêtement la consommation serait de 7,9% de la production annuelle. Néanmoins on remarquerait une économie en énergie de 0,7% si la pale est recouverte d'un revêtement hydrophobe et une économie de 0,5% si elle est recouverte par un revêtement superhydrophobe.

Mises à part ces conclusions spécifiques les extrapolations confirment que quelque soit le type de surface le mode dégivrage est moins énergivore que le mode antigivrage. Ainsi en mode dégivrage, la puissance consommée est de 7,9% de la production annuelle contre 9,7% pour le mode antigivrage dans le cas de la pale sans revêtement (pellicule). Pour la surface hydrophobe, cette puissance est de 8,9% pour le mode antigivrage alors qu'elle baisse à 7,2% lorsqu'on opère en mode dégivrage. La surface superhydrophobe permet aussi une consommation en énergie moins élevée en mode dégivrage qu'en mode antigivrage.

Dans un endroit où les conditions de givrage sont sévères, l'utilisation d'un revêtement superhydrophobe pourrait s'avérer économiquement viable, en raison du gain de 1,3% sur la consommation annuelle. Par contre il faut que le prix de revient du

revêtement et les coûts d'application combinés à la durée de vie du revêtement, reviennent à des couts annuels inférieurs à 1% des gains de production annuels.

CHAPITRE 6

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1. Conclusions

Ce mémoire est une première avancée dans le domaine de la production de l'énergie éolienne au Canada. En effet, il montre que les revêtements hydrophobes peuvent réduire la consommation de puissance pour le dégivrage et l'antigivrage même si des problèmes comme la dégradation des profils sont rencontrés.

Les essais en laboratoire ont démontré que les revêtements à caractère glaciophobe qui existent sur le marché ne peuvent pas être utilisés comme système de dégivrage passif. Néanmoins lorsque ces revêtements sont combinés à un système de dégivrage électrothermique de protection contre la glace, ils réduisent de façon significative la puissance consommée. L'utilisation des revêtements est très avantageuse en régime humide, qu'ils fonctionnent seuls ou qu'ils soient combinés au système électrothermique. Le degré d'hydrophobicité a un impact sur l'efficacité des revêtements antigivre. En effet, plus l'angle de contact est élevé et plus le revêtement est efficace contre l'accumulation de glace sur la pale quelque soit le régime d'accrétion. La même corrélation a pu être faite en ce qui concerne la réduction de la puissance de dégivrage.

Les essais d'accumulation (essais sans dégivrage) ont confirmé que les formes de glace ne dépendent pas de la surface. Lors de ces essais, quelque soit le régime d'accrétion, les revêtements réduisent d'au moins 60% l'accumulation de la glace sur la surface. La

réduction la plus notable est notée avec le revêtement superhydrophobe qui réduit de 82% cette accumulation lorsqu'on est en régime humide. Mais sans dégivrage, toute la glace qui s'accumule sur le bord d'attaque a tendance à y rester. C'est pourquoi, il est nécessaire de coupler le revêtement à un système de dégivrage électrothermique. Ainsi comme espéré, le revêtement superhydrophobe a démontré d'excellents résultats lorsque combiné à un système électrothermique de protection contre la glace avec une réduction significative de la puissance. En effet en mode antigivrage, la réduction de la puissance consommée avec le revêtement superhydrophobe est d'environ 34% en régime humide et d'environ 13% en régime sec. En mode dégivrage par contre les réductions sont d'environ 15% en régime humide et de 8% en régime sec.

En général, les revêtements hydrophobes ont aussi donné de bons résultats, même s'ils sont en-dessous de ceux obtenus avec le revêtement superhydrophobe. En mode antigivrage, le meilleur revêtement hydrophobe a permis une réduction de la puissance de 7% en régime sec et de 14% en régime humide. En mode dégivrage, le meilleur revêtement hydrophobe permet une réduction de l'ordre de 8% tout régime confondu.

Comme pressenti, les revêtements améliorent grandement l'effet de ruissellement. Cela est sans aucun doute relié à leur nature hydrophobe. Ceci se vérifie grâce aux résultats obtenus. En effet, plus le revêtement a un angle de contact élevé plus l'effet de ruissellement est important. Ils permettent de réduire la température minimum de surface, nécessaire au ruissellement d'environ 20% au niveau du bord d'attaque. Par période très froides (régime d'accrétion sec), il faut maintenir une température de surface d'au moins

3°C au niveau du bord d'attaque, et par temps moins froids (régime d'accrétion humide) une température avoisinant 0°C est suffisante.

Le revêtement superhydrophobe a montré une plus grande détérioration au fil des cycles de dégivrage comparativement aux revêtements hydrophobes. Il pourrait donc nécessiter un remplacement plus fréquent.

Maissan et al. (2001) a rapporté un gain de 2% de la production brute qu'il attribue à la présence du revêtement StaClean™ noir sur ses pales [29]. Grâce aux résultats de cette étude, si on extrapole, l'utilisation de revêtements superhydrophobes pourrait permettre un gain de 4% à 6% en termes de production éolienne. Néanmoins une estimation plus précise pourra être faite en tenant compte entre autre du coût de chaque type de revêtement. Il est à noter aussi que puisque les essais en dégivrage n'ont pas été faits selon la méthode classique de dégivrage, les gains prédits peuvent être sous ou sur-estimés.

6.2. Recommandations

Les principales recommandations découlant de l'étude sont :

- Augmenter le nombre d'essais pour diminuer l'incertitude sur les résultats.
- Améliorer le montage car, il semble se détériorer au fil du temps.
- Augmenter le nombre de revêtements à évaluer de sorte à avoir plus d'intervalles pour les valeurs de l'angle de contact.
- Faire des essais aérodynamiques avec des profils protégés par des revêtements pour évaluer leur impact sur l'aérodynamisme des pales.
- Refaire les essais de dégivrage en utilisant la vraie procédure de dégivrage.

LISTE DE RÉFÉRENCES

1. Burton, T., et al., *Wind Energy Handbook*, ed. J.W.S. Ltd. 2001, Chichester, England: John Wiley & Sons. 609.
2. CanmetÉNERGIE. *Énergie éolienne et climats froids*. Énergies renouvelables 2008 [cited 2009; Available from: http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan.nrcan.gc.ca/fra/energies_renouvelables/energie_eolienne/cold_climate.html].
3. Laakso, T. and E. Peltola. *A statistical evaluation of icing and low temperature failures in Finland 1996-2002*. in *BOREAS VI Proceedings*. 2003. Pyhäntunturi, Finland.
4. Gillenwater, D., C. Masson, and J. Perron. *Wind turbine performance during icing events*. in *46th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 2008. Reno, Nevada.
5. Jasinski, W.J., et al. *Wind turbine performance under icing conditions*. in *35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 1997. Reno, Nevada.
6. Laakso, T. and E. Peltola. *Review on blade heating technology and future prospects*. in *Proceedings of the 2005 BOREAS VII Conference*. 2005. Saarislka, Finland.
7. Seifert, H., *Technical requirements for rotor blades operating in cold climate*, in *Proceedings of the 2003 BOREAS VI Conference*. 2003: Pyhä, Finland.
8. Kimura, S., T. Sato, and K. Kosugi, *The effect of anti-icing paint on the adhesion force of ice accreted on a wind turbine blade*, in *Proceedings of the 2003 BOREAS VI Conference* 2003: Pyhä, Finland.

9. Kraj, A.G., *Icing characteristics and mitigation strategies for wind turbines in cold climates*. 2007, University of Manitoba (Canada). p. 169p.
10. Laakso, T., et al., *State-of-the-art of wind energy in cold climates*. Annex XIX Wind Energy in Cold Climate, 2003.
11. Weis, T.M., *Rime ice adhesion to heated surfaces*, in *Department of mechanical engineering*. 2002, University of Alberta: Edmonton. p. 139p.
12. Dalili, N., A. Edrisy, and R. Carriveau, *A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007.
13. Mazin, I.P., et al., *Thermodynamics of icing cylinder for measurements of liquid water content in supercooled clouds*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001. 18(4): p. 543-558.
14. Lozowski, E.P., J.R. Stallabrass, and P.F. Hearty, *The icing of an unheated, nonrotating cylinder. Part II: icing wind tunnel experiments*. Journal of Climate & Applied Meteorology, 1983. 22(12): p. 2063-2074.
15. Wang, X., E.L. Bibeau, and G.F. Naterer, *Experimental investigation of energy losses due to icing of a wind turbine*, in *Challenges of power engineering and environment*, SpringerLink, Editor. 2007, Springer Berlin Heidelberg: Berlin. p. 1143-1147.
16. Mayer, C., *Système électrothermique de dégivrage pour une pale d'éolienne : Simulations en soufflerie réfrigérée et impact sur la puissance produite*. 2007, Université du Québec à Rimouski (Canada): Rimouski. p. 193p.

17. Botura, G. and K. Fisher. *Development of ice protection system for wind turbine applications*. in *Proceedings of the 2003 BOREAS VI Conference*. 2003. Pyhäntunturi, Finland.
18. Mayer, C., *Système électrothermique de dégivrage pour une pale d'éolienne : Simulations en soufflerie réfrigérée et impact sur la puissance produite*. 2007, Université du Québec à Rimouski: Rimouski. p. 193.
19. Croutch, V.K. and R.A. Hartley, *Adhesion of ice to coatings and the performance of ice release coatings*. *J. Coat. Technol.*, 1992. 64(815): p. 41-53.
20. Laforte, C., *Étude de l'adhérence de la glace sur des solides à caractère glaciophobe*. 2001, Université du Québec à Chicoutimi (Canada): Saguenay. p. 160p.
21. Saito, H., K. Takai, and G. Yamauchi, *Water- and ice-repellent coatings*. *Surface Coatings International Part B: Coatings International*, 1997. 80(4): p. 168-171.
22. Laforte, C., *Déformation à la rupture adhésive par traction, flexion et torsion d'un substrat givré*. 2008, Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi, 2008.
23. Javan-Mashmool, M., *Theoretical and experimental investigations for measuring interfacial bonding strength between ice and substrate*. 2005, Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi, 2005.
24. Kako, T., et al., *Adhesion and sliding of wet snow on a super-hydrophobic surface with hydrophilic channels*. *Journal of Materials Science*, 2004. 39(2): p. 547-555.
25. Sarkar, D.K., M. Farzaneh, and R.W. Paynter, *Superhydrophobic properties of ultrathin rf-sputtered Teflon films coated etched aluminum surfaces*. *Materials Letters*, 2008. 62(8-9): p. 1226-1229.

26. Menini, R. and M. Farzaneh, *Elaboration of Al₂O₃/PTFE icephobic coatings for protecting aluminum surfaces*. Surface and Coatings Technology, 2009. 203(14): p. 1941-1946.
27. Karmouch, R. and G.G. Ross, *Superhydrophobic wind turbine blade surfaces obtained by a simple deposition of silica nanoparticles embedded in epoxy*. Applied Surface Science. 257(3): p. 665-669.
28. BWC. *BWC Excel-R Description*. 2008 [cited 22 Mai 2010]; Available from: <http://www.bergey.com/Products/Excel.Description.html>.
29. Maissan, J.F. *Wind power development in sub-Arctic conditions with severe rime icing*. 2001 [cited 22 Mai 2010]; Available from: http://www.yukonenergy.ca/downloads/db/45_final_wind_paper.pdf.
30. Office fédéral de l'énergie OFEN, *energeia: Bulletin de l'Office fédéral de l'énergie OFEN*, d.t. Département fédéral de l'environnement, de l'énergie et de la communication (DETEC), Editor. Mars 2009: Berne, Suisse.
31. Servant, D., *Etude et amélioration d'un montage expérimental du laboratoire pour le givrage atmosphérique d'une éolienne.*, in *Rapport de stage*. 2008, Laboratoire International des Matériaux Antigivre (LIMA-UQAC): Chicoutimi. p. 50p.
32. Callister, W.D., *Science et génie des matériaux*. 2001, Mont-Royal, Québec: Modulo. xviii, 781.
33. Roach, P., N.J. Shirtcliffe, and M.I. Newton, *Progress in superhydrophobic surface development*. Soft Matter, 2008, 4, 224, 2008.

34. LIMA. *Produits glaciophobes*. 2009 [cited 19 Février 2009]; Available from: <http://www.uqac.ca/amil/fr/produitsglaciophobes/index.htm>.
35. Hochart, C., et al. (2007) *Wind turbine performance under icing conditions*. Wind Energy Volume, DOI: 10.1002/we.258
36. Dimitrova, M.H., *Pertes énergétiques d'une éolienne à partir des formes de glace simulées numériquement*. 2009, [Chicoutimi, Québec] : Université du Québec à Chicoutimi ; [Rimouski, Québec] : Université du Québec à Rimouski, 2009.
37. Anderson, D.N., *Manual of Scaling Methods*. 2004, Ohio Aerospace Institute, Brook Park, Ohio.
38. Hochart, C., *Simulation numérique et expérimentale de l'écoulement d'air et de l'accrétion de glace autour d'une pale d'éolienne*. 2007: Chicoutimi, Québec] : [Rimouski, Québec].
39. Fortin, G., A. Ilinca, and J.-L. Laforte, *Modèle d'accrétion de glace sur un objet bidimensionnel fixe applicable aux pales d'éolienne*. VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, 2004. 5(1): p. 9.
40. Fortin, G., *Notes de cours: Thermodynamique de la glace atmosphérique*. 2009: Université du Québec à Chicoutimi.
41. Lozowski, E.P., J.R. Stallabrass, and P.F. Hearty, *The icing of an unheated, nonrotating cylinder. Part I: a simulation model*. Journal of Climate & Applied Meteorology, 1983. 22(12): p. 2053-2062.
42. Abbott, I.H.A. and A.E. Von Doenhoff, *Theory of wing sections : including a summary of airfoil data*. 1959, New York: Dover Publications. 693.

ANNEXE A

MISE À L'ÉCHELLE DES CONDITIONS CLIMATIQUES

ANNEXE A

MISE À L'ÉCHELLE DES CONDITIONS CLIMATIQUES

Introduction

Les essais en soufflerie ne pouvant pas être faits sur une pale grandeur réelle en raison des restrictions dimensionnelles de la section d'essai, une mise à l'échelle des conditions réelles est nécessaire. Le but du projet étant de mesurer l'impact du dégivrage des pales, un calcul de similitude de la quantité d'eau captée sur la pale grandeur réelle et la pale réduite a été fait. Il fallait donc entre autre que la zone d'impact des gouttelettes sur la pale grandeur réelle et la pale réduite coïncide. On sait que l'étude théorique des lois régissant le givrage en similitude nécessite l'analyse de différents phénomènes physiques. Le premier de ces phénomènes est celui de la mécanique de captation des gouttelettes d'eau qui fait intervenir la recherche des trajectoires de ces gouttelettes dans le champ aérodynamique de l'écoulement entourant l'obstacle à givrer. Le deuxième phénomène est la répartition et la quantité de glace sur le profil. On évalue donc la concentration en eau du nuage givrant, le temps de givrage et le coefficient de transfert de chaleur par convection. Le troisième phénomène analysé est celui de l'équilibre thermique. Pour le cas de la captation de l'eau et ainsi de la quantité de glace qui se forme, c'est le premier de ces phénomènes qui est étudié.

A.1. Description

Le paramètre essentiel pour calculer la quantité d'eau captée par un objet, c'est l'efficacité de la collection E . Elle mesure l'habilité de l'objet à capturer les gouttelettes qui sont présentes dans l'écoulement (**Figure A.1**). La trajectoire des gouttelettes d'eau et leur point d'impact sont évalués en ne prenant pas en considération leur déformation et leur évaporation au moment de l'impact sur l'objet [39].

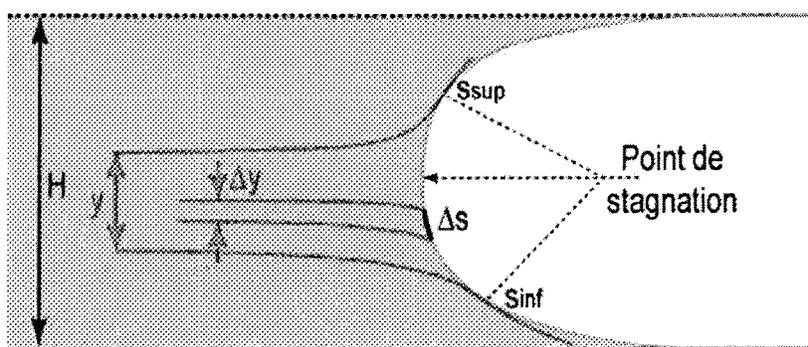


Figure A.1 : Efficacité de la collection [40]

L'efficacité de la collection E est donc égale:

$$E = \frac{y}{H} \quad (\text{Équation A.1})$$

L'efficacité de la collection E est la sommation des coefficients locaux de collection. Le coefficient de collection est calculé à partir des points d'impact. Le coefficient de collection local peut donc être exprimé par :

$$\beta = \frac{dy}{dS} \quad (\text{Équation A.2})$$

Dans le calcul de similitude de ce projet, les calculs de ces paramètres de la collection d'eau sont effectués en utilisant les équations de Lozowski, Stallabrass et

Hearty [41]. Selon cette méthode, le coefficient local de collection pour un cylindre est fonction de la position angulaire θ , du coefficient de collection E , du coefficient de collection au point de stagnation β_0 , et de l'angle maximum de collection θ_m . (Figure A.2)

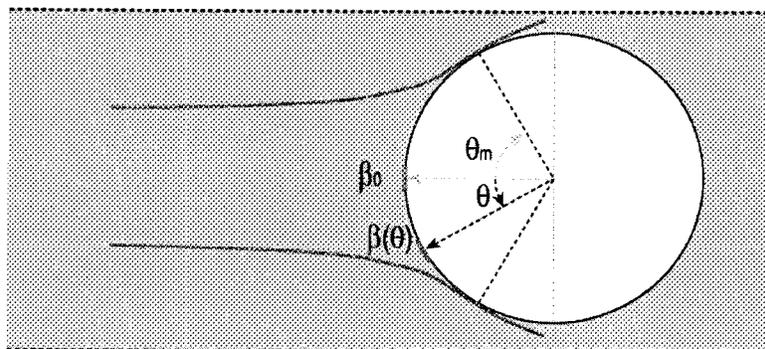


Figure A.2 : Coefficient de collection sur un cylindre [40]

La méthode de Lozowski, Stallabrass et Hearty étant appliquée à un cylindre, on considère le profil de pale comme un cylindre de diamètre D_c égal au rayon du bord d'attaque du profil considéré. Le rayon du bord d'attaque d'un profil NACA 63-415 est donné par [42] :

$$D_c = 1,594\%c$$

Où c est la corde du profil

Le **Tableau A.1** présente les conditions réelles simulées.

Tableau A.1 : Conditions réelles

Position #	Position radiale r (m)	Position radiale (adimensionnelle)	Vitesse U (m/s)	Corde C _{Réelle} (m)	MVD _{Réelle} (µm)	LWC _{Réelle} (g/m ³)
1	30,68	0,77	50	1,29	30	0,1
						0,3
2	20,77	0,52	35	2,15	30	0,1
						0,3

MVD : Diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau ; LWC : Teneur en eau liquide

A.2. Équations et paramètres utilisés

Dans cette section, on retrouve des équations qui décrivent les propriétés de l'air, de l'eau et de la glace. Quelques relations générales utilisées dans les calculs de similitude sont également présentées. Les équations A.3 à A.20 sont tirées des notes du cours "Thermodynamique de la glace atmosphérique" de Guy Fortin [40]. Les équations A.21 à A.33 proviennent quant elles de *Manual of Scaling Methods* [37].

$$T = t + 273.15K \quad (\text{Équation A.3})$$

$$C_{p,a} = -1.2267 \times 10^{-10} \times T^5 + 1.7667 \times 10^{-7} \times T^4 - 9.8533 \times 10^{-5} \times T^3 + 2.6998 \times 10^{-2} \times T^2 - 3.6769 \times T + 1206.4 \frac{J}{kg \times K} \quad (\text{Équation A.4})$$

$$c_{p,a} \approx 1004 \frac{J}{kg \cdot K} \text{ à } 100kPa$$

$$C_{p,w} = -8.342775 \times 10^{-8} \times T^5 + 1.364321 \times 10^{-4} \times T^4 - 8.918909 \times 10^{-2} \times T^3 + 29.14284 \times T^2 - 4760.713 \times T + 315272.2 \frac{J}{kg \times K} \quad (\text{Équation A.5})$$

$$c_{p,w} \approx \left(4217.78 \frac{J}{kg.K}\right) + 0.3470857 \frac{J}{kg.K} \times (T_s - 273.15K)^2 \quad (\text{Équation A.6})$$

$$\rho_a = \frac{P_a}{R_a \times T_a} \frac{kg}{m^3} \quad (\text{Équation A.7})$$

$$R_a = 287 \frac{J}{kg \times K} \quad (\text{Équation A.8})$$

La densité de la glace varie avec le type de glace. Mais on la prendra ici égale à :

$$\rho_i = 917 \frac{kg}{m^3} \quad (\text{Équation A.9})$$

$$k_a = -3.3165 \times 10^{-8} \times T^2 + 9.7317 \times 10^{-5} \times T - 8.8605 \times 10^{-5} \frac{W}{m \times K} \quad (\text{Équation A.10})$$

$$\mu_a = -5.1825 \times 10^{-11} \times T^2 + 7.8286 \times 10^{-8} \times T - 3.4374 \times 10^{-7} Pa.s \quad (\text{Équation A.11})$$

$$\mu_w = -9.284792 \times 10^{-14} \times T^5 + 1.787881 \times 10^{-10} \times T^4 - 1.370966 \times 10^{-7} \times T^3 + 5.235742 \times 10^{-5} \times T^2 - 9.967257 \times 10^{-3} \times T + 0.7578796 Pa.s \quad (\text{Équation A.12})$$

La viscosité dynamique de l'eau au point de congélation est de :

$$\mu_w = 1.786 \times 10^3 Pa.s \quad (\text{Équation A.13})$$

Pour tous les fluides et les gaz, la viscosité cinématique se définit comme étant le rapport de la viscosité dynamique sur la densité.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Équation A.14})$$

Le nombre de Prandtl se définit comme étant le rapport de la viscosité cinématique sur le coefficient de diffusion thermique.

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{Équation A.15})$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho^* c_p} \quad (\text{Équation A.16})$$

$$\text{Nu}_a = 1.14 \times \text{Pr}_a^{0.4} \times \text{Re}_a^{0.5} \quad (\text{Équation A.17})$$

$$\text{Pr}_a = \frac{c_{p,a} \times \mu_a}{k_a} \quad (\text{Équation A.18})$$

$$\text{Re}_a = \frac{U \times d \times \rho_a}{\mu_a} \quad (\text{Équation A.19})$$

Où

$$d = r_{le} \quad (\text{Équation A.20})$$

Dans le cas d'un profil NACA 63-415 : $r_{le} = 1.594\% C$ [42]

$$Ac = \frac{LWC * U * \tau}{\rho_i * d} \quad (\text{Équation A.21})$$

$$b = \frac{LWC * U * \beta_0 * c_{p,ws}}{h_c} \quad (\text{Équation A.22})$$

$$h_c = \frac{k_a \text{Nu}_a}{d} \quad (\text{Équation A.23})$$

$$\frac{h_{film}}{d} = \left(\frac{LWC}{\rho_w} \right)^{1/2} * \text{Re}_a^{-1/4} \quad (\text{Équation A.24})$$

$$h_G = \frac{h_c}{c_{p,a}} \left(\frac{\text{Pr}_a}{\text{Sc}_a} \right)^{0.67} \quad (\text{Équation A.25})$$

$$K = \frac{U_a \times (MVD)^2 \times \rho_w}{9 \times \mu_a \times d} \quad (\text{Équation A.26})$$

$$\varphi = \frac{\text{Re}^2}{K} = \frac{9 \times \rho_a \times \text{Re}_c}{\rho_w} \quad (\text{Équation A.27})$$

$$\text{Re}_c = \frac{\rho_a \times U_a \times d}{\mu_a} \quad (\text{Équation A.28})$$

$$K_0 = \frac{1}{8} + \frac{\lambda}{\lambda_{\text{Stokes}}} \left(K - \frac{1}{8} \right) \quad (\text{Équation A.29})$$

L'équation ci-dessus est valide si $K > \frac{1}{8}$

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\text{Stokes}}} = \frac{1}{0.8388 + 0.001483 \times \text{Re}_{\text{MVD}} + 0.1847 \times \sqrt{\text{Re}_{\text{MVD}}}} \quad (\text{Équation A.30})$$

$$E = \frac{K_o}{\left(\frac{\pi}{2} + K_o \right)} \quad (\text{Équation A.31})$$

$$\text{Si : } 0,125 \leq K_o \leq 7,5 \text{ on } \beta_0 = \frac{1.4 \left(K_o - \frac{1}{8} \right)^{0.84}}{1 + 1.4 \left(K_o - \frac{1}{8} \right)^{0.84}} \quad (\text{Équation A.32})$$

$$\text{Et si : } 7,5 \leq K_o \text{ alors } \beta_0 = \frac{K_o}{1 + K_o} \quad (\text{Équation A.33})$$

Le tableau ci-dessous présente le résumé des calculs.

Tableau A.2 : Récapitulatif des calculs de similitude pour les positions retenues

Position retenue #	Position radiale (m)	C _{Réelle} (m)	C _{scale} (m)	U _{scale} (m/s)	MVD _{scale} (µm)	LWC _{scale} (g/m ³)	T _{scale} (°C)
1	30,68	1,29	0,1016	33	16	0,4	-5
							-18
2	20,77	2,15	0,1016	21	16	0,4	-5
							-18

Dans chaque cas de calcul, la vitesse réduite U_{scale} est fixée et, par essais et erreurs, la teneur en eau liquide LWC_{scale} est calculée.

A.3. Calculs avec le logiciel MAPLE

Le but de ces calculs est de trouver la teneur en eau liquide en soufflerie, qui fait coïncider :

- la zone de collection de l'eau sur la pale grandeur réelle et la zone de collection sur la section de pale réduite.
- La trajectoire des gouttelettes d'eau et leur point d'impact sur la pale grandeur réelle et sur la section de pale réduite.

La vitesse U_{a_s} dans la soufflerie est fixée à 33m/s pour la position 1 et à 21m/s pour la position 2. La teneur en eau liquide (LWCs) dans la soufflerie est déterminée en faisant coïncider autant que possible la courbe de collection réelle et la courbe de collection mise à l'échelle (**Figure A.5**) pour chacun des cas. On rappelle ici que :

U_{a_s} : est la vitesse de l'air dans la soufflerie

D_w : est le diamètre des gouttelettes d'eau, soit le diamètre volumétrique médian (MVD).

A.3.1 Calculs pour la position 1

La position 1 est située au $\frac{3}{4}$ de la pale en partant du moyeu. Le fichier de calcul donne les lignes ci-dessous.

```
> Uas := 33;
                                Uas := 33
> Pa := 101325;
                                Pa := 101325
> Ra := 287.05;
                                Ra := 287.05
> Ta := 255.15;
                                Ta := 255.15
```

```

> Dw := 16·10(-6);
                                Dw :=  $\frac{1}{62500}$ 
> ρa := Pa ÷ (Ra × Ta);
                                ρa := 1.383450066
> ρw := 1000;
                                ρw := 1000
> LWCs := 0.4;
                                LWCs := 0.4
> cs := 0.1016;
                                cs := 0.1016
> Dcs := (1.594 ÷ 100) · cs;
                                Dcs := 0.001619504000
> rs := Dcs ÷ 2;
                                rs := 0.0008097520000
> As := (Pi·Dcs2) ÷ 4;
                                As := 6.556983015 10-7 π
> evalf(As);
                                0.000002059936967
> μa := (-5.1825·10(-11)·Ta2) + (7.8286·10(-8)·Ta) - (-3.4374·10(-7));
                                μa := 0.00001694452650
> Recs := (ρa·Uas·Dcs) ÷ μa;
                                Recs := 4363.450122
> Rew := (ρa·Uas·Dw) ÷ μa;
                                Rew := 43.10900248
> φ := (9· ρa·Recs) ÷ ρw;
                                φ := 54.32953823
> Ks := (Uas·Dw2·ρw) ÷ (9·μa·Dcs);
                                Ks := 34.20581428
> Kos := 0.125 + ((Ks - 0.125) ÷ (1 + (0.0967·(Rew0.6367)))));
                                Kos := 16.65242277

```

Kos est plus grand que 7.5, Ainsi :

```

> βos := Kos ÷ (1 + (Kos));
                                βos := 0.9433505523
> Es := (Kos) ÷ ((Pi ÷ 2) + Kos);

```

$$Es := \frac{16.65242277}{\frac{1}{2} \pi + 16.65242277}$$

> evalf(Es);

0.9138024780

> $\theta ms := \arctan(1.7 \cdot (Kos - 0.125)^{0.76});$

$\theta ms := 1.501131781$

> $sms := rs \cdot \theta ms \div cs;$

$sms := 0.01196402030$

> $\beta s := Uas \cdot LWCs \cdot ((\beta os \cdot \cos((Pi \cdot (s \cdot cs \div rs)) \div (2 \cdot \theta ms))) + (((Pi^3) \div (\theta ms^3 \cdot (Pi^2 - 4))) \cdot ((Es - (2 \cdot \theta ms \cdot \beta os \div Pi)) \cdot ((s \cdot cs \div rs)^2) \cdot (\sin(Pi \cdot (s \cdot cs \div rs) \div \theta ms))))));$

$$\beta s := 12.45222729 \cos(41.79197190 \pi s) + \frac{1}{\pi^2 - 4} \left(61432.87346 \pi^3 \left(1 / \left(\frac{1}{2} \pi + 16.65242277 \right) 16.65242277 - \frac{2.832186990}{\pi} \right) s^2 \sin(83.58394379 \pi s) \right)$$

> plot($\beta s, s = -sms .. sms$);

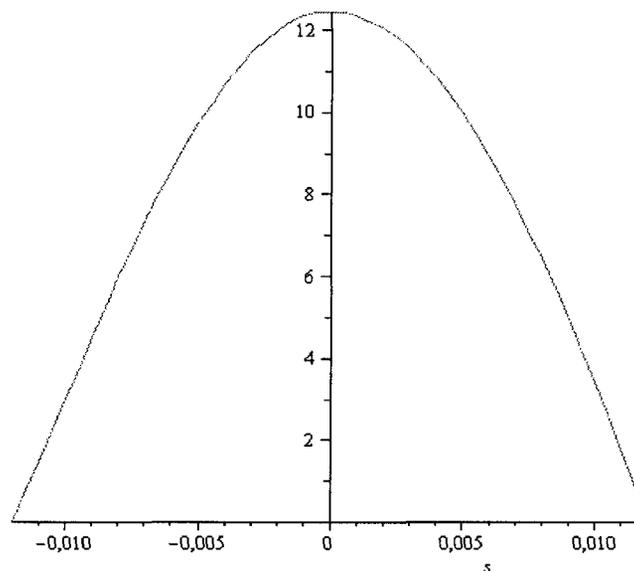


Figure A.3 : Position 1 : courbe de la collection de l'eau sur la pale réduite

> $Ua := 50;$

$Ua := 50$

```

> Pa := 101325;
Pa := 101325
> Ra := 287.05;
Ra := 287.05
> Ta := 268.15;
Ta := 268.15
> Dw := 30·10(-6);
Dw :=  $\frac{3}{100000}$ 
> ρa := Pa ÷ (Ra × Ta);
ρa := 1.316379953
> ρw := 1000;
ρw := 1000
> LWCr := 0.3;
LWCr := 0.3
> cr := 1.29;
cr := 1.29
> Dcr := (1.594 ÷ 100) · cr;
Dcr := 0.02056260000
> rr := Dcr ÷ 2;
rr := 0.01028130000
> Ar := (Pi·Dcr2) ÷ 4;
Ar := 0.0001057051297 π
> evalf(Ar);
0.0003320824590
> μa := (-5.1825·10(-11)·Ta2) + (7.8286·10(-8)·Ta) - (-3.4374·10(-7));
μa := 0.00001760968420
> Recr := (ρa·Ua·Dcr) ÷ μa;
Recr := 76855.99047
> Rew := (ρa·Ua·Dw) ÷ μa;
Rew := 112.1297752
> φ := (9·ρa·Recr) ÷ ρw;
φ := 910.5451659
> Kr := (Ua·Dw2·ρw) ÷ (9·μa·Dcr);
Kr := 13.80830621
> Kor := 0.125 + ((Kr - 0.125) ÷ (1 + (0.0967·(Rew0.6367)))));
Kor := 4.760238168

```

On remarque que le paramètre adimensionnel Ko est compris entre 0,125 et 7,5. Le coefficient local de collection est donc donné par :

```

>  $\beta_{or} := (1.4 \cdot (Kor - 0.125)^{0.84}) \div (1 + (1.4 \cdot (Kor - 0.125)^{0.84}));$ 
 $\beta_{or} := 0.8354518942$ 
>  $Er := (Kor) \div ((\text{Pi} \div 2) + Kor);$ 
 $Er := \frac{4.760238168}{\frac{1}{2} \pi + 4.760238168}$ 
>  $\text{evalf}(Er);$ 
0.7518894695
>
>  $\theta_{mr} := \arctan(1.7 \cdot (Kor - 0.125)^{0.76});$ 
 $\theta_{mr} := 1.389437797$ 
>  $smr := rr \cdot \theta_{mr} \div cr;$ 
 $smr := 0.01107381924$ 
>  $\beta_r := Ua \cdot LWCr \cdot ((\beta_{or} \cdot \cos(\text{Pi} \cdot (s \cdot cr \div rr)) \div (2 \cdot \theta_{mr})) + (((\text{Pi}^3) \div (\theta_{mr}^3 \cdot (\text{Pi}^2 - 4))) \cdot ((Er - (2 \cdot \theta_{mr} \cdot \beta_{or} \div \text{Pi})) \cdot ((s \cdot cr \div rr)^2) \cdot (\sin(\text{Pi} \cdot (s \cdot cr \div rr) \div \theta_{mr})))));$ 
 $\beta_r := 12.53177841 \cos(45.15154067 \pi s)$ 
 $+ \frac{1}{\pi^2 - 4} \left( 88035.38942 \pi^3 \left( 1 / \left( \frac{1}{2} \pi + 4.760238168 \right) 4.760238168 - \frac{2.321616878}{\pi} \right) s^2 \sin(90.30308134 \pi s) \right)$ 
>  $\text{plot}(\beta_r, s = -smr .. smr);$ 

```

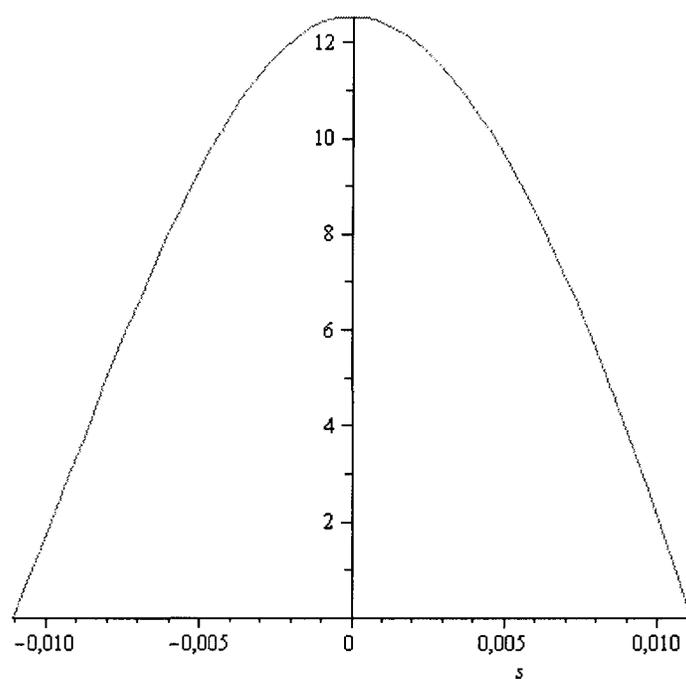


Figure A.4 : Collection de l'eau sur la pale réelle à la position 1

```
> plot([ $\beta_r$ ,  $\beta_s$ ], s=-sms ..sms, color = [red, blue],
      style = [line, line])
```

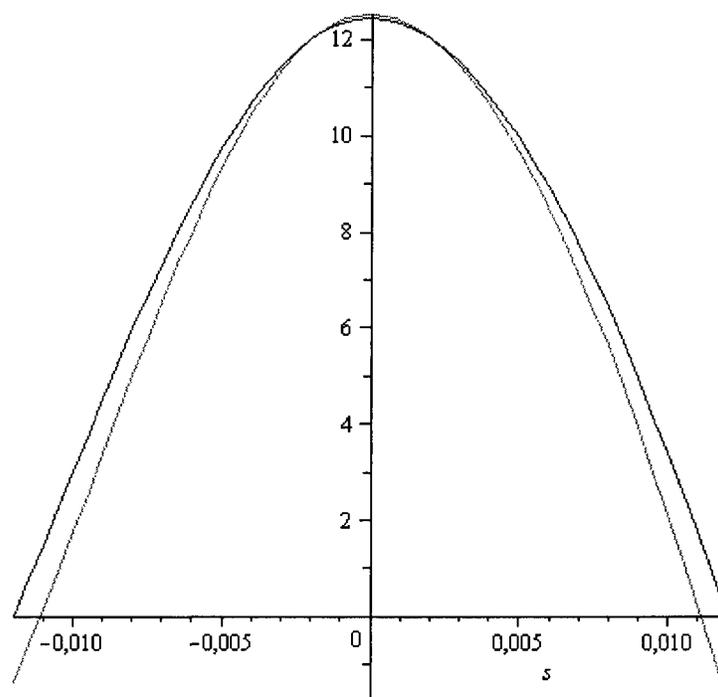


Figure A.5 : Résultats des calculs

A.3.2 Calculs pour la position 2

La position 2 est située au milieu de la pale en partant du moyeu.

```

> Uas := 21;
                                Uas := 21
> Pa := 101325;
                                Pa := 101325
> Ra := 287.05;
                                Ra := 287.05
> Ta := 268.15;
                                Ta := 268.15
> Dw := 16·10(-6);
                                Dw :=  $\frac{1}{62500}$ 
> ρa := Pa ÷ (Ra × Ta);
                                ρa := 1.316379953
> ρw := 1000;
                                ρw := 1000
> LWCs := 0.4;
                                LWCs := 0.4
> cs := 0.1016;
                                cs := 0.1016
> Dcs := (1.594 ÷ 100) · cs;
                                Dcs := 0.001619504000
> rs := Dcs ÷ 2;
                                rs := 0.0008097520000
> As := (Pi·Dcs2) ÷ 4;
                                As := 6.556983015 10-7 π
> evalf(As);
                                0.000002059936967
> μa := (-5.1825·10(-11)·Ta2) + (7.8286·10(-8)·Ta) - (-3.4374·10(-7));
                                μa := 0.00001760968420
> Recs := (ρa·Uas·Dcs) ÷ μa;
                                Recs := 2542.324670
> Rew := (ρa·Uas·Dw) ÷ μa;
                                Rew := 25.11706963
> φ := (9· ρa· Recs) ÷ ρw;

```

```

phi := 30.11998707
> Ks := (Uas·Dw^2·rho) ÷ (9·mu·Dcs);
Ks := 20.94513471
> Kos := 0.125 + ((Ks - 0.125) ÷ (1 + (0.0967
·(Rew^0.6367)))));
Kos := 12.00195652

```

Puisque K_{os} est plus grand que 7,5, on utilise la formule suivante pour le calcul du coefficient local de collection au point de stagnation.

```

> betaos := Kos ÷ (1 + (Kos));
betaos := 0.9230884984
> Es := (Kos) ÷ ((Pi ÷ 2) + Kos);
Es :=  $\frac{12.00195652}{\frac{1}{2} \pi + 12.00195652}$ 
> evalf(Es);
0.8842684054
> thetaos := arctan(1.7·(Kos - 0.125)^0.76);
thetaos := 1.481339293
> sms := rs·thetaos ÷ cs;
sms := 0.01180627416
> beta_s := Uas·LWCs·((betaos·cos((Pi·(s·cs ÷ rs))
÷ (2·thetaos))) + (((Pi^3) ÷ (thetaos^3·(Pi^2
- 4)))·((Es - (2·thetaos·betaos ÷ Pi))·((s·cs
÷ rs)^2)·(sin(Pi·(s·cs ÷ rs) ÷ thetaos)))));
beta_s := 7.753943387 cos(42.35036328 pi s)
+  $\frac{1}{\pi^2 - 4}$  (40681.69269 pi^3 (1 /
( $\frac{1}{2} \pi + 12.00195652$ )) 12.00195652
-  $\frac{2.734814528}{\pi}$ ) s^2 sin(84.70072656 pi s)
> plot(beta_s, s = -sms .. sms);

```

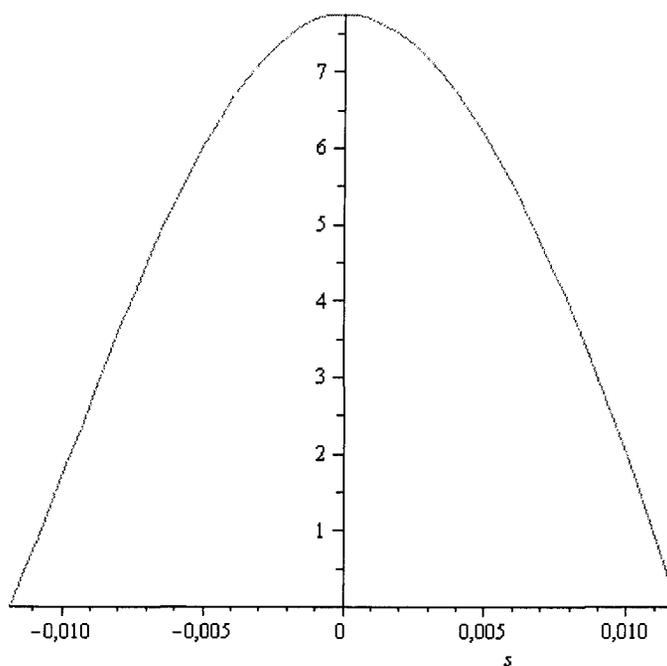


Figure A.6 : Position 2 : courbe de la collection de l'eau sur la pale réduite

> $Ua := 35;$

$$Ua := 35$$

> $Pa := 101325;$

$$Pa := 101325$$

> $Ra := 287.05;$

$$Ra := 287.05$$

> $Ta := 268.15;$

$$Ta := 268.15$$

> $Dw := 30 \cdot 10^{(-6)};$

$$Dw := \frac{3}{100000}$$

> $\rho a := Pa \div (Ra \times Ta);$

$$\rho a := 1.316379953$$

> $\rho w := 1000;$

$$\rho w := 1000$$

> $LWCr := 0.3;$

$$LWCr := 0.3$$

> $cr := 2.15;$

$$cr := 2.15$$

> $Dcr := (1.594 \div 100) \cdot cr;$

$$Dcr := 0.03427100000$$

> $rr := Dcr \div 2;$

```

rr := 0.01713550000
> Ar := (Pi·Dcr^2) ÷ 4;
Ar := 0.0002936253602 π
> evalf(Ar);
0.0009224512746
> μa := (-5.1825·10^(-11)·Ta^2) + (7.8286·10
^(-8)·Ta) - (-3.4374·10^(-7));
μa := 0.00001760968420
> Recr := (ρa·Ua·Dcr) ÷ μa;
Recr := 89665.32222
> Rew := (ρa·Ua·Dw) ÷ μa;
Rew := 78.49084261
> φ := (9·ρa·Recr) ÷ ρw;
φ := 1062.302693
> Kr := (Ua·Dw^2·ρw) ÷ (9·μa·Dcr);
Kr := 5.799488609
> Kor := 0.125 + ((Kr - 0.125) ÷ (1 + (0.0967
·(Rew^0.6367)))));
Kor := 2.345538584

```

On remarque que le paramètre adimensionnel Ko est compris entre 0.125 et 7.5 Le coefficient local de collection

```

> βor := (1.4·(Kor - 0.125)^0.84) ÷ (1 + (1.4
·(Kor - 0.125)^0.84));
βor := 0.7323507173
> Er := (Kor) ÷ ((Pi ÷ 2) + Kor);
Er :=  $\frac{2.345538584}{\frac{1}{2}\pi + 2.345538584}$ 
> evalf(Er);
0.5989116450
>
> θmr := arctan(1.7·(Kor - 0.125)^0.76);
θmr := 1.260362240
> smr := rr·θmr ÷ cr;
smr := 0.01004508705
>

```

```

>  $\beta_r := Ua \cdot LWCr \cdot ((\beta_{or} \cdot \cos((\text{Pi} \cdot (s \cdot cr \div rr)) \div (2$ 
   $\cdot \theta_{mr})) + (((\text{Pi}^3) \div (\theta_{mr}^3 \cdot (\text{Pi}^2$ 
   $- 4))) \cdot (Er - (2 \cdot \theta_{mr} \cdot \beta_{or} \div \text{Pi})) \cdot ((s \cdot cr$ 
   $\div rr)^2) \cdot (\sin(\text{Pi} \cdot (s \cdot cr \div rr) \div \theta_{mr})))));$ 

$$\beta_r := 7.689682532 \cos(49.77557658 \pi s)$$


$$+ \frac{1}{\pi^2 - 4} \left( 82563.19790 \pi^3 \left( 1 / \right.$$


$$\left. \left( \frac{1}{2} \pi + 2.345538584 \right) 2.345538584 \right.$$


$$\left. - \frac{1.846054381}{\pi} \right) s^2 \sin(99.55115317 \pi s)$$

> plot( $\beta_r$ , s = -smr ..smr);

```

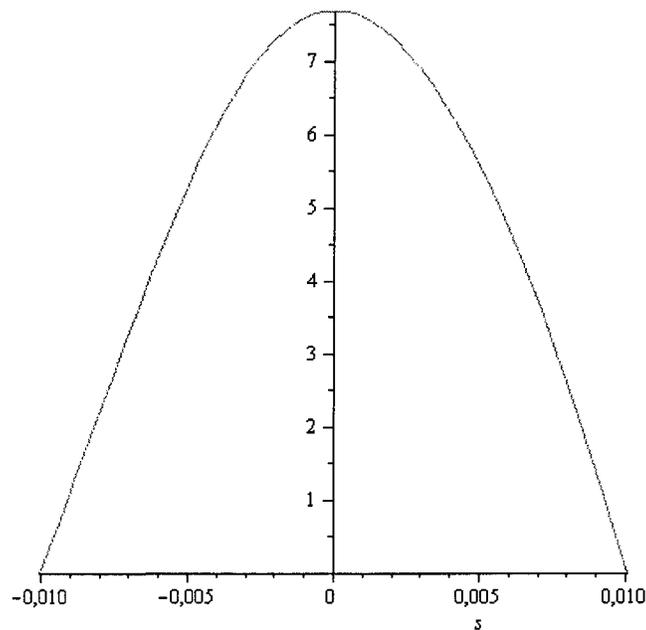


Figure A.7 : Collection de l'eau sur la pale réelle à la position 2

```

> plot([ $\beta_r$ ,  $\beta_s$ ], s = -sms ..sms, color = [red, blue],
  style = [line, line])

```

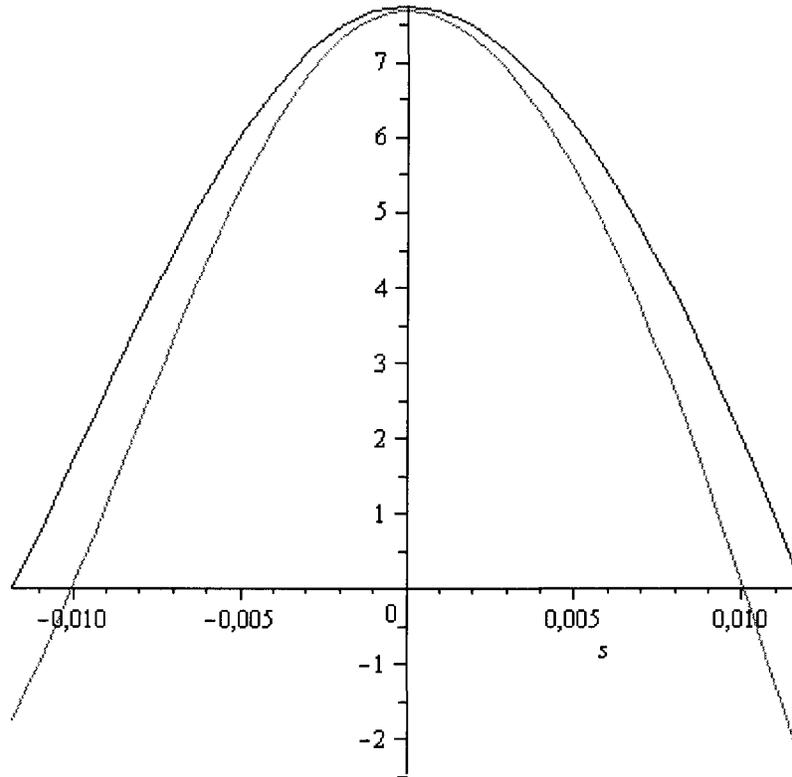


Figure A.8 : Résultats des calculs

>

ANNEXE B

ÉTALONNAGE DE LA TENEUR EN EAU LIQUIDE

ANNEXE B

ÉTALONNAGE DE LA TENEUR EN EAU LIQUIDE

Introduction

L'un des principaux facteurs permettant de caractériser un événement givrant est la teneur en eau liquide (LWC). La teneur en eau liquide est la quantité d'eau liquide présente sous forme de gouttelettes dans un mètre cube d'air humide. Elle s'exprime en g/m^3 . Dans la soufflerie réfrigérée du LIMA, les gouttelettes d'eau présentes dans l'air proviennent de la rampe de gicleurs située en amont de la zone d'essai qui fait un balayage vertical favorisant une uniformité de la teneur en eau (**Figure B.1**). La rampe est composée de 9 gicleurs équidistants numérotés de 1 à 9 (droite à gauche). Le débit d'eau de chaque gicleur et la pression d'air dans les gicleurs sont contrôlés manuellement (**Figure B.2**). En raison de la largeur du profil qui ne couvrait pas totalement la largeur de la section d'essai, seulement les gicleurs 2 à 8 ont été activés. Ce sont ces gicleurs qui sont sur l'image de la **Figure B.1**.

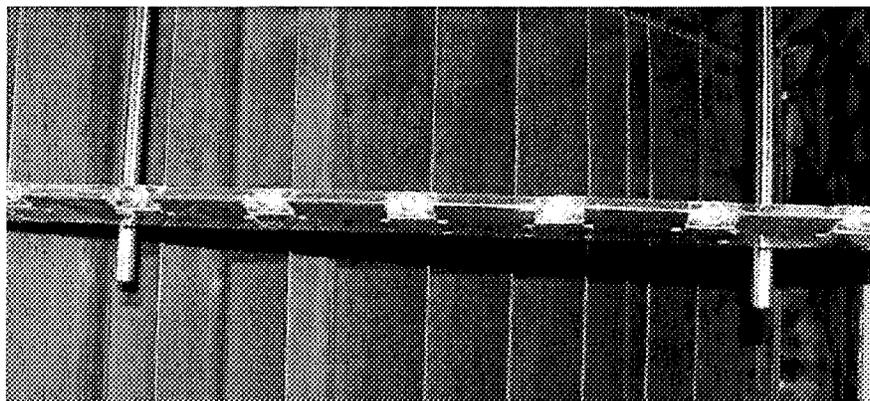


Figure B.1 : Rampe de gicleurs

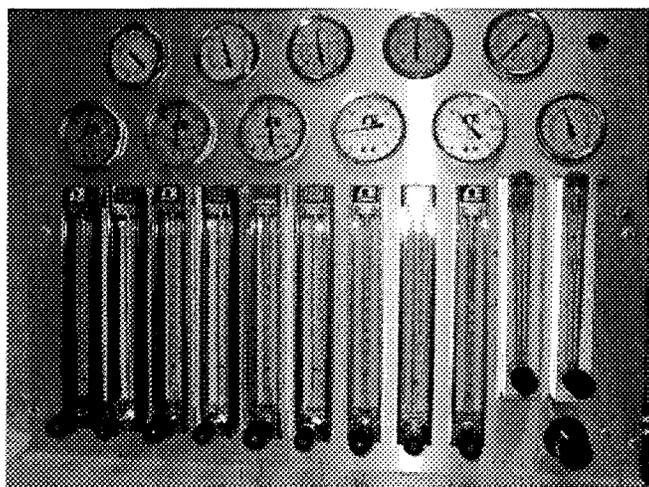


Figure B.2 : Panneau de contrôle de la rampe de gicleurs

B.1. Équations

La masse d'eau capturée par précipitation est donnée par [40] :

$$m_{capt} = \beta \times LWC \times U_a \times A \times t \quad (\text{Équation B.1})$$

D'où

$$LWC = \frac{m_{capt}}{\beta \times U_a \times A \times t} \quad (\text{Équation B.2})$$

D'autre part,

$$m_{capt} = \rho_{glace} \times V_{glace} = \rho_{glace} \times A \times e \quad (\text{Équation B.3})$$

Où e est l'épaisseur de glace accumulée sur le profil. On a donc la nouvelle expression de la teneur en eau liquide :

$$LWC = \frac{\rho \times e}{\beta \times U_a \times t} \quad (\text{Équation B.4})$$

La teneur en eau liquide est donc évaluée à partir de l'épaisseur de glace accumulée.

B.2. Procédure expérimentale

Le profil de pale est installé dans la section d'essai. La vitesse du vent et la température de l'air dans la soufflerie sont ensuite réglées aux valeurs désirées grâce à l'interface du logiciel de contrôle des conditions climatiques « *Soufflerie 2000* ». Le temps de précipitations doit être suffisant pour permettre une accumulation suffisante, facilement mesurable. Une fois le profil de pale givré (Figure B.3), l'épaisseur de glace est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse (Figure B.4) à 10 positions différentes le long de la pale. La teneur en eau liquide est ensuite calculée à l'aide du logiciel Microsoft Excel. La valeur du coefficient de collection β de l'équation B.4 pour chaque condition est lue sur des courbes pré-tracées (Figure B.5).

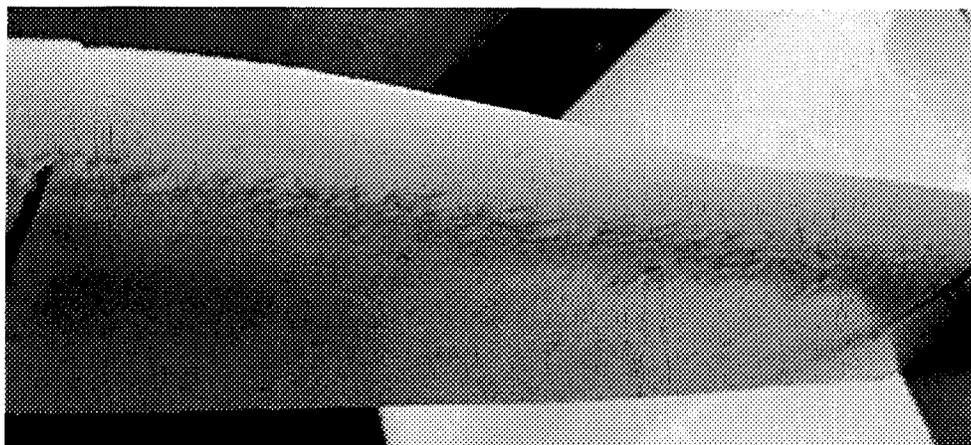


Figure B.3 : Profil givré lors d'un essai d'étalonnage

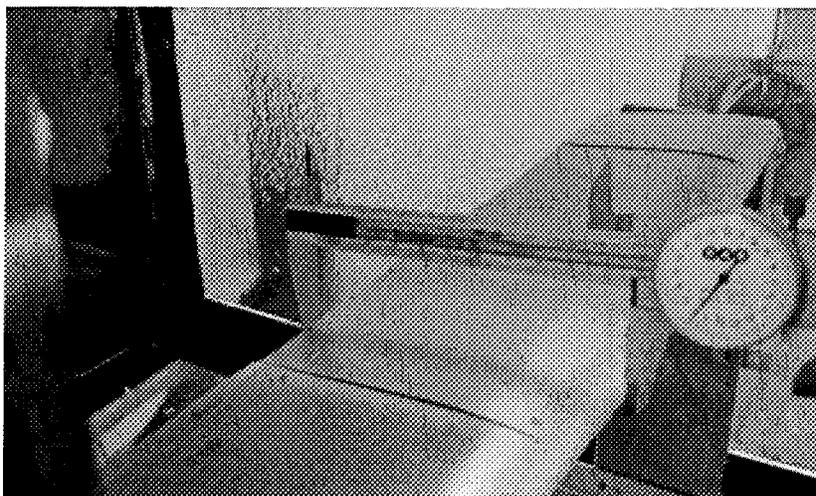


Figure B.4 : Mesures expérimentales

L'étalonnage d'une condition climatique nécessite un certain nombre d'essais. En effet, l'obtention de la teneur en eau désirée nécessite un débit particulier et l'uniformité de la teneur en eau demande une combinaison particulière des débits de chacun des gicleurs. Il faut donc y aller par progressivement en ajustant (à la hausse ou à la baisse) le débit d'un ou de plusieurs gicleurs, jusqu'à avoir la valeur de teneur en eau désirée avec la variation le long du profil la moins élevée possible. Dès qu'on obtient les débits des

gicleurs qui permettent d'avoir une teneur en eau la plus uniforme possible, on la répète une fois dans le but de vérifier la reproductibilité du résultat.

La température de l'air n'a aucune influence sur la teneur en eau liquide. Néanmoins les essais ont été effectués à -20°C pour assurer que toute l'eau captée par le profil gèle complètement à l'impact. À des températures plus chaudes, une fraction de l'eau qui arrive sur le profil ne gèle pas, mais s'écoule sur sa surface. Plus la température est élevée, plus la fraction d'eau qui s'écoule est importante.

Tableau B.1 : Conditions climatiques à étalonner

Condition	$C_{\text{Réelle}}$ (m)	C_{scale} (m)	$U_{\text{Réelle}}$ (m/s)	U_{scale} (m/s)	$LWC_{\text{Réelle}}$ (g/m^3)	LWC_{scale} (g/m^3)
1	2,15	0,1016	35	21	0,3	0,4
2	1,29	0,1016	50	33	0,3	0,4

Tableau B.2 : Conditions d'essai dans la soufflerie pour les étalonnages

Condition	Température de l'air réelle ($^{\circ}\text{C}$)	Pression d'air (kPa)	Durée (s)	Vitesse (m/s)	MVD (μm)	Coefficient de collection β
1	-18	310	600	21	27	0,77
2	-18	310	600	33	27	0,80

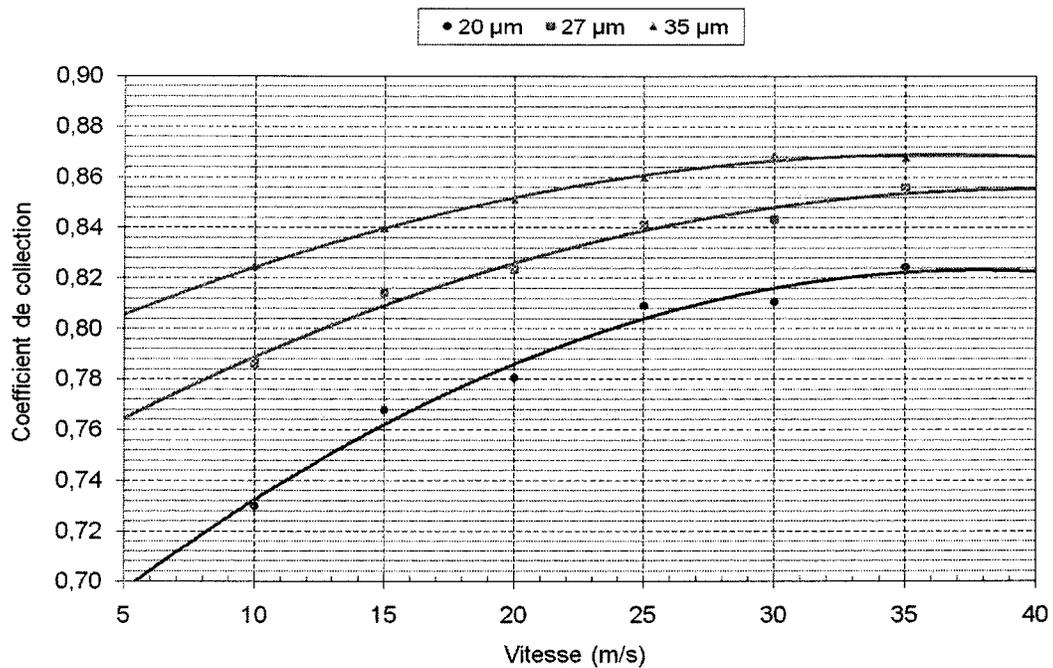


Figure B.5 : Courbes montrant le coefficient de collection local en fonction de la vitesse et pour un diamètre de gouttelettes donné

B.3. Résultats

Les essais de ce projet s'étant étalés sur deux périodes (juillet à décembre 2009 et juin à juillet 2010), deux séries d'étalonnage de la teneur en eau liquide ont donc été faites. Le premier étalonnage a été fait en juillet 2009 et le second a été fait en juin 2010. Les résultats des étalonnages sont présentés aux figures B.6 à B.9.

Calcul de la teneur en eau liquide (LWC)

$m =$	$\rho A e =$	$\beta LWC U A t$
	$e =$	$\beta LWC U t / \rho$
$LWC =$	$e \rho / (\beta U t)$	$RH_0 \quad 790$
$LWC =$	$0,203 \quad g/m^2 \pm$	$0,015 \quad g/m^2$
β	U	T
$0,77$	21 m/s	$-20 \text{ }^\circ\text{C}$
		t
		10 min

TEST 1

Profil	101,20	101,02	100,82	100,75	100,74	100,72	100,86	100,76	100,88	100,80	100,90	mm
Profil givré	105,90	105,66	105,52	105,16	105,88	105,66	105,66	105,70	107,20	106,88	105,00	mm
Épaisseur	4,70	4,64	4,70	4,41	5,14	4,94	4,80	4,94	6,32	6,08	4,10	mm
LWC	0,383	0,378	0,383	0,359	0,419	0,402	0,391	0,402	0,515	0,495	0,334	g/mm ²

Corde	Épaisseur (mm)	LWC (g/m ²)	
101,6 mm	Moyenne: 4,98	0,436	0,405
MVD	Ecartype: 0,67	0,058	0,054
26,7 μm	% : 13,4	13,4	13,4

Figure B.6 : Fichier de calcul retenu pour l'étalonnage de la condition 1 (Essai de juillet 2009)

Calcul de la teneur en eau liquide (LWC)

$m =$	$\rho A e =$	$\beta LWC U A t$
	$e =$	$\beta LWC U t / \rho$
LWC =	$e \rho / (\beta U t)$	Résultat
LWC =	0,215	$g/m^3 \pm 0,014$
		790
β	U	T
0,77	21 m/s	-20 °C
		t
		10 min

TEST 1

Profil	101,20	101,02	100,82	100,75	100,74	100,72	100,86	100,76	100,88	100,80	100,90	mm
Profil givré	105,78	105,84	105,90	106,04	105,60	105,74	105,74	106,03	106,68	107,16	107,10	mm
Épaisseur	4,58	4,82	5,08	5,29	4,86	5,02	4,88	5,27	5,80	6,36	6,20	mm
LWC	0,373	0,392	0,414	0,431	0,396	0,409	0,397	0,429	0,472	0,518	0,505	g/mm^3

Corde	Épaisseur (mm)		LWC (g/m^3)	
101,6 mm	Moyenne:	5,29	0,463	0,431
MVD	Ecartype:	0,59	0,051	0,048
26,7 μm	% :	11,1	11,1	11,1

Figure B.7 : Fichier de calcul retenu pour l'étalonnage de la condition 1 (Essai de juin 2010)

Calcul de la teneur en eau liquide (LWC)

$m =$	$\rho A e =$	$\beta LWC U A t$
	$e =$	$\beta LWC U t / \rho$
LWC =	$e \rho / (\beta U t)$	RH0
LWC =	0,209	g/m ³ ± 0,031
		790
β	U	T
0,80	33 m/s	-18 °C
		t
		10 min

TEST 1

Profil	101,20	101,02	100,82	100,75	100,74	100,72	100,86	100,76	100,88	100,80	100,90	mm
Profil gelé	107,60	108,00	109,00	109,64	109,00	108,78	109,08	110,40	111,00	110,52	108,80	mm
Épaisseur	6,40	6,98	8,18	8,89	8,26	8,06	8,22	9,64	10,12	9,72	7,90	mm
LWC	0,319	0,348	0,408	0,443	0,412	0,402	0,410	0,481	0,505	0,485	0,394	g/mm ³

Corde	Épaisseur (mm)		LWC (g/m ³)	
101,6 mm	Moyenne:	8,40	0,451	0,419
MVD	Ecartype:	1,14	0,061	0,057
26,7 µm	% :	13,6	13,6	13,6

Figure B.8 : Fichier de calcul retenu pour l'étalonnage de la condition 2 (Essai de juillet 2009)

Calcul de la teneur en eau liquide (LWC)

$m =$	$\rho A e =$	$\beta LWC U A t$
	$e =$	$\beta LWC U t / \rho$
$LWC =$	$e \rho / (\beta U t)$	RH_0
$LWC =$	$0,199$	$g/m^2 \pm 0,013$
β	U	T
$0,80$	33 m/s	-18 °C
		t
		10 min

TEST 1

Profil	101,20	101,02	100,82	100,75	100,74	100,72	100,86	100,76	100,88	100,80	100,90	mm
Profil givré	108,88	109,24	107,98	108,58	108,40	108,41	108,48	108,48	109,48	109,80	109,58	mm
Épaisseur	7,68	8,22	7,16	7,83	7,66	7,69	7,62	7,72	8,60	9,00	8,68	mm
LWC	0,383	0,410	0,357	0,391	0,382	0,384	0,380	0,385	0,429	0,449	0,433	g/mm ²

Corde	Épaisseur (mm)		LWC (g/m ²)	
101,6 mm	Moyenne:	7,99	0,429	0,398
MVD	Ecartype:	0,56	0,030	0,028
26,7 µm	% :	7,0	7,0	7,0

Figure B.9 : Fichier de calcul retenu pour l'étalonnage de la condition 2 (Essai de juin 2010)

ANNEXE C

PRÉSENTATION DES ESSAIS

ANNEXE C

PRÉSENTATION DES ESSAIS

Trois catégories d'essais ont été réalisées dans le cadre de ce projet. La première série d'essais consiste en des essais simples d'accumulation (section C.1) alors que les deux autres sont des essais de dégivrage (sections C.2 et C.3). La première de ces deux séries d'essais de dégivrage est faite en utilisant le mode « antigivrage » et l'autre série, en utilisant le mode « dégivrage ».

Le tableau ci-dessous présente la liste des conditions climatiques utilisées pour ces trois séries d'essais à moins d'indications contraires.

Tableau C.1 : Conditions climatiques

Condition #	U_{air} (m/s)	T_{air} (°C)	LWC (g/m ³)
1	21	-5	0,4
2	33	-5	0,4
3	21	-20	0,4
4	33	-20	0,4

C.1. Essais d'accumulation

Au total 17 essais d'accumulation de glace ont été réalisés suivant les deux régimes d'accrétion (humide et sec) sur les trois revêtements, la pale revêtue de la pellicule plastique et la pale non revêtue. Les sections C.1.1 à C.1.15 présentent de façon détaillée les essais retenus.

C.1.1. Essai n°38

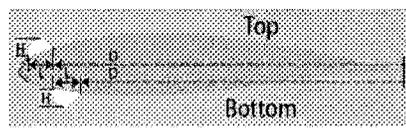
Cet essai a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique, sans aucune couche de revêtement hydrophobe ou superhydrophobe.

Objectifs :

Obtenir la forme de glace en régime humide.

Résultats

Tableau C.2 : Formes de glace pour l'essai n°38

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,732	2,336	0,144	8,059	1,854	0,224	

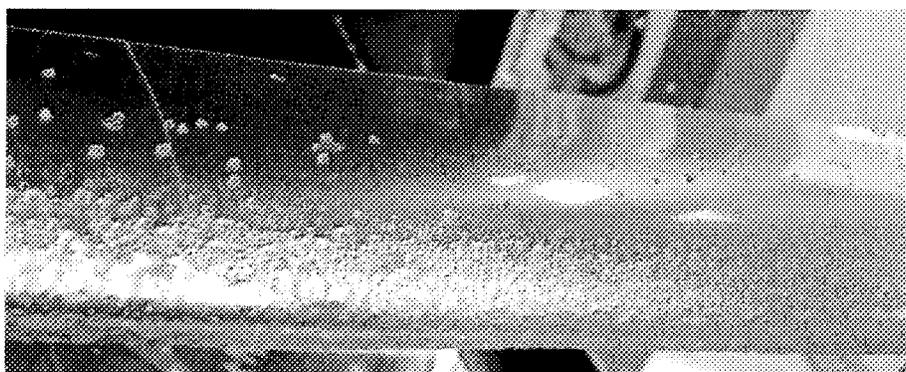


Figure C.1 : Image de la pale à la fin de l'essai n°38

C.1.1. Essai n°40

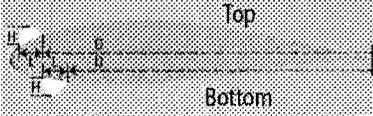
Cet essai a été fait sous la condition climatique n°2 avec la pale revêtue de la pellicule plastique, sans aucune couche de revêtement hydrophobe ou superhydrophobe.

Objectifs :

Obtenir la forme de glace en régime humide à forte vitesse.

Résultats

Tableau C.3 : Formes de glace pour l'essai n°40

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
8,336	2,03	0,342	9,384	1,134	0,428	

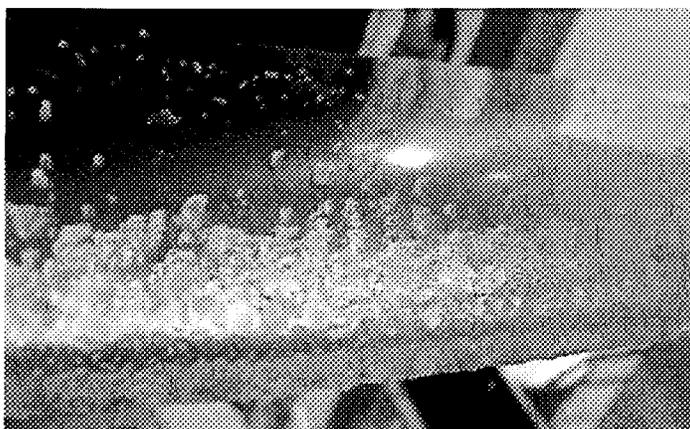


Figure C.2 : Image de la pale à la fin de l'essai n° 40

C.1.2. Essai n°27

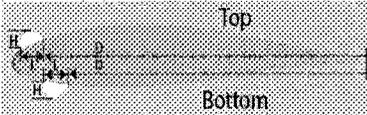
Cet essai a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique, sans aucune couche de revêtement hydrophobe ou superhydrophobe.

Objectifs :

Obtenir la forme de glace en régime sec.

Résultats

Tableau C.4 : Formes de glace pour l'essai n°27

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,882	2,228	0,459	7,936	1,912	0,459	

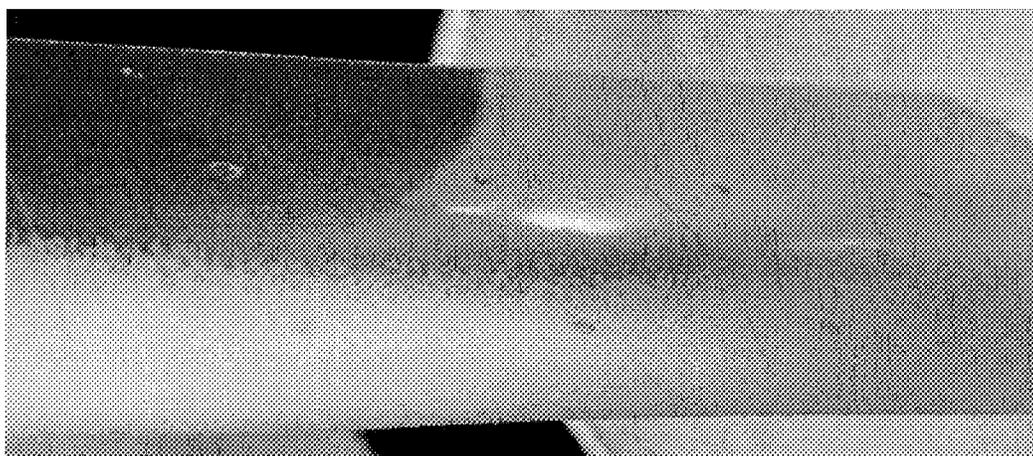


Figure C.3 : Image de la pale à la fin de l'essai n° 27

C.1.3. Essai n°26

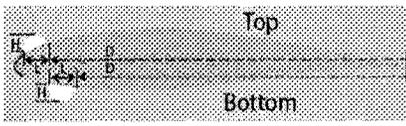
Cet essai a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale revêtue de la pellicule plastique, sans aucune couche de revêtement hydrophobe ou superhydrophobe.

Objectifs :

Obtenir la forme de glace en régime sec avec une forte vitesse.

Résultats

Tableau C.5 : Formes de glace pour l'essai n°26

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,536	2,414	0,477	8,18	1,878	0,477	

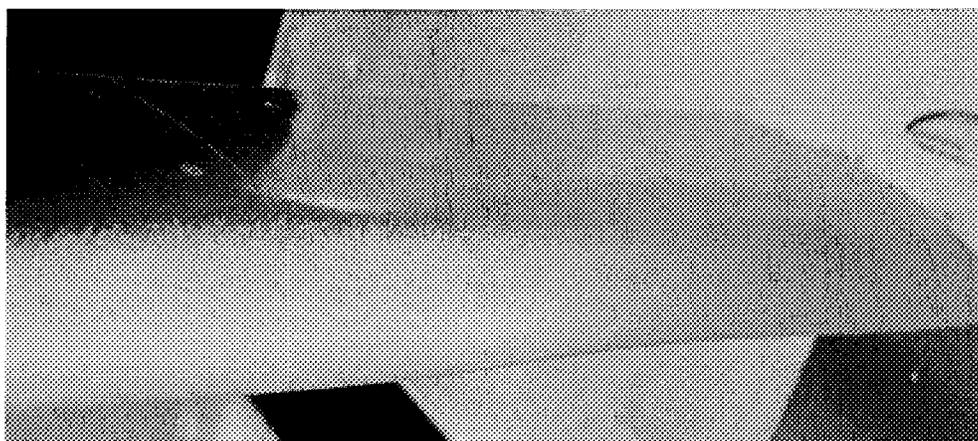


Figure C.4 : Image de la pale à la fin de l'essai n° 26

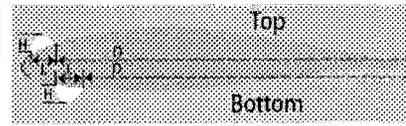
C.1.4. Essai n°56

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime humide avec le HIREC 1450 et faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°38, 67 et 74.

Résultats

Tableau C.6 : Formes de glace pour l'essai n°56

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
8,038	2,296	0,08	8,614	1,292	0,032	

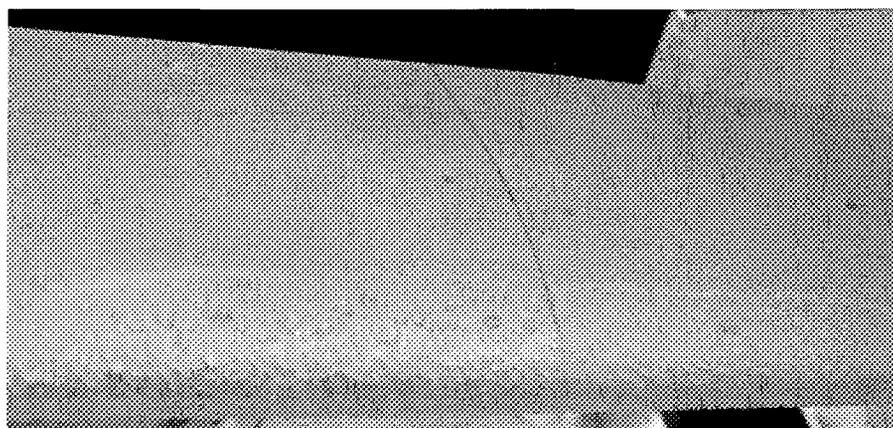


Figure C.5 : Image de la pale à la fin de l'essai n° 56

C.1.5. Essai n°99

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°2 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime humide à forte vitesse, avec ce revêtement et faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°40.

Résultats

Tableau C.7 : Formes de glace pour l'essai n°99

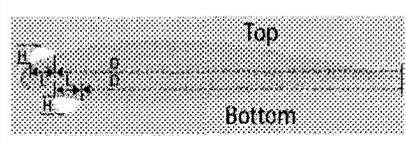
D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,55	2,562	0,160	9,02	0,9	0,164	



Figure C.6 : Image de la pale à la fin de l'essai n° 99

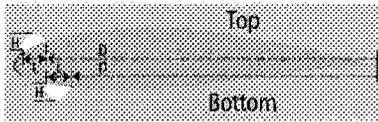
C.1.6. Essai n°50

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime sec avec ce revêtement et faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°27, 61 et 81.

Résultats

Tableau C.8 : Formes de glace pour l'essai n°50

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
8,316	2,166	0,112	8,437	0,838	0,122	

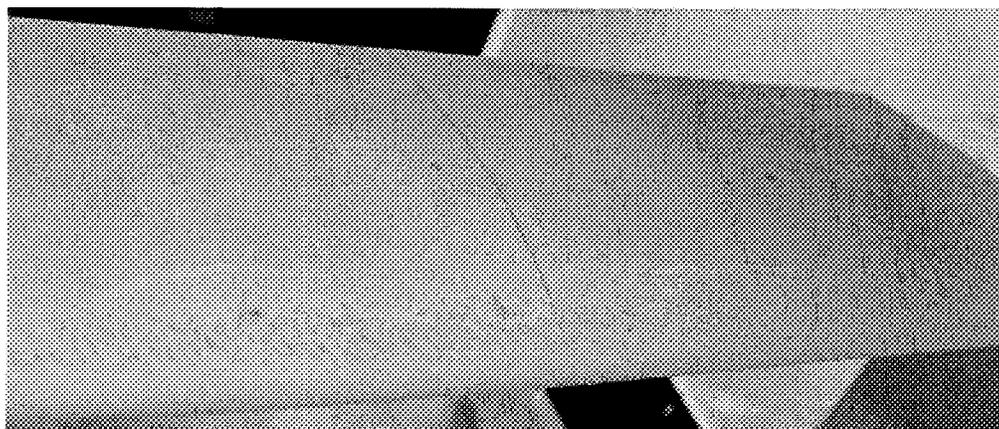


Figure C.7 : Image de la pale à la fin de l'essai n°50

C.1.7. Essai n°89

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime sec à forte vitesse et faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°26.

Résultats

Tableau C.9 : Formes de glace pour l'essai n°89

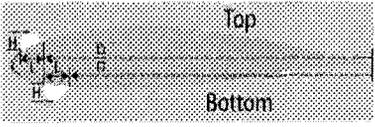
D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,444	2,766	0,365	8,535	1,494	0,352	



Figure C.8 : Image de la pale à la fin de l'essai n° 89

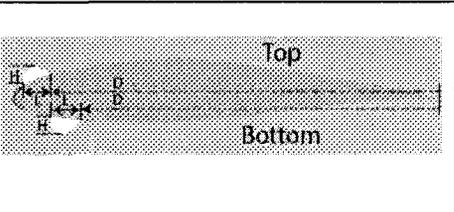
C.1.8. Essai n°141

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450

Objectifs : Reprise de l'essai n°89.

Résultats

Tableau C.10 : Formes de glace pour l'essai n°141

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,96	2,232	0,1	8,2	1,3	0,10	

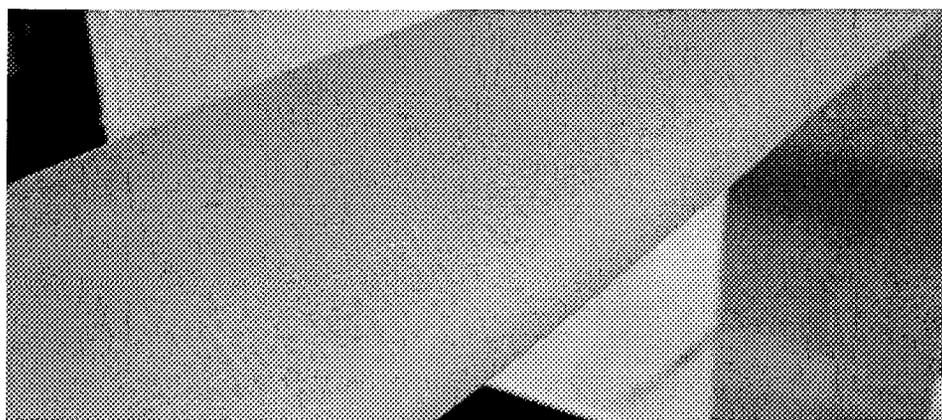


Figure C.9 : Image de la pale à la fin de l'essai n° 141

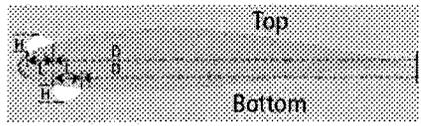
C.1.9. Essai n°67

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le StaClean™

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime humide avec ce revêtement et faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°38, 56 et 74.

Résultats

Tableau C.11 : Formes de glace pour l'essai n°67

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
8,159	2,429	0,086	8,496	0,954	0,086	

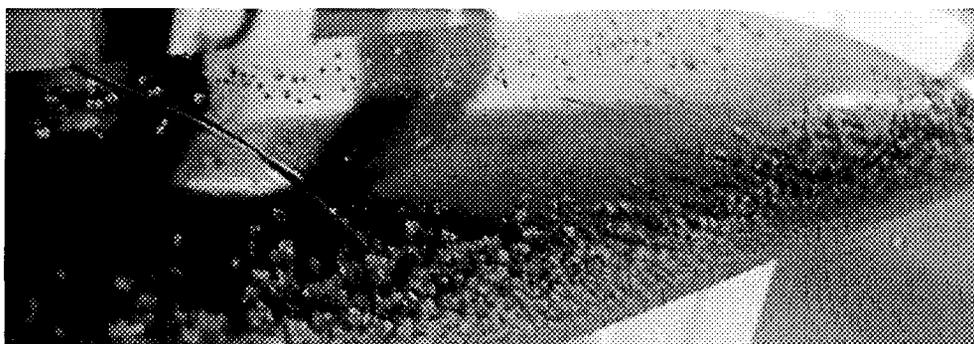


Figure C.10 : Image de la pale à la fin de l'essai n° 67

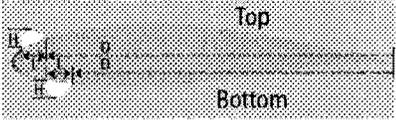
C.1.10. Essai n°61

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le StaClean™.

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime sec avec ce revêtement et faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°27, 50 et 81.

Résultats

Tableau C.12 : Formes de glace pour l'essai n°61

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
7,774	2,344	TRACES	8,49	1,254	TRACES	

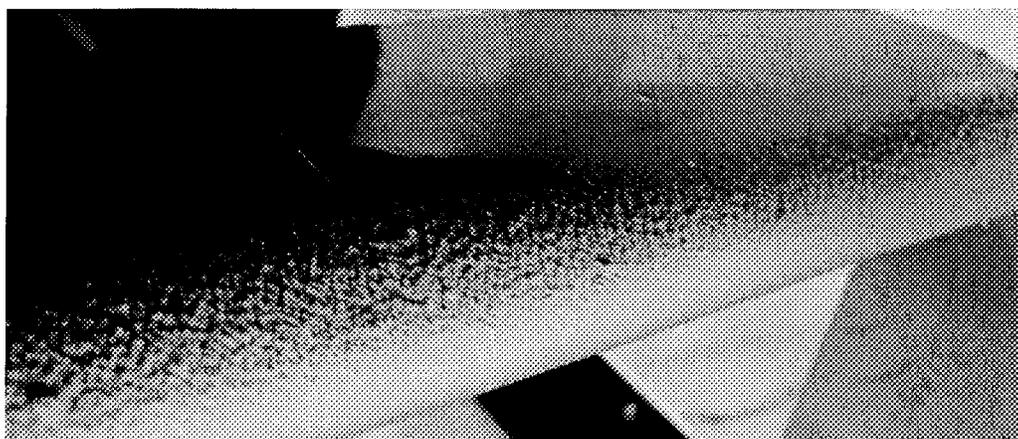


Figure C.11 : Image de la pale à la fin de l'essai n°61

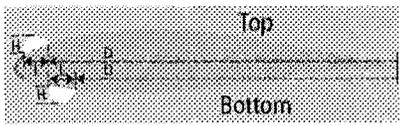
C.1.11. Essai n°74

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le Wearlon F1-Ice.

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime humide avec ce revêtement et faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°38, 56 et 67.

Résultats

Tableau C.13 : Formes de glace pour l'essai n°74

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,9	1,942	0,104	9,067	0,764	0,074	

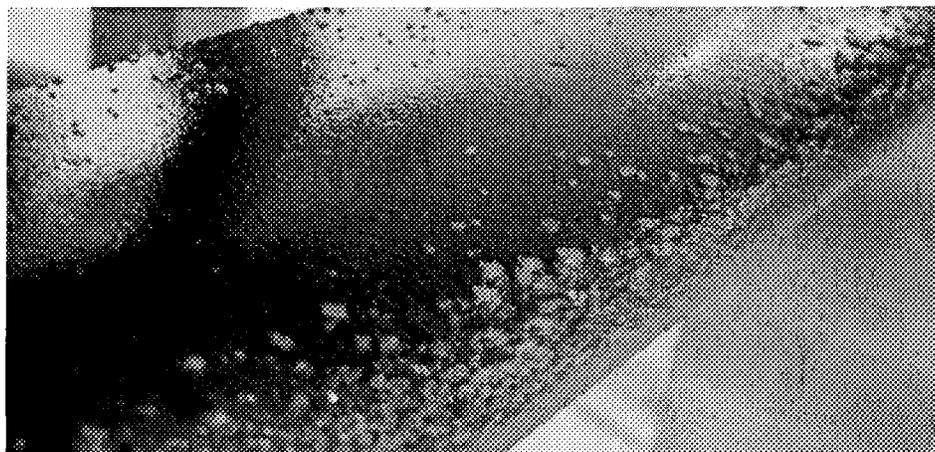


Figure C.12 : Image de la pale à la fin de l'essai n°74

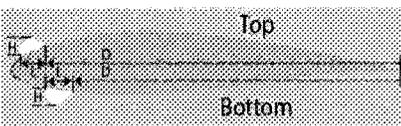
C.1.12. Essai n°81

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le Wearlon F1-Ice.

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime sec avec ce revêtement et faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°27, 50 et 61.

Résultats

Tableau C.14 : Formes de glace pour l'essai n°81

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,774	2,294	0,184	8,99	1,2	0,14	

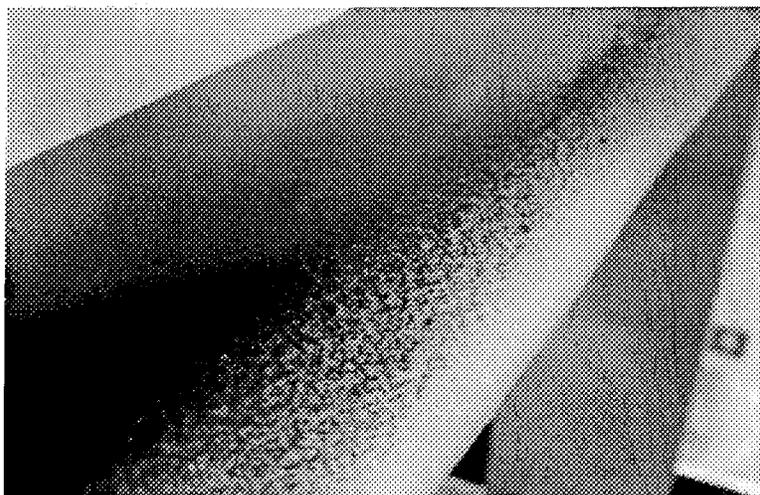


Figure C.13 : Image de la pale à la fin de l'essai n°81

C.1.13. Essai n°131

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale sans aucun revêtement et sans la pellicule plastique.

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime humide et faire une comparaison avec la pale revêtue de la pellicule pour voir l'influence de la présence de la pellicule.

Résultats

Tableau C.15 : Formes de glace pour l'essai n°131

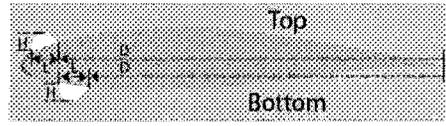
D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,808	2,192	0,1	8,564	1,208	0,088	



Figure C.14 : Image de la pale à la fin de l'essai n°131

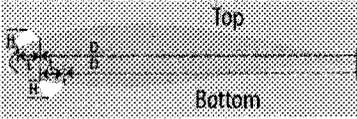
C.1.14. Essai n°126

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale sans aucun revêtement et sans la pellicule plastique.

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime sec et faire une comparaison avec la pale revêtue de la pellicule pour voir l'influence de la présence de la pellicule.

Résultats

Tableau C.16 : Formes de glace pour l'essai n°126

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,854	2,556	0,1	8,0	1,366	0,034	

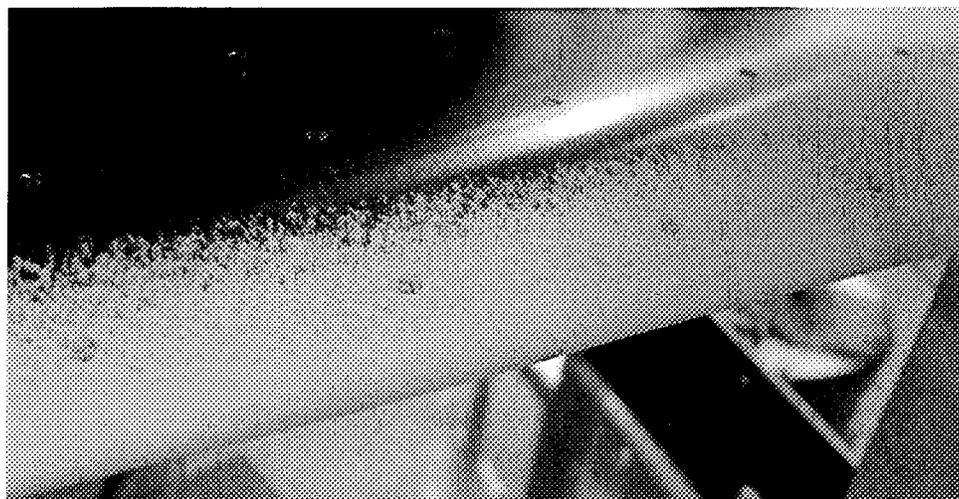


Figure C.15 : Image de la pale à la fin de l'essai n°126

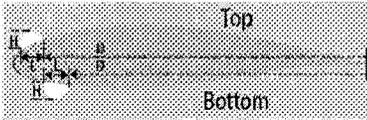
C.1.15. Essai n°129

Cet essai a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale sans aucun revêtement et sans la pellicule plastique.

Objectifs : Obtenir la forme de glace en régime sec avec une forte vitesse et faire une comparaison avec la pale revêtue de la pellicule pour voir l'influence de la présence de la pellicule.

Résultats

Tableau C.17 : Formes de glace pour l'essai n°129

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,39	2,874	0,1	7,906	1,776	0,1	

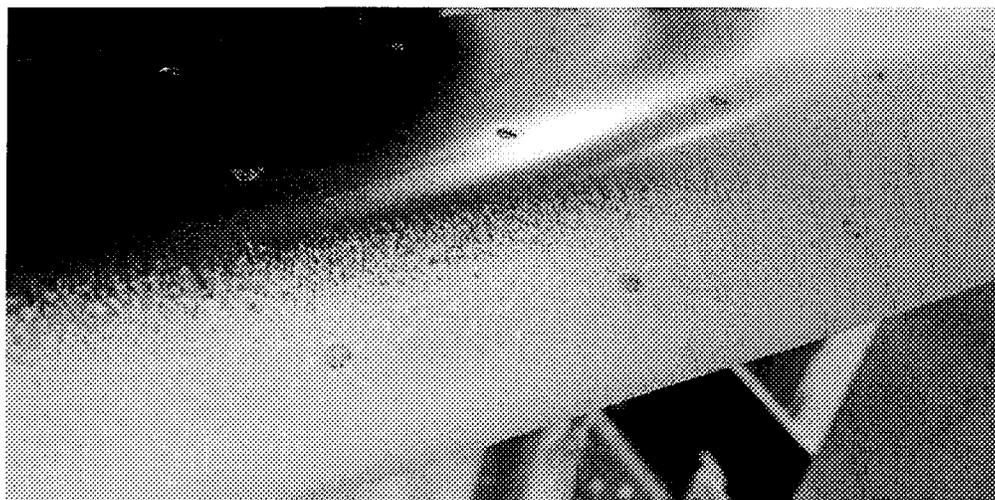


Figure C.16 : Image de la pale à la fin de l'essai n°129

C.2. Essais en mode antigivrage

Les sections C.2.1 à C.2.42 présentent de façon détaillée les essais.

C.2.1. Essai n°37

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue juste de la pellicule plastique.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour la pellicule plastique.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°60,72 et 77 en ce qui concerne le comportement sous ruissellement et la valeur de P_{seuil} .
- Faire aussi une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°133, 55,68 et 73.

Résultats

Tableau C.18 : Tableau des conditions pour l'essai n°37

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,7	$\pm 0,2$	-4,2	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.19 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/ po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
3	6	9,1	±0,1	14,8	±0,2	0,7	±0,2	3,1	±0,1

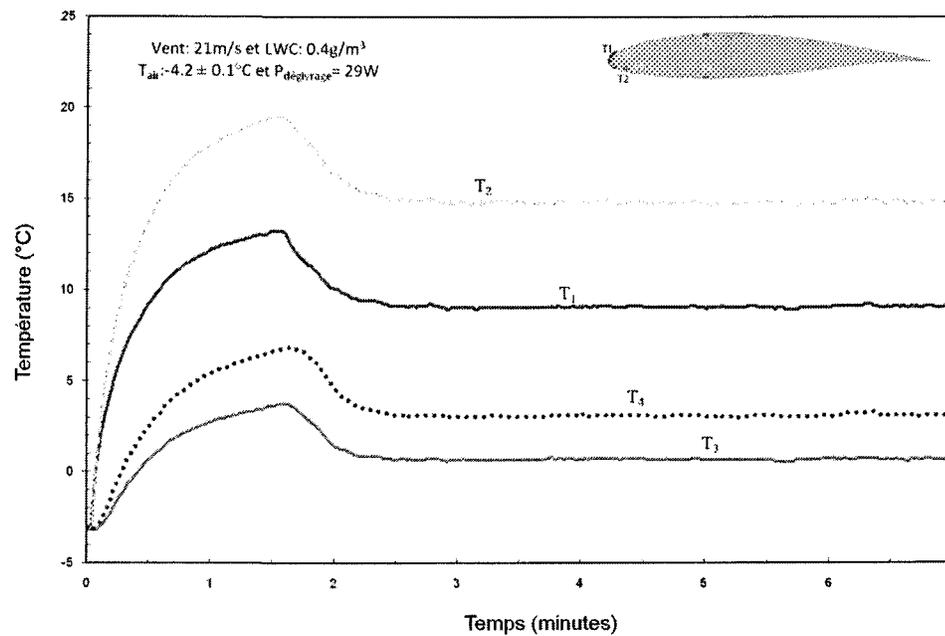


Figure C.17 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°37

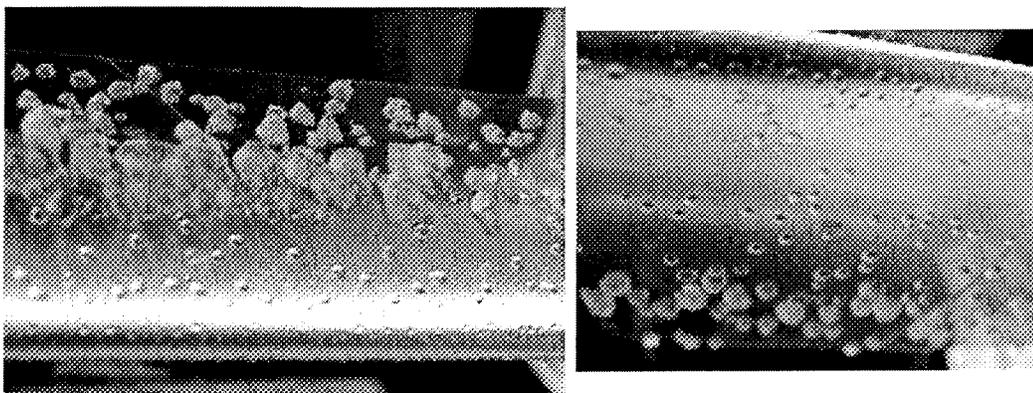
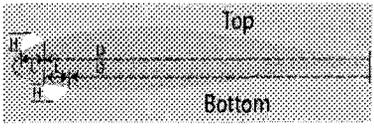


Figure C.18 : Image de la pale à la fin de l'essai n°37

Tableau C.20 : Formes de glace pour l'essai n°37

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
5,69	1,96	0,24	3,424	1,782	0,4	

C.2.2. Essai n°133

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale sans aucun revêtement et sans la pellicule plastique.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°37, 55,68 et 73.

Résultats

Tableau C.21 : Tableau des conditions pour l'essai n°133

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μ m)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,8	$\pm 0,1$	-5,2	$\pm 0,0$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.22 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
3	6	5,4	$\pm 0,2$	12,1	$\pm 0,3$	-1,7	$\pm 0,2$	0,6	$\pm 0,2$

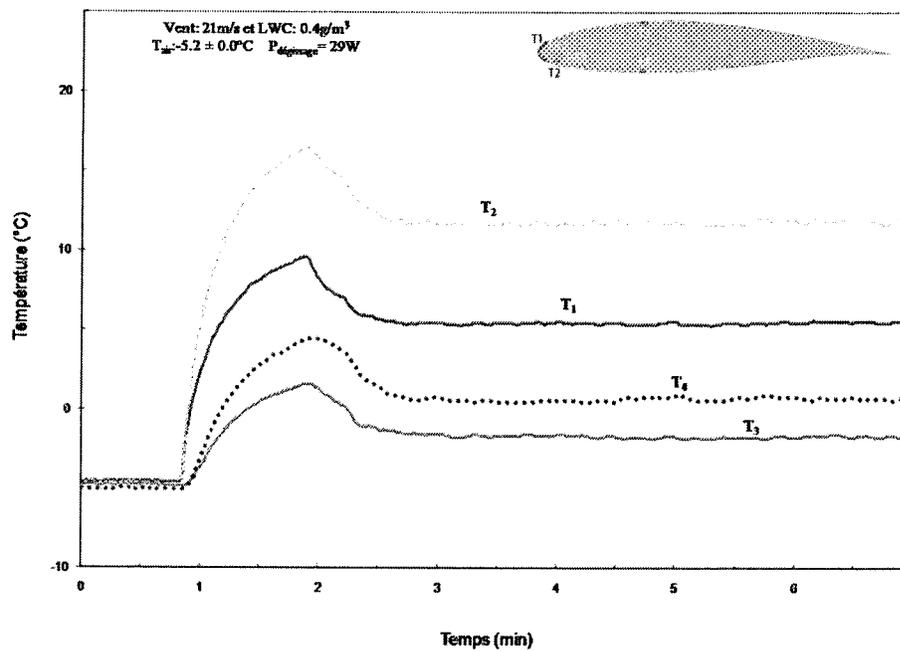


Figure C.19 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°133

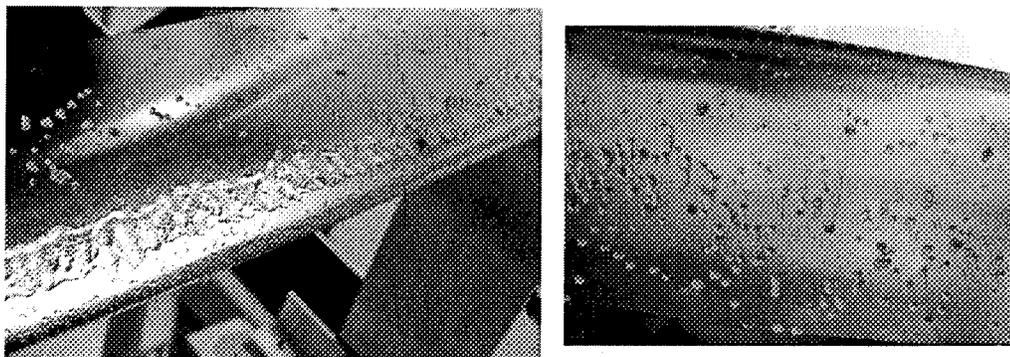
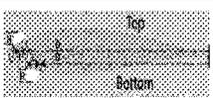


Figure C.20 : Image de la pale à la fin de l'essai n°133

Tableau C.23 : Formes de glace pour l'essai n°133

$D_{\text{Top}}(\text{cm})$	$L_{\text{Top}}(\text{cm})$	$H_{\text{Top}}(\text{cm})$	$D_{\text{Bottom}}(\text{cm})$	$L_{\text{Bottom}}(\text{cm})$	$H_{\text{Bottom}}(\text{cm})$	
7,764	1,202	0,13	3,632	2,06	0,074	

C.2.3. Essai n°55

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°37, 68, 133, et 73.

Résultats

Tableau C.24 : Tableau des conditions pour l'essai n°55

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,6	±0,2	-5	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.25 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
3	6	11,9	±0,1	19,2	±0,2	3,9	±0,3	4,3	±0,1

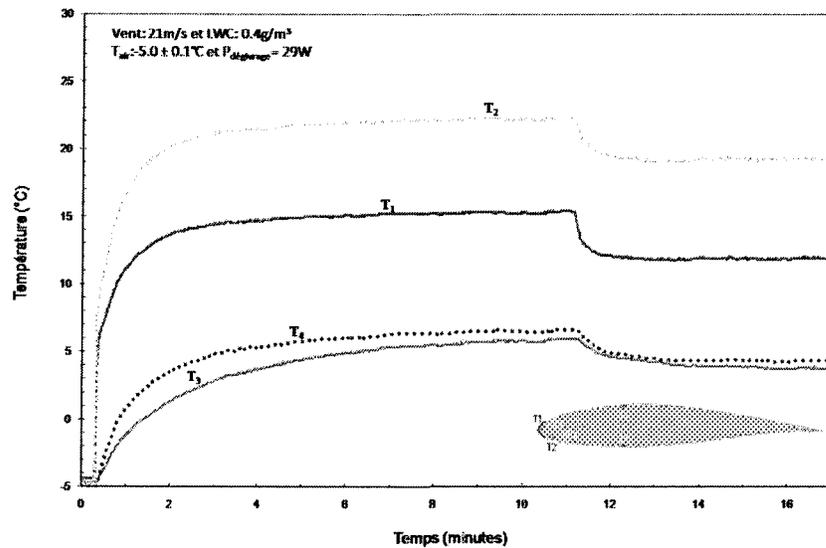


Figure C.21 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°55

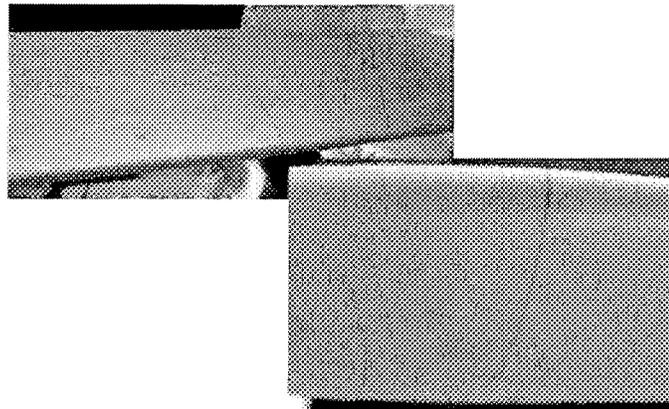
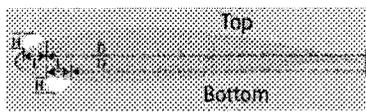


Figure C.22 : Image de la pale à la fin de l'essai n°55

Tableau C.26 : Formes de glace pour l'essai n°55

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
0	0	0	0	0	0	

NB : Juste quelques gouttelettes sur l'extrados vers l'arrière.

C.2.4. Essai n°68

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le StaClean™.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°37, 133, 55 et 73.

Résultats

Tableau C.27 : Tableau des conditions pour l'essai n°68

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,9	±0,1	-5,3	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.28 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
3	6	11,5	±0,3	17,7	±0,4	2,4	±0,6	2	±0,4

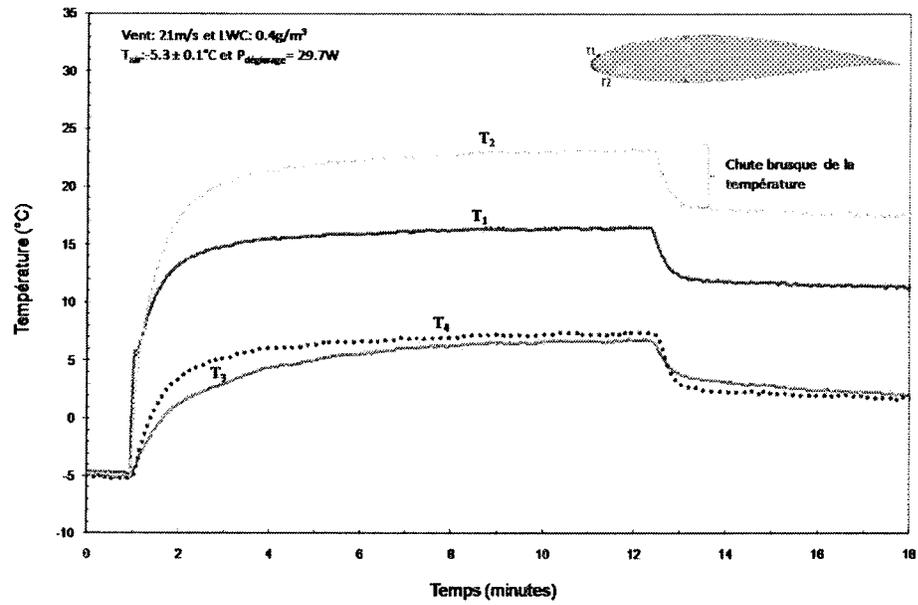


Figure C.23 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°68

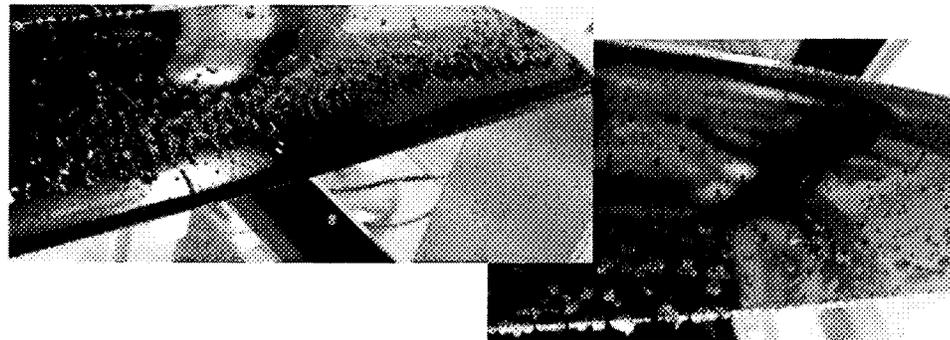


Figure C.24 : Image de la pale à la fin de l'essai n°68

Tableau C.29 : Formes de glace pour l'essai n°68

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
5,872	2,153	0,162	3,536	1,44	0,142	

C.2.5. Essai n°73

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le Wearlon F1-Ice.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°37, 133, 55 et 68.

Résultats

Tableau C.30 : Tableau des conditions pour l'essai n°73

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,7	±0,2	-5,4	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.31 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
3	6	12,6	±0,2	19,0	±0,3	3,1	±0,1	3,5	±0,3

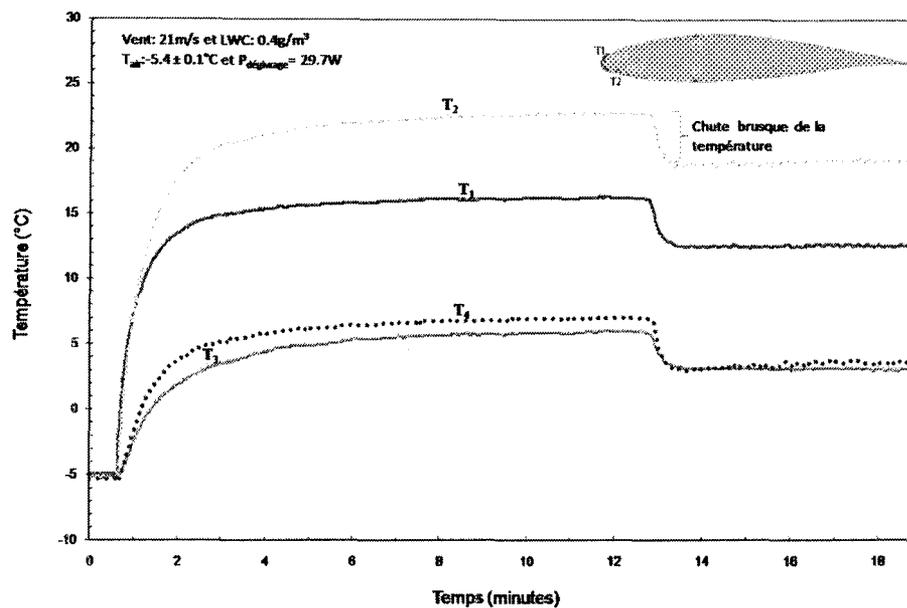
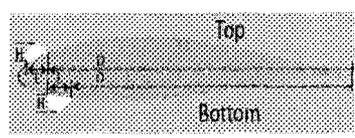


Figure C.25 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°73



Figure C.26 : Image de la pale à la fin de l'essai n°73

Tableau C.32 : Formes de glace pour l'essai n°73

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
5,094	0	0	2,4	0	0	

NB : Quelques gouttelettes en dessous et au dessus vers l'arrière de la pale.

C.2.6. Essai n°79

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le Wearlon F1-Ice.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°73.

Résultats

Tableau C.33 : Tableau des conditions pour l'essai n°79

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,8	±0,2	-5,4	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.34 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
1,5	6	3,6	±0,4	6,8	±0,3	-0,9	±0,4	-1,4	±0,3

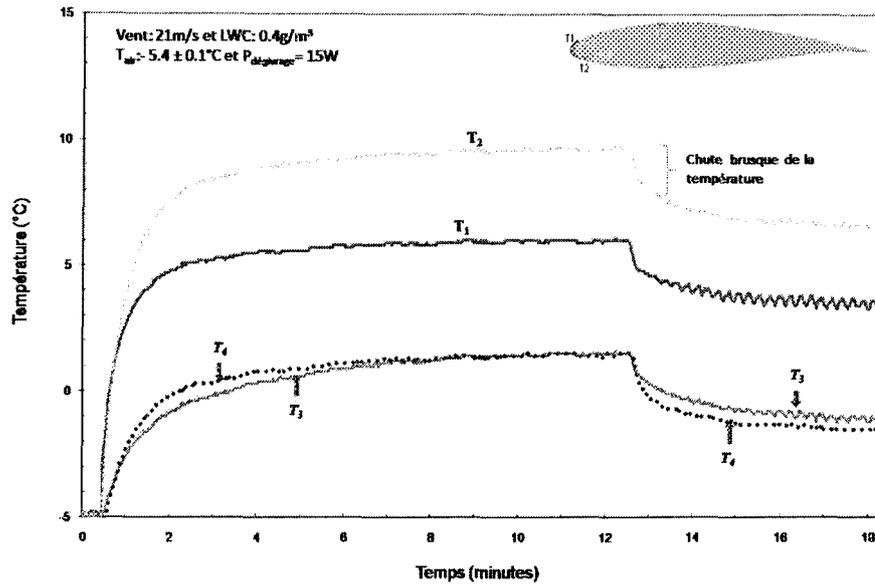


Figure C.27 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°79

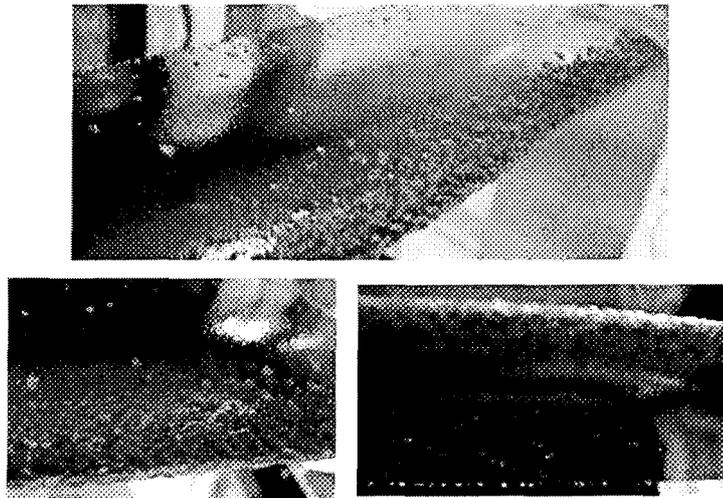
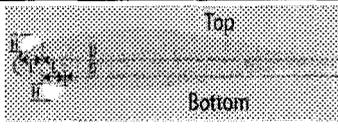


Figure C.28 : Image de la pale à la fin de l'essai n°79

Tableau C.35 : Formes de glace pour l'essai n°79

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
5,094	0	0	2,4	0	0	

C.2.7. Essai n°60

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le revêtement superhydrophobe.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°37,72 et 77 en ce qui concerne le comportement sous le mode ruissellement et la valeur de leur P_{seuil} .
- Enfin, faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°69 et 76.

Résultats

Tableau C.36 : Tableau des conditions pour l'essai n°60

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,7	$\pm 0,2$	-4,9	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.37 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
1,95	6	6,2	$\pm 0,3$	10,9	$\pm 0,2$	1,1	$\pm 0,6$	1,3	$\pm 0,3$

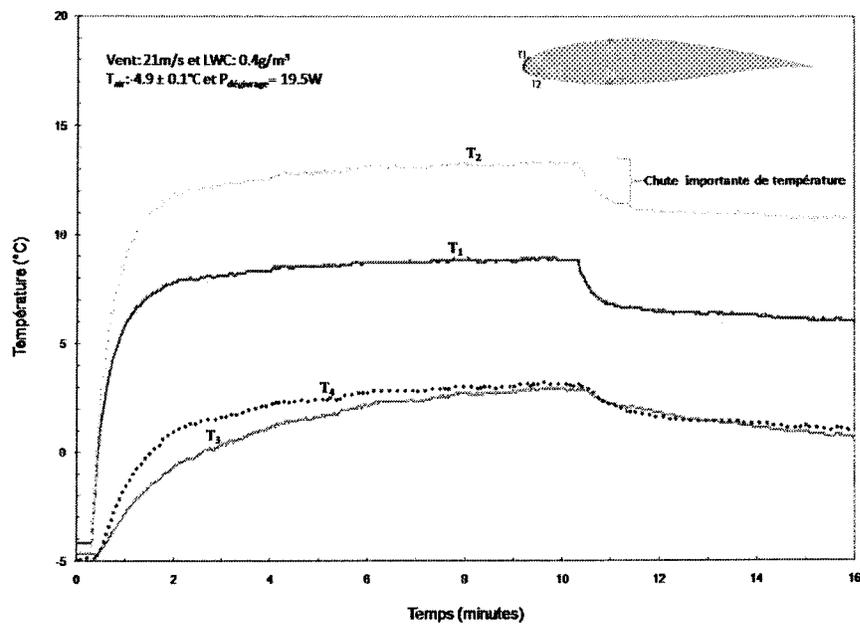


Figure C.29 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°60

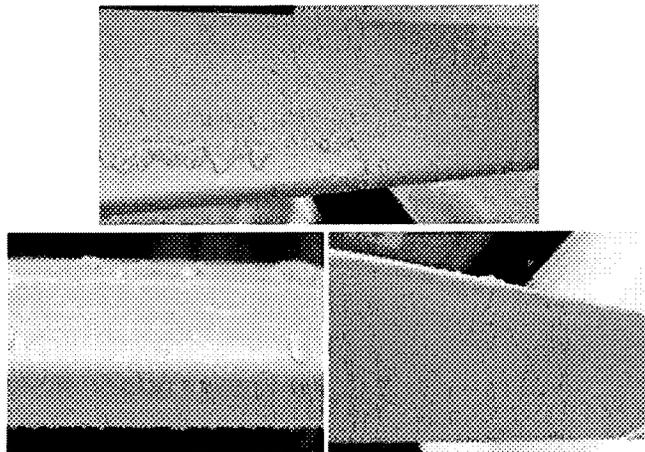
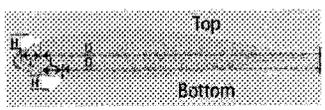


Figure C.30 : Image de la pale à la fin de l'essai n°60

Tableau C.38 : Formes de glace pour l'essai n°60

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
7,63	1,790	0,135	3,02	0	0	

C.2.8. Essai n°69

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le StaClean™.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°60 et 76.

Résultats

Tableau C.39 : Tableau des conditions pour l'essai n°69

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,6	±0,2	-5,3	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.40 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
1,95	6	5,5	±0,4	9,3	±0,4	-0,6	±0,5	-1,2	±0,4

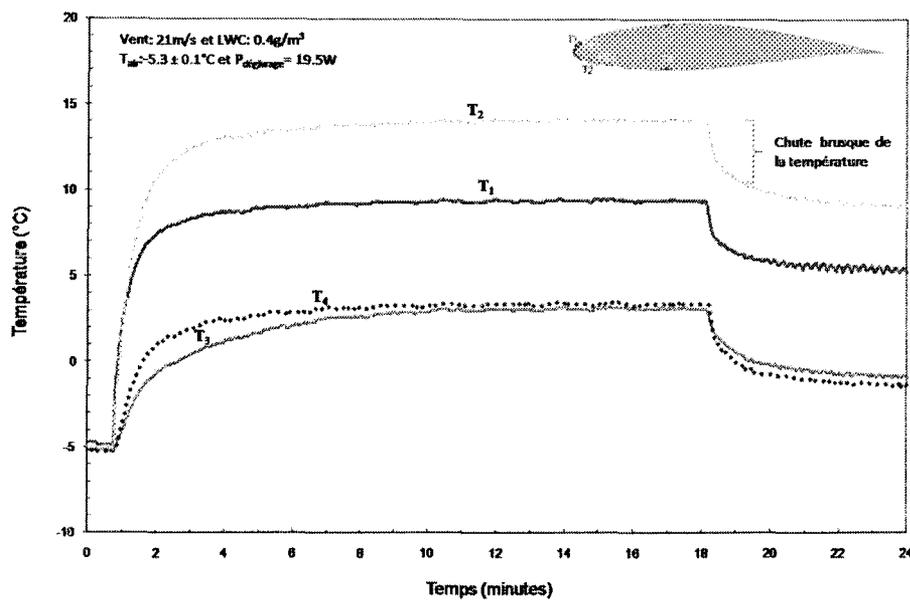


Figure C.31 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°69

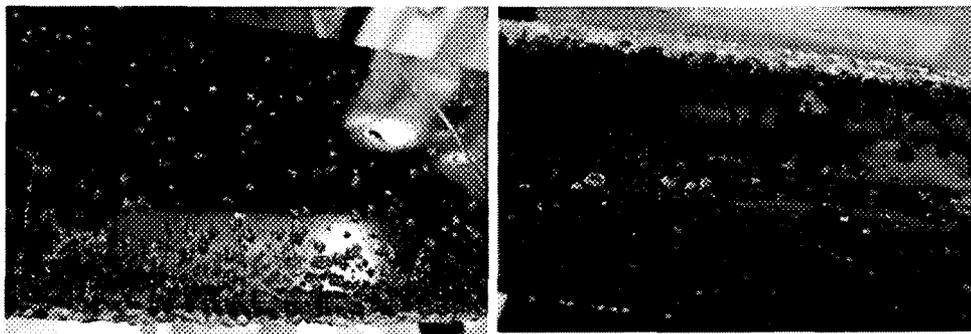


Figure C.32 : Image de la pale à la fin de l'essai n°69

Tableau C.41 : Formes de glace pour l'essai n°69

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
8,156	1,823	0,119	6,864	3,283	0,138	

C.2.9. Essai n°76

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le Wearlon F1-Ice.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°60 et 69.

Résultats

Tableau C.42 : Tableau des conditions pour l'essai n°76

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,8	$\pm 0,1$	-5,5	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

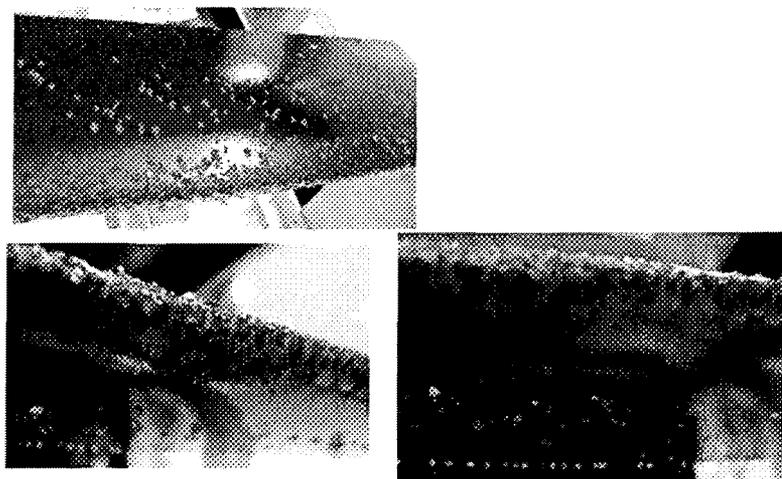


Figure C.33 : Image de la pale à la fin de l'essai n°76

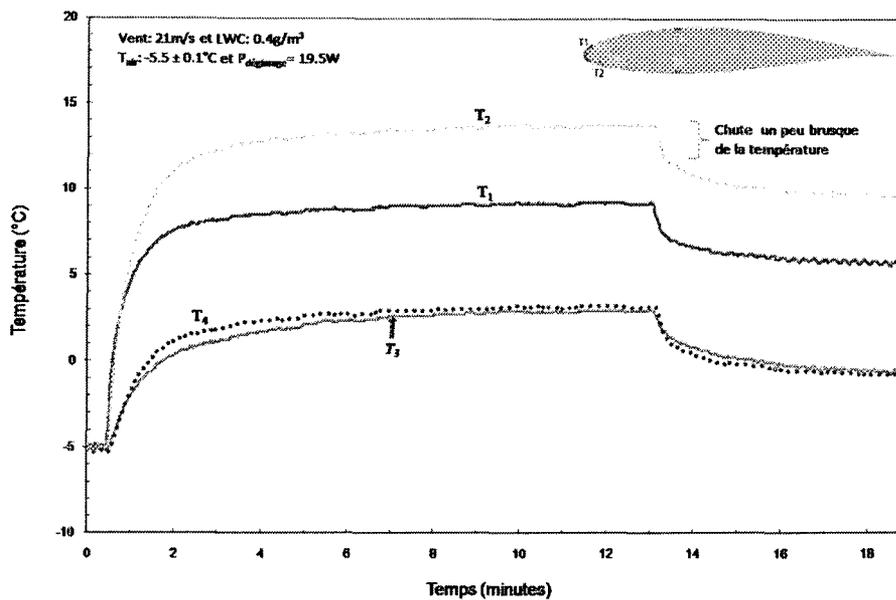


Figure C.34 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°76

Tableau C.43 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
1,95	6	5,9	±0,4	9,8	±0,4	-0,3	±0,5	-0,6	±0,4

Tableau C.44 : Formes de glace pour l'essai n°76

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
8,000	1,841	0,07	9,09	0,430	0,120	

C.2.10. Essai n°72

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le StaClean™.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le revêtement StaClean™.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°37,60 et 77 en ce qui concerne le comportement sous le mode ruissellement et la valeur de leur P_{seuil} .
- Enfin, faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°78.

Résultats

Tableau C.45 : Tableau des conditions pour l'essai n°72

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,7	$\pm 0,2$	-5,4	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.46 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
2,6	6	9,3	$\pm 0,3$	14,8	$\pm 0,4$	-0,9	$\pm 0,4$	0,6	$\pm 0,6$

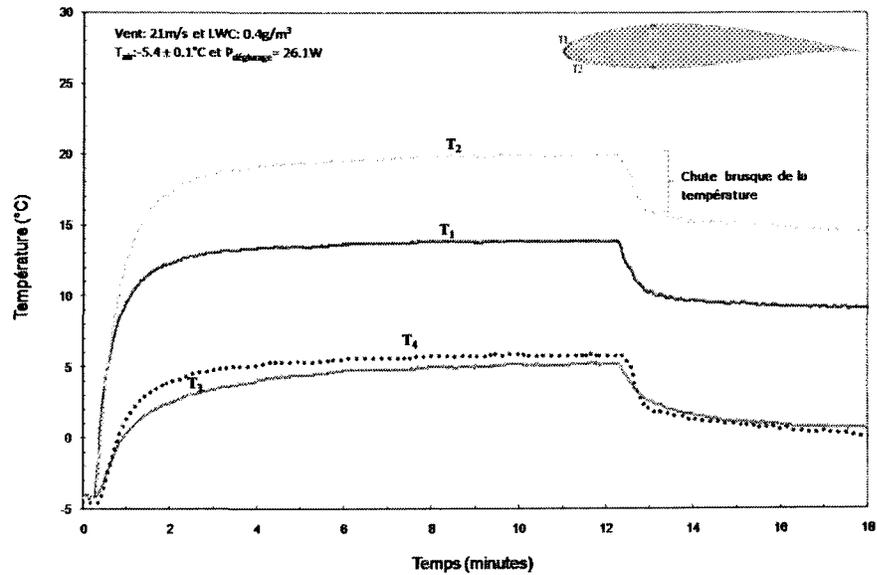


Figure C.35 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°72

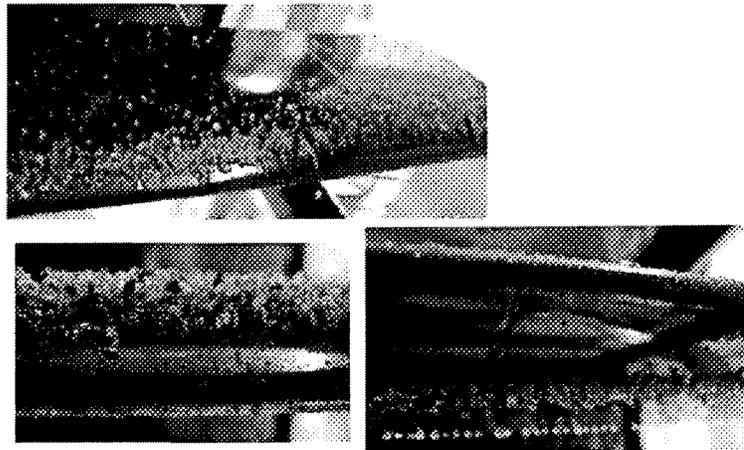
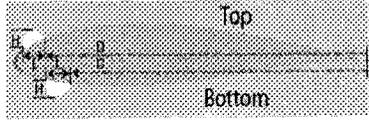


Figure C.36 : Image de la pale à la fin de l'essai n°72

Tableau C.47 : Formes de glace pour l'essai n°72

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
6,426	2,782	0,103	4,744	2,368	0,100	

C.2.11. Essai n°78

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le Wearlon F1-Ice.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°72.

Résultats

Tableau C.48 : Tableau des conditions pour l'essai n°78

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,9	±0,1	-5,5	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

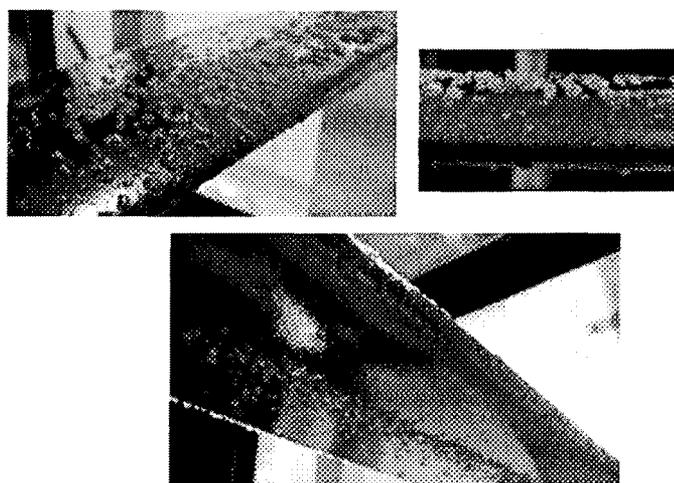


Figure C.37 : Image de la pale à la fin de l'essai n°78

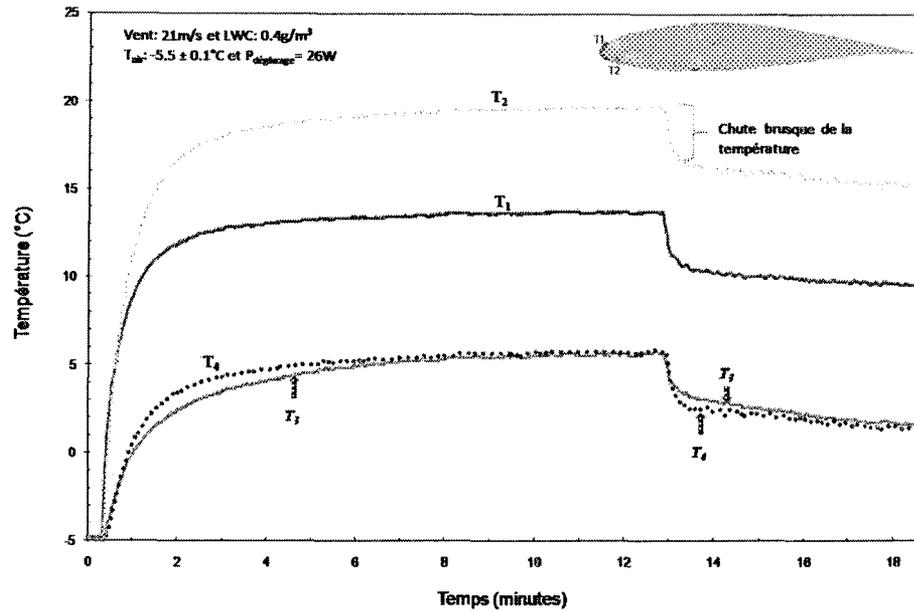


Figure C.38 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°78

Tableau C.49 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
2,6	6	9,8	±0,3	15,6	±0,5	2,0	±0,6	1,8	±0,5

Tableau C.50 : Formes de glace pour l'essai n°78

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
5,504	3,632	0,110	3,736	1,856	0	

C.2.12. Essai n°77

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche d'un revêtement hydrophobe : le Wearlon F1-Ice.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le revêtement Wearlon F1-Ice.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°37, 60 et 72 en ce qui concerne le comportement sous le mode ruissellement et la valeur de leur P_{seuil} .

Résultats

Tableau C.51 : Tableau des conditions pour l'essai n°77

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μ m)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,8	$\pm 0,1$	-5,5	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.52 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
2,53	6	9,1	$\pm 0,5$	14,5	$\pm 0,7$	1,6	$\pm 0,7$	1,2	$\pm 0,8$

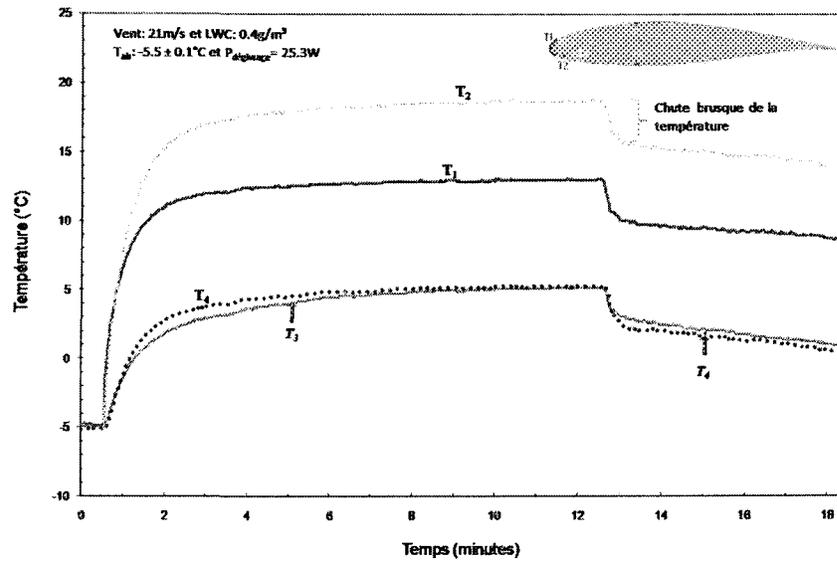


Figure C.39 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°77

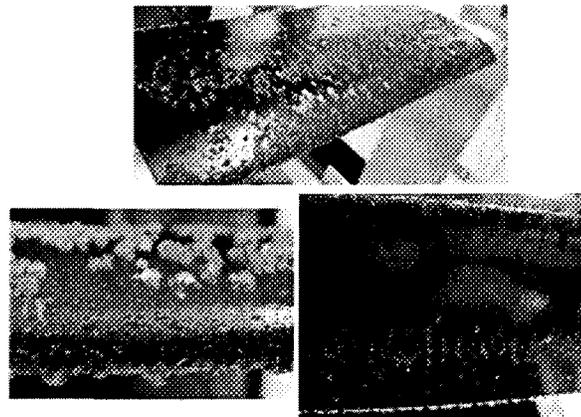


Figure C.40 : Image de la pale à la fin de l'essai n°77

Tableau C.53 : Formes de glace pour l'essai n°77

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
4,988	4,864	0,056	3,88	1,682	0,068	

C.2.13. Essai n°97

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°2 avec la pale revêtue juste de la pellicule plastique.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour la pellicule plastique en condition 2.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°103 en ce qui concerne le comportement sous ruissellement et la valeur de P_{seuil} en condition 2.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°100 et 134.

Résultats

Tableau C.54 : Tableau des conditions pour l'essai n°97

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	33	$\pm 0,1$	-5,4	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.55 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
3,5	6	7,4	$\pm 0,4$	16,1	$\pm 0,4$	-0,9	$\pm 0,6$	2,5	$\pm 0,4$

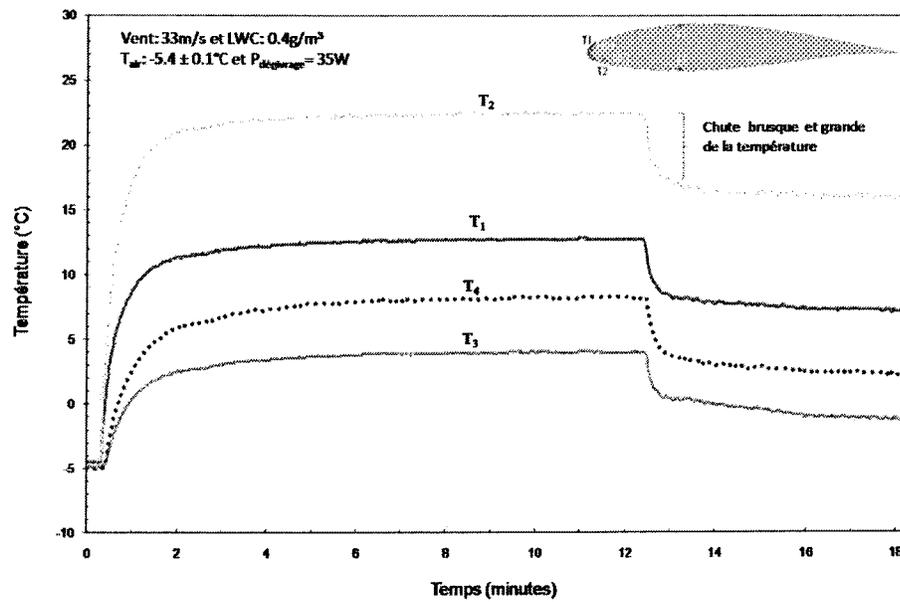


Figure C.41 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°97

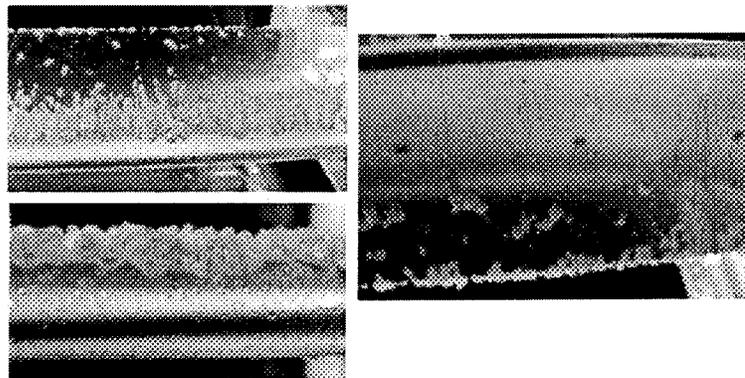
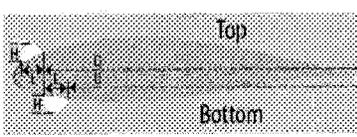


Figure C.42 : Image de la pale à la fin de l'essai n°97

Tableau C.56 : Formes de glace pour l'essai n°97

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,086	2,470	0,150	3,472	1,8	0,08	

C.2.14. Essai n°134

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°2 avec la pale sans aucun revêtement et sans la pellicule plastique.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°97 et 100.

Résultats

Tableau C.57 : Tableau des conditions pour l'essai n°134

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	32,8	$\pm 0,1$	-5,4	$\pm 0,2$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.58 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
3,5	6	5,4	$\pm 0,3$	13,6	$\pm 0,4$	-2,5	$\pm 0,4$	0,3	$\pm 0,4$

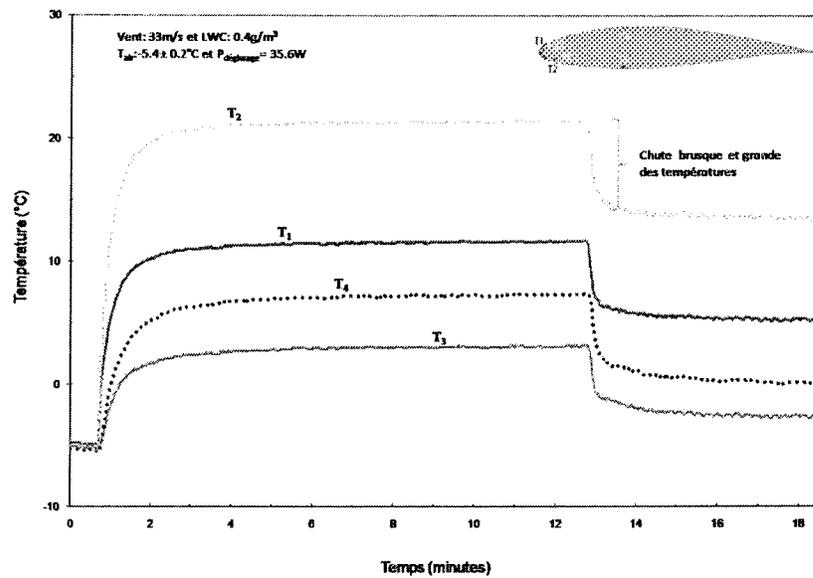


Figure C.43 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°134

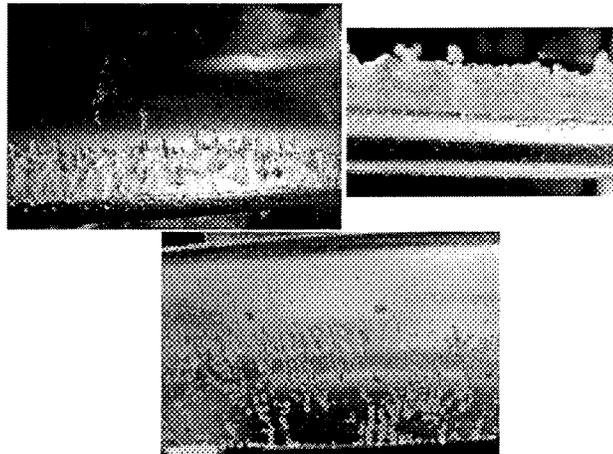
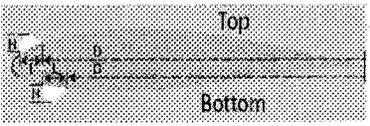


Figure C.44 : Image de la pale à la fin de l'essai n°134

Tableau C.59 : Formes de glace pour l'essai n°134

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
8,266	1,200	0,100	0	6,722	0,094	

C.2.15. Essai n°100

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°2 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°97 et 134.

Résultats

Tableau C.60 : Tableau des conditions pour l'essai n°100

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	32,9	±0,1	-5,4	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.61 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
3,5	6	11,6	±0,3	21,3	±0,3	0,2	±0,6	2,2	±0,2

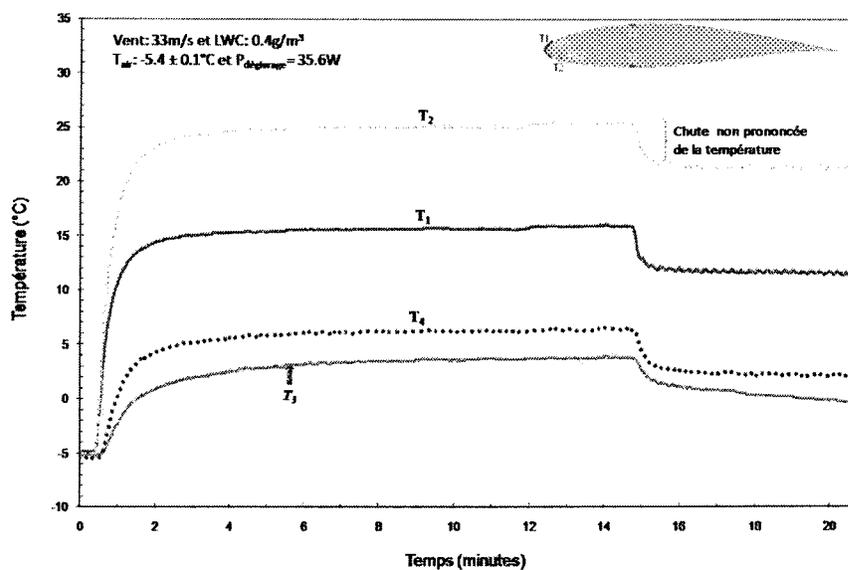


Figure C.45 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°100

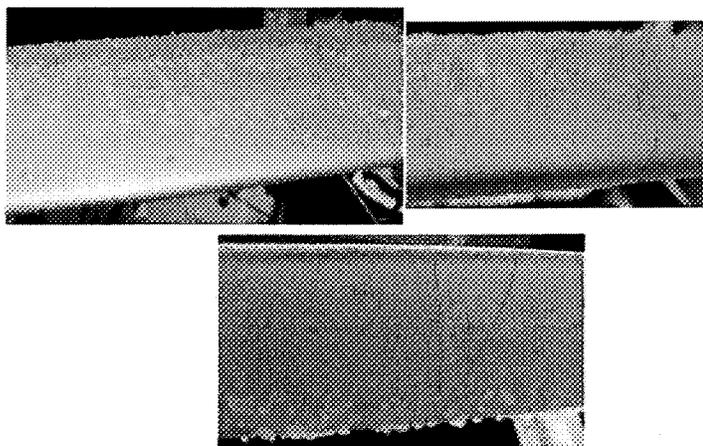
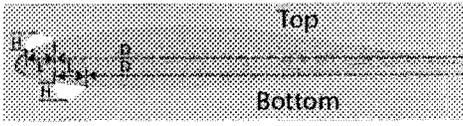


Figure C.46 : Image de la pale à la fin de l'essai n°100

Tableau C.62 : Formes de glace pour l'essai n°100

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
2,688	4,785	0,142	0	2,850	0,106	

C.2.16. Essai n°98

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°2 avec la pale sans aucun revêtement et sans la pellicule plastique.

Objectif

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°101.

Résultats

Tableau C.63 : Tableau des conditions pour l'essai n°98

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	32,8	±0,1	-5,4	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.64 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
1,75	6	0,9	±0,4	5,4	±0,4	-2,8	±0,3	-1,3	±0,4

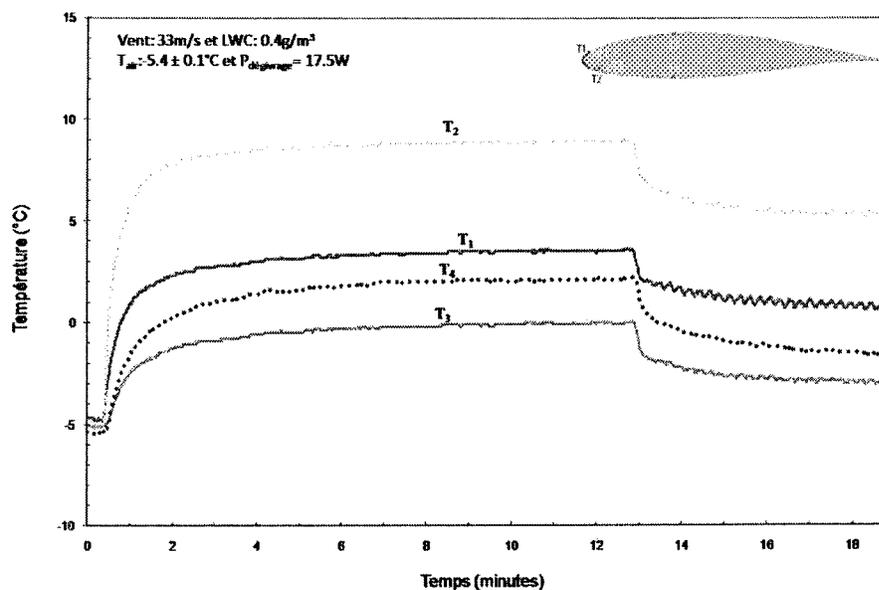


Figure C.47 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°98

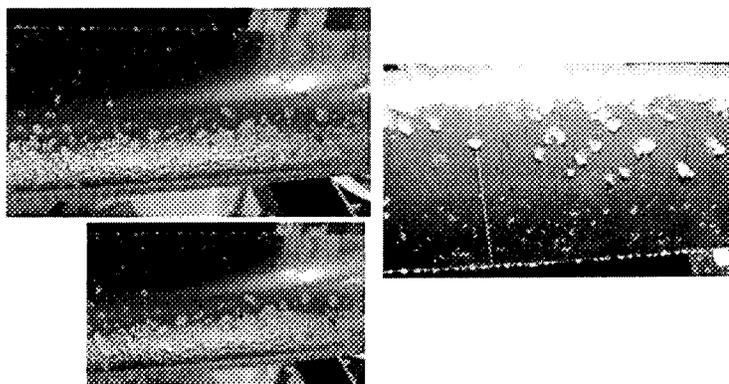
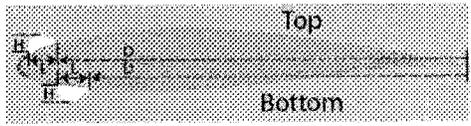


Figure C.48 : Image de la pale à la fin de l'essai n°98

Tableau C.65 : Formes de glace pour l'essai n°98

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
8,182	2,150	0,136	8,692	0,754	0,08	

C.2.17. Essai n°101

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°2 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectif

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°98.

Résultats

Tableau C.66 : Tableau des conditions pour l'essai n°101

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	32,7	±0,1	-5,3	±0,2	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.67 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
1,75	6	3,6	±0,4	6,7	±0,2	-2,7	±0,2	-2,5	±0,3

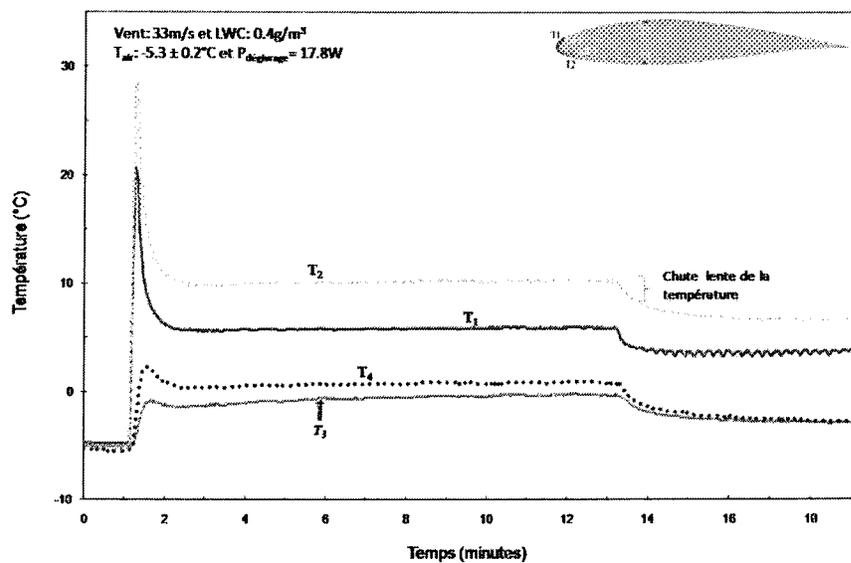


Figure C.49 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°101

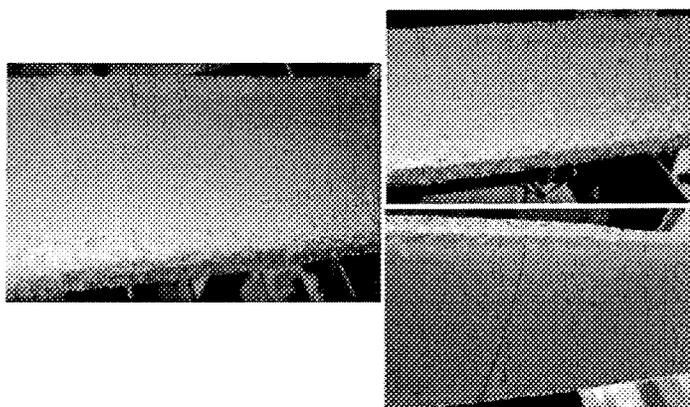
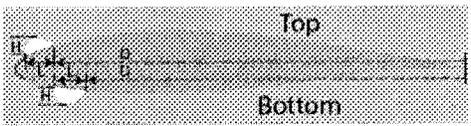


Figure C.50 : Image de la pale à la fin de l'essai n°101

Tableau C.68 : Formes de glace pour l'essai n°101

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,805	2,554	0,290	9,040	0,471	0,094	

C.2.18. Essai n°103

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°2 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le HIREC 1450 en condition 2.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°97 en ce qui concerne le comportement sous ruissellement et la valeur de P_{seuil} en condition 2.

Résultats

Tableau C.69 : Tableau des conditions pour l'essai n°103

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	32,8	$\pm 0,1$	-5,3	$\pm 0,2$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.70 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
3,05	6	9,1	$\pm 0,3$	17,1	$\pm 0,2$	-1,0	$\pm 0,5$	0,9	$\pm 0,3$

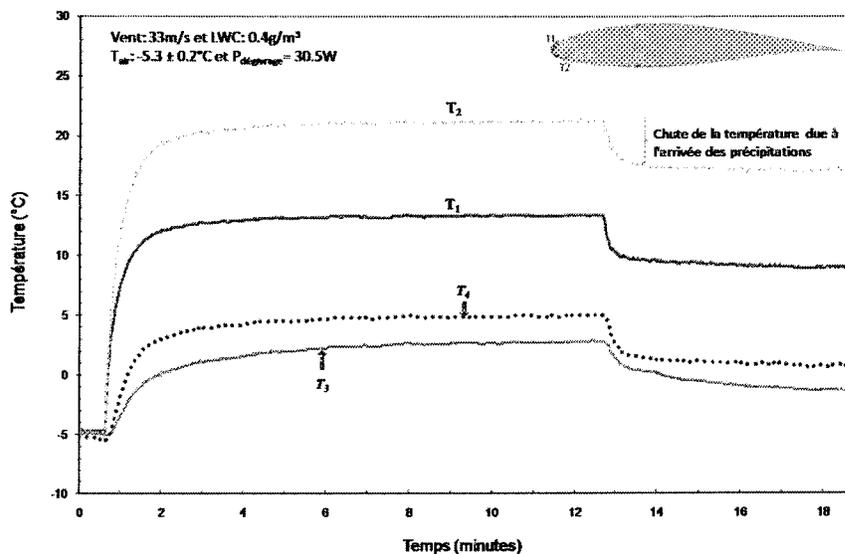


Figure C.51 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°103

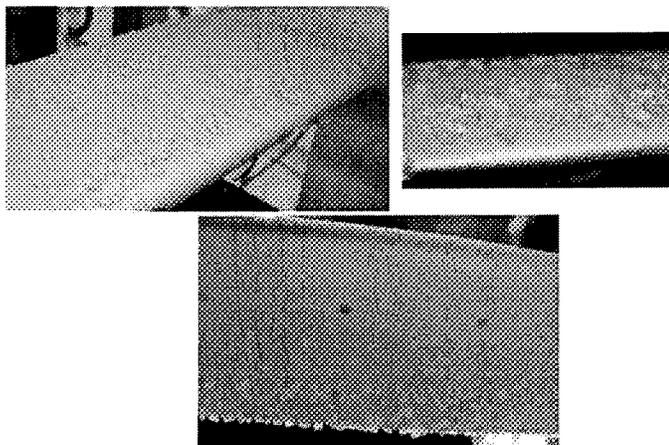
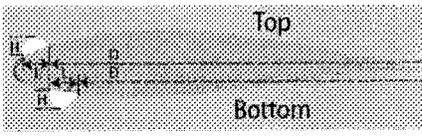


Figure C.52 : Image de la pale à la fin de l'essai n°103

Tableau C.71 : Formes de glace pour l'essai n°103

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
6,680	2,900	0,166	0	3,900	0,054	

C.2.19. Essai n°22

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue juste de la pellicule plastique.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour la pellicule plastique en condition climatique n°3.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°54, 64 et 88 en ce qui concerne le comportement sous ruissellement et la valeur de P_{seuil} en condition climatique n°3.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°136, 48, 63,82.

Résultats

Tableau C.72 : Tableau des conditions pour l'essai n°22

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,6	$\pm 0,2$	-18,8	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.73 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
11,5	6	34,5	$\pm 0,9$	56,8	$\pm 0,8$	-2,8	$\pm 0,8$	8,5	$\pm 1,1$

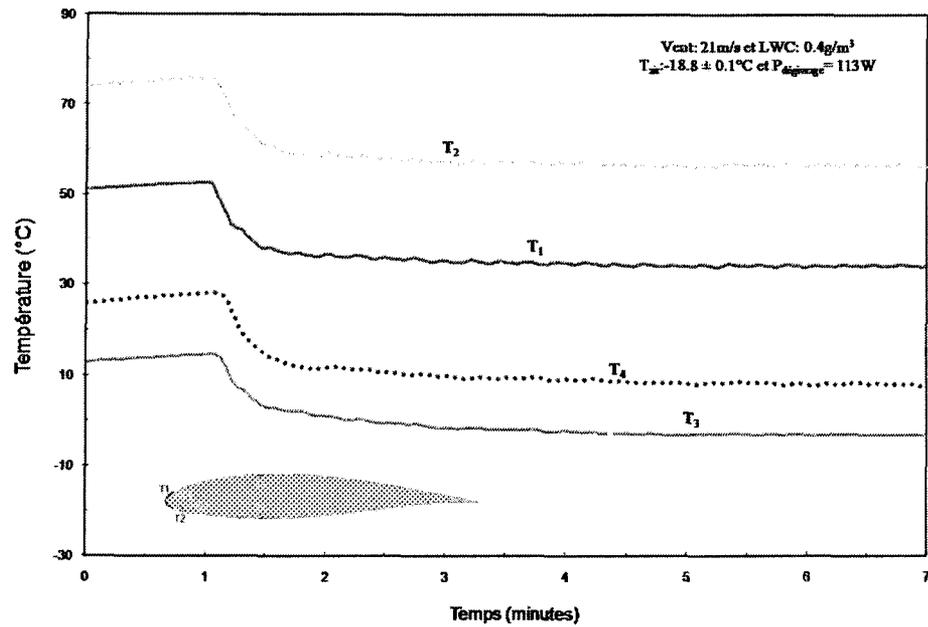


Figure C.53 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°22

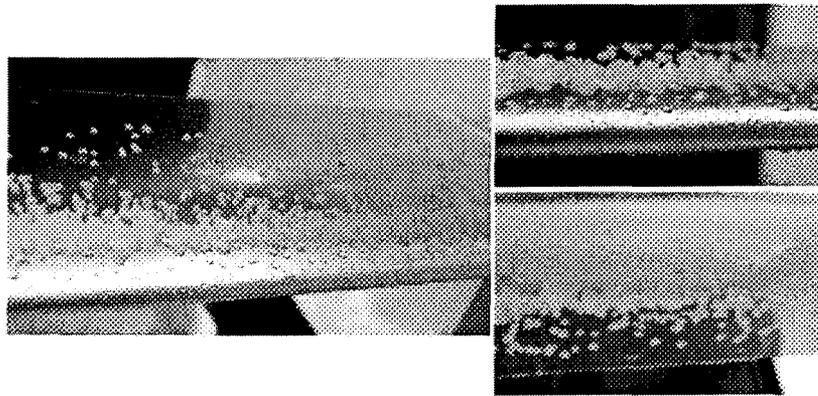
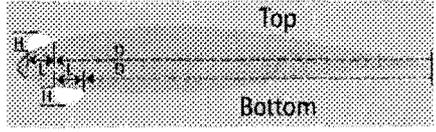


Figure C.54 : Image de la pale à la fin de l'essai n°22

Tableau C.74 : Formes de glace pour l'essai n°22

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
6,812	2,150	0,418	5,462	1,294	0,200	

C.2.20. Essai n°136

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale sans aucun revêtement et sans la pellicule plastique.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°22, 48, 63 et 82.

Résultats

Tableau C.75 : Tableau des conditions pour l'essai n°136

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,8	±0,2	-20,1	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.76 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
11,5	6	19,8	±1,4	47,4	±1,5	-7,0	±1,9	3,8	±1,9

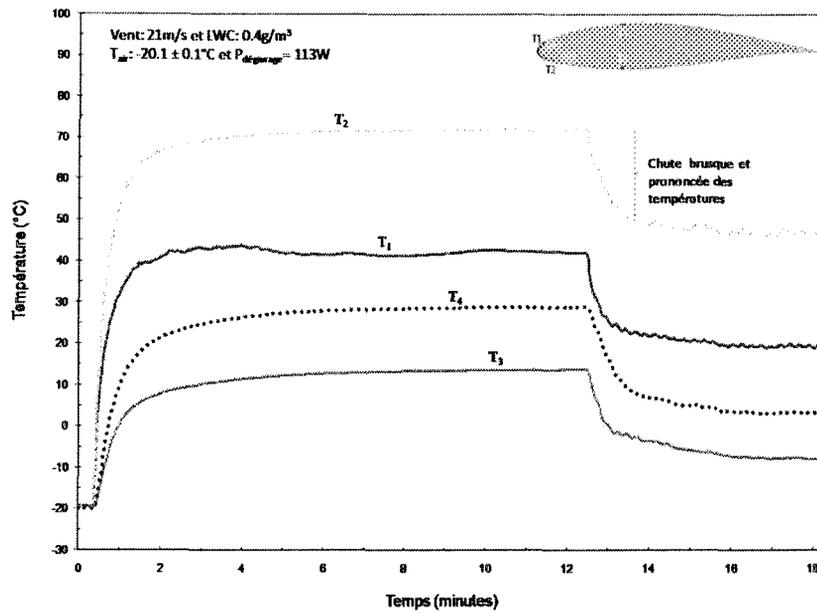


Figure C.55 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°136

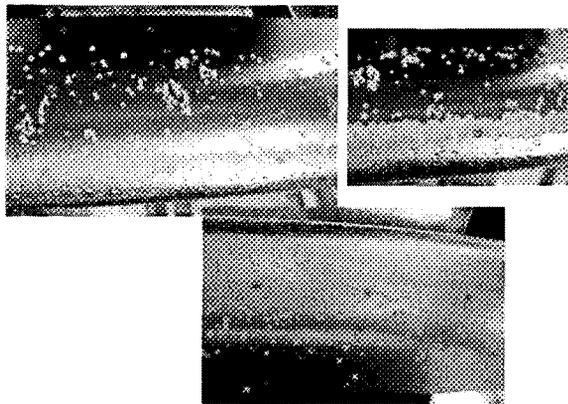
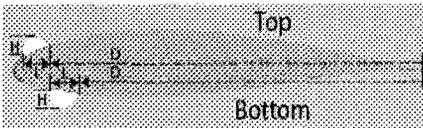


Figure C.56 : Image de la pale à la fin de l'essai n°136

Tableau C.77 : Formes de glace pour l'essai n°136

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
8,254	0,688	0,266	3,76	1,812	0,038	

C.2.21. Essai n°48

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement HIREC 1450.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°22, 136, 63 et 82.

Résultats

Tableau C.78 : Tableau des conditions pour l'essai n°48

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,9	±0,2	-19,4	±0,2	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.79 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
11,5	6	47,7	±0,6	77,4	±0,7	14,7	±0,8	17,5	±0,6

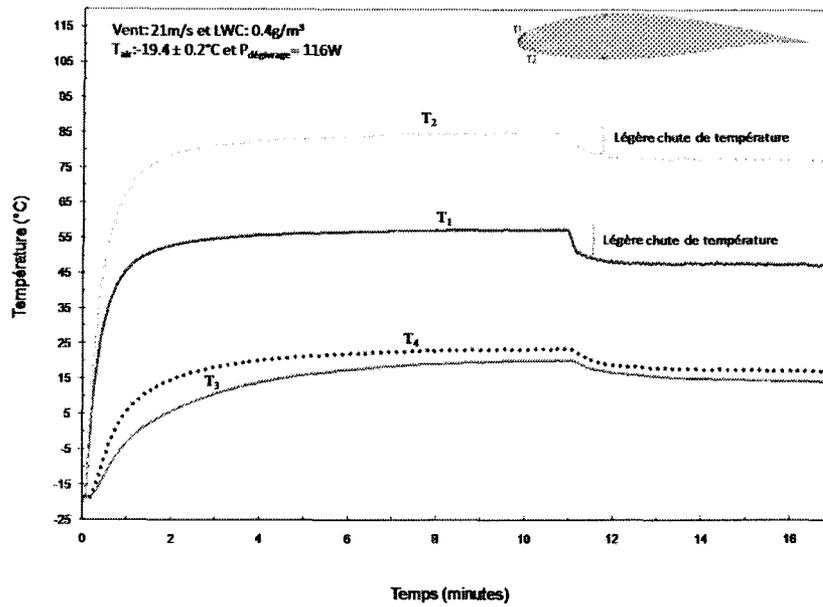


Figure C.57 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°48

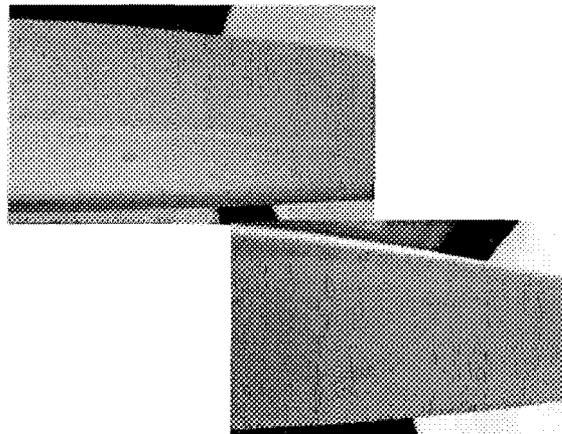
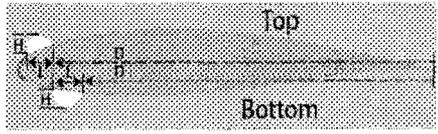


Figure C.58 : Image de la pale à la fin de l'essai n°48

Tableau C.80 : Formes de glace pour l'essai n°48

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
0	0	0	0	0	0	

C.2.22. Essai n°63

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement StaClean™.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°22, 136, 48 et 82.

Résultats

Tableau C.81 : Tableau des conditions pour l'essai n°63

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,7	±0,1	-19,9	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.82 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
11,5	6	43,0	±1,7	61,1	±2,0	9,1	±3,0	5,6	±2,2

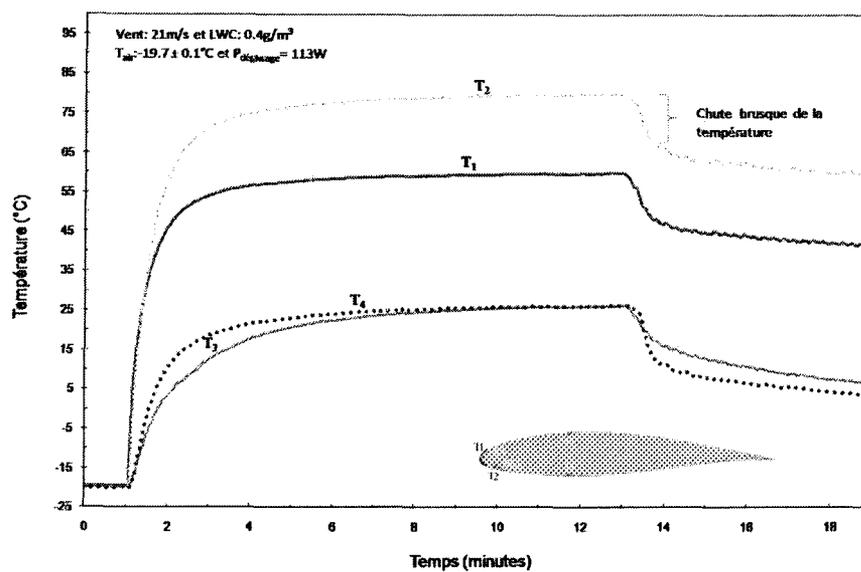


Figure C.59 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°63

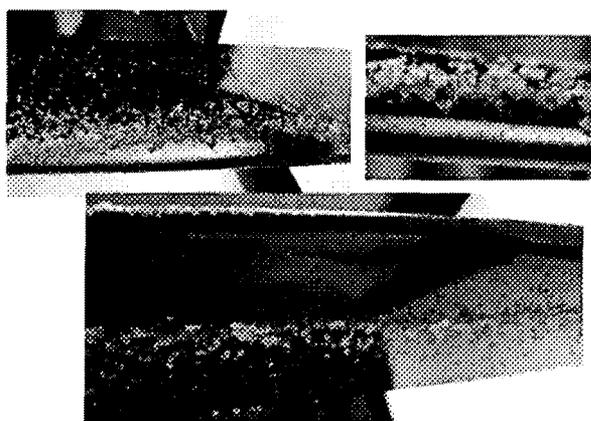
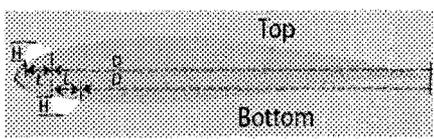


Figure C.60 : Image de la pale à la fin de l'essai n°63

Tableau C.83 : Formes de glace pour l'essai n°63

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
7,286	2,256	0,680	5,145	1,448	0,084	

C.2.23. Essai n°82

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement Wearlon F1-Ice.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°22, 136, 48 et 63.

Résultats

Tableau C.84 : Tableau des conditions pour l'essai n°82

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	201	±0,1	-20,2	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.85 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
11,5	6	48,1	±1,2	67,7	±1,4	13,7	±2,1	9,7	±1,6

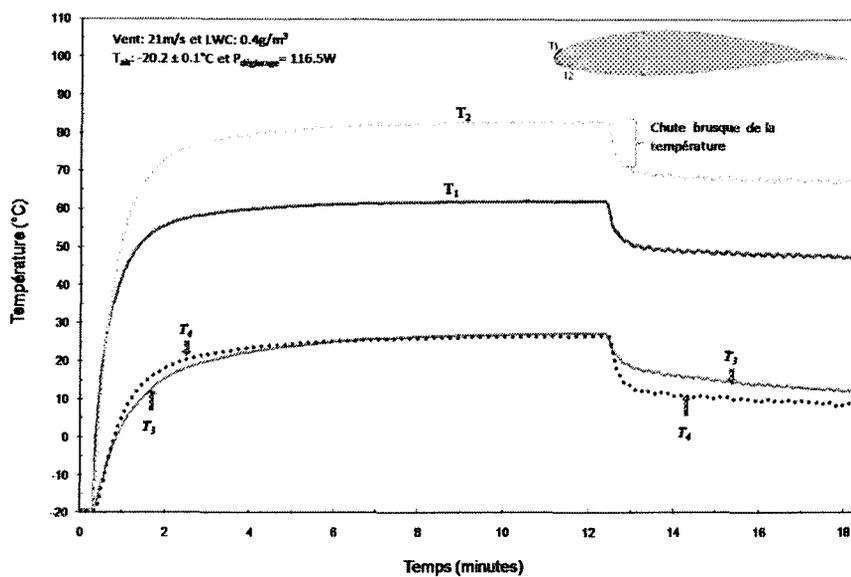


Figure C.61 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°82

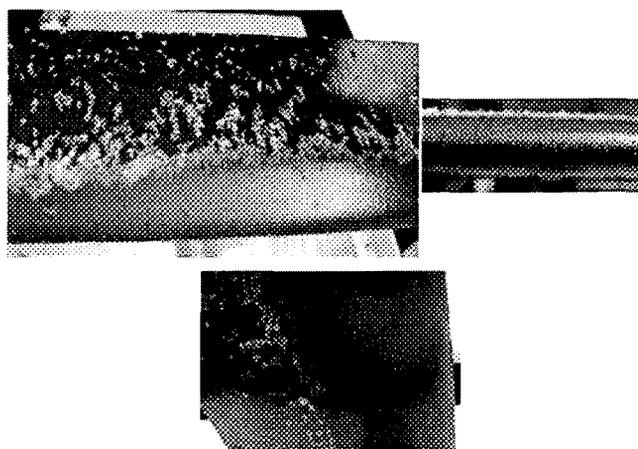
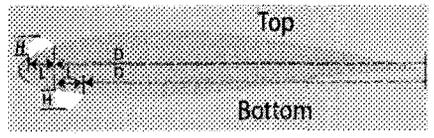


Figure C.62 : Image de la pale à la fin de l'essai n°82

Tableau C.86 : Formes de glace pour l'essai n°82

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
4,824	2,420	0,166	4,229	1,535	0,048	

C.2.24. Essai n°21

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue juste de la pellicule plastique.

Objectifs

Comparer les résultats obtenus avec ceux des essais n°51, 65 ou 66 et 84.

Résultats

Tableau C.87 : Tableau des conditions pour l'essai n°21

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,2	±0,4	-19	±0,2	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C. 88 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
5,75	6	9,3	±0,5	20,3	±0,4	-9,1	±0,6	-3,6	±0,6

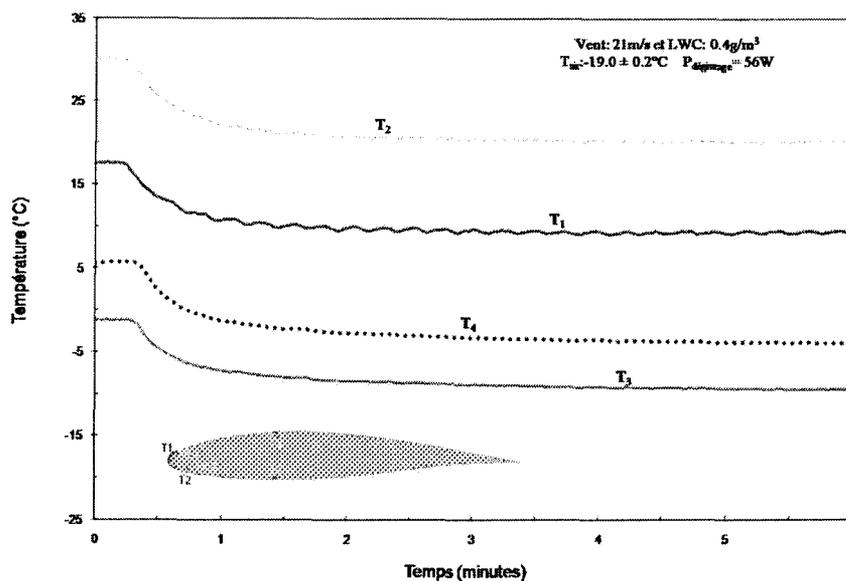


Figure C.63 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°21

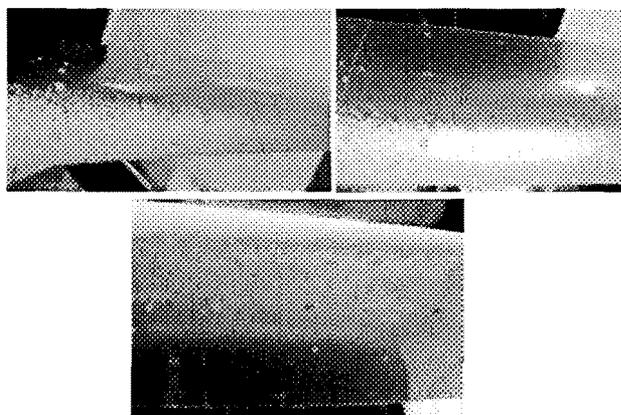
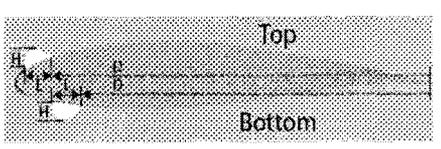


Figure C.64 : Image de la pale à la fin de l'essai n°21

Tableau C.89 : Formes de glace pour l'essai n°21

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
8,236	2,100	0,262	9,104	0,980	0,164	

C.2.25. Essai n°51

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement HIREC 1450.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°21, 65 ou 66 et 84.

Résultats

Tableau C.90 : Tableau des conditions pour l'essai n°51

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,8	±0,2	-19,1	±0,2	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.91 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
5,75	6	11,2	±0,3	24,0	±0,5	-5,8	±1,1	-5,7	±0,8

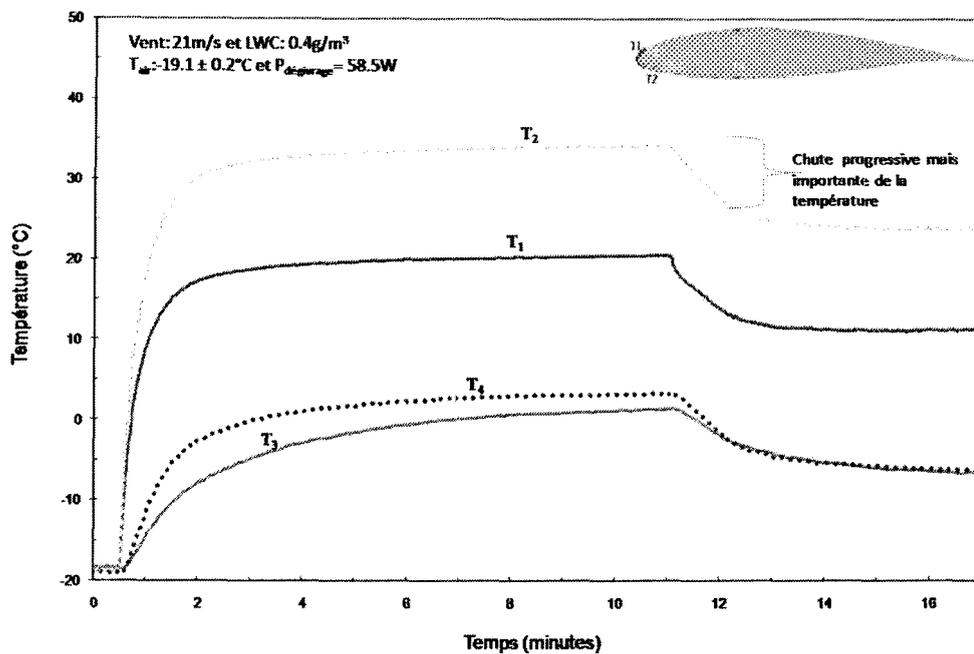


Figure C.65 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°51

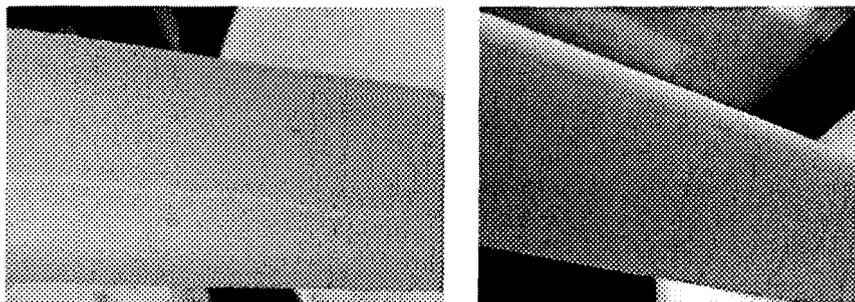
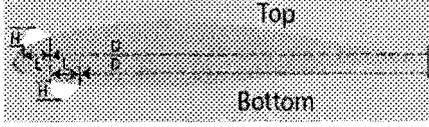


Figure C.66 : Image de la pale à la fin de l'essai n°51

Tableau C.92 : Formes de glace pour l'essai n°51

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
8,772	1,506	0,172	9,200	0,748	0,010	

C.2.26. Essai n°65

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement StaClean™.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°21, 51 et 84.

Résultats

Tableau C.93 : Tableau des conditions pour l'essai n°65

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,7	±0,1	-20	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.94 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
5,75	6	14	±0,4	24,0	±0,4	-4,2	±0,9	-5,3	±0,4

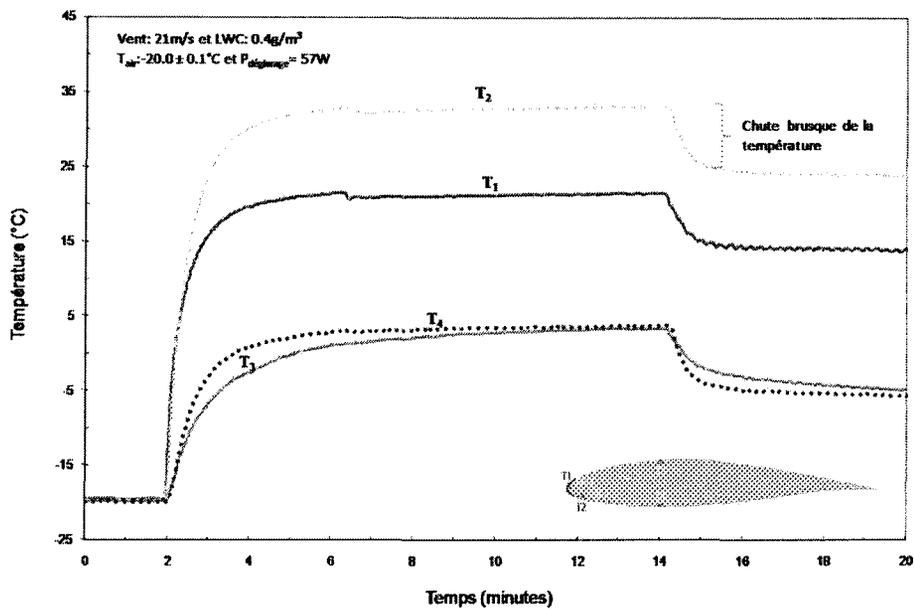


Figure C.67 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°65

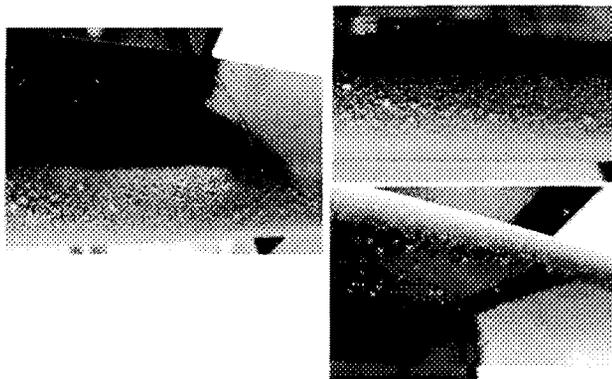
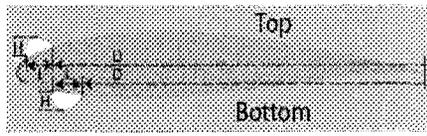


Figure C.68 : Image de la pale à la fin de l'essai n°65

Tableau C.95 : Formes de glace pour l'essai n°65

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
8,182	2,494	0,216	9,031	0,677	0,144	

C.2.27. Essai n°84

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement Wearlon F1-Ice.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°21, 51 et 65.

Résultats

Tableau C.96: Tableau des conditions pour l'essai n°84

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,9	±0,2	-20	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.97 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
5,75	6	14,5	±0,8	24,9	±0,8	-3,6	±1,1	-5,0	±0,7

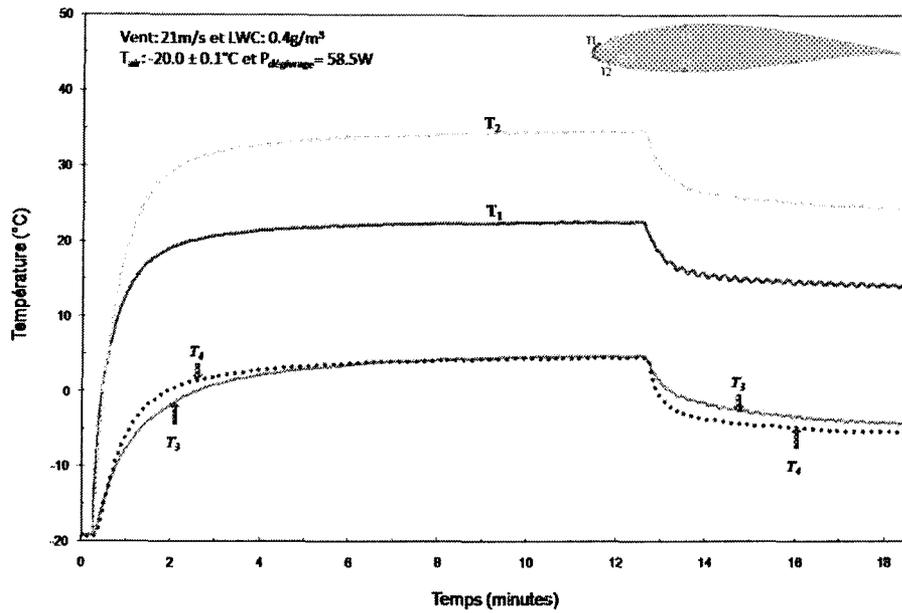


Figure C.69 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°84

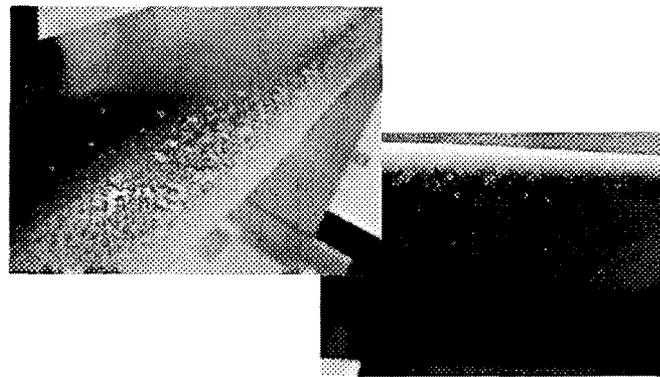
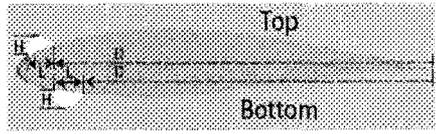


Figure C.70: Image de la pale à la fin de l'essai n°84

Tableau C.98: Formes de glace pour l'essai n°84

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
8,094	1,892	0,341	8,936	1,108	0,272	

C.2.28. Essai n°54

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement HIREC 1450.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le HIREC en condition climatique n°3.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°22, 64 et 88 en ce qui concerne le comportement sous ruissellement et la valeur de P_{seuil} en condition climatique n°3.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°62 et 83.

Résultats

Tableau C.99: Tableau des conditions pour l'essai n°54

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,7	$\pm 0,2$	-19,6	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.100 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
9,9	6	37,4	$\pm 0,9$	62,7	$\pm 0,5$	7,8	$\pm 1,3$	10,8	$\pm 0,7$

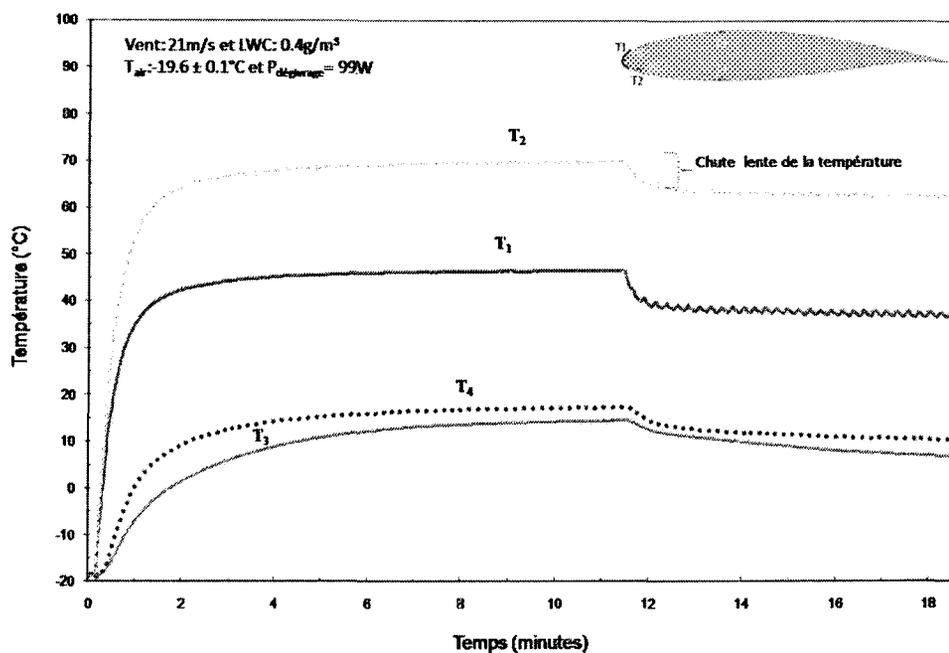


Figure C.71 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°54

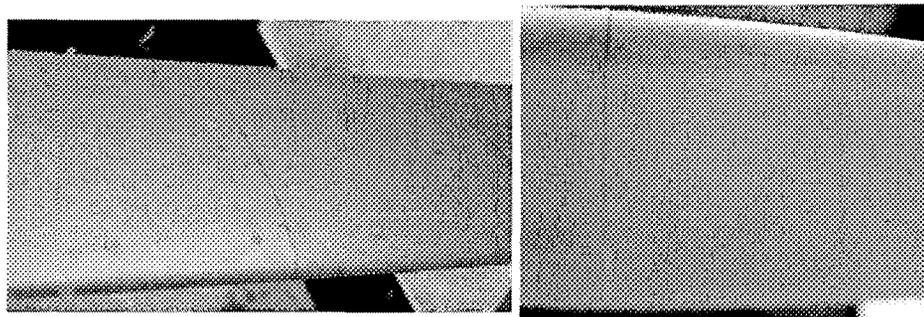
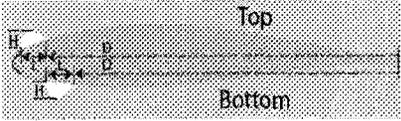


Figure C.72: Image de la pale à la fin de l'essai n°54

Tableau C.101 : Formes de glace pour l'essai n°54

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
Traces de glace sur l'extrados dû peut-être à l'inégalité de la surface du revêtement						

C.2.29. Essai n°139

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement HIREC 1450.

Objectifs

Faire une reprise de l'essai n°54.

Résultats

Tableau C.102 : Tableau des conditions pour l'essai n°139

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,6	$\pm 0,3$	-20,5	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.103 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
9,9	6	30,4	$\pm 2,2$	56,1	$\pm 3,3$	-2,6	$\pm 2,1$	2,8	$\pm 3,2$

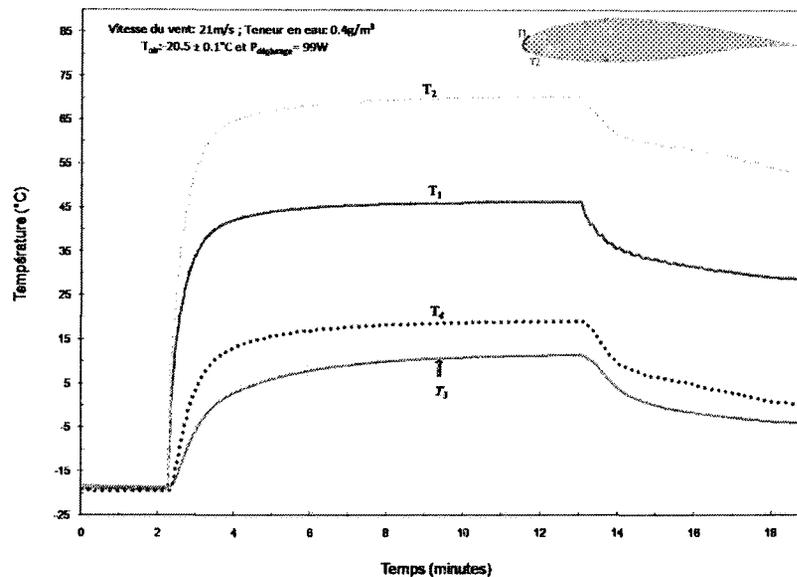


Figure C.73: Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°139

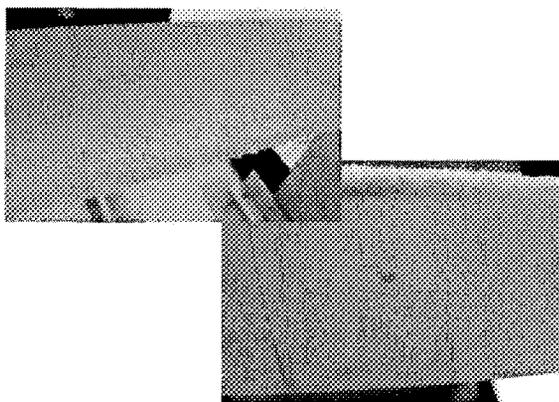


Figure C.74 : Image de la pale à la fin de l'essai n°139

Tableau C.104 : Formes de glace pour l'essai n°139

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
8,42	1,51	0,164	3,064	2,648	traces	

NB : Forme de glace différente de celle de n°54.

C.2.30. Essai n°142

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement HIREC 1450.

Objectifs

Faire une reprise des essais n°54 et 139.

Résultats

Tableau C.105 : Tableau des conditions pour l'essai n°142

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,6	±0,2	-20,6	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.106 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
9,9	6	31,3	±2,1	57,9	±3,6	-1,3	±2,1	5,1	±3,6

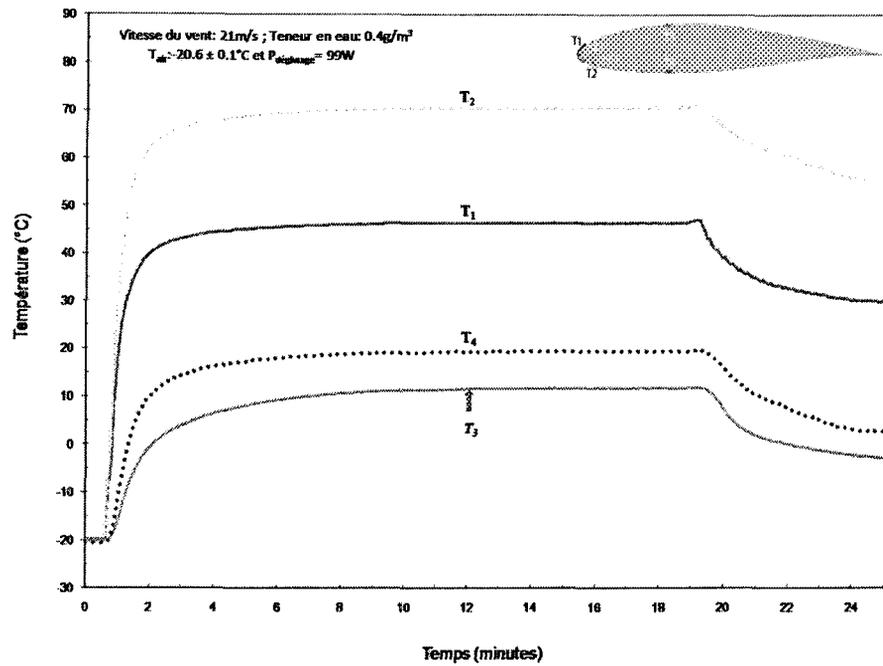


Figure C.75 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°142

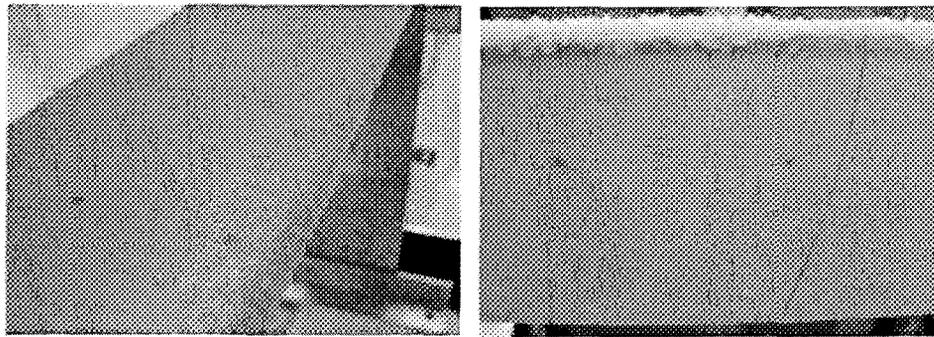
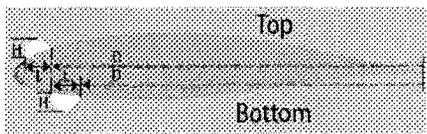


Figure C.76 : Image de la pale à la fin de l'essai n°142

Tableau C.107: Formes de glace pour l'essai n°142

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
8,682	1,706	0,1	9,414	0,248	traces	

C.2.31. Essai n°62

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement StaClean™.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°54 et 83.

Résultats

Tableau C.108: Tableau des conditions pour l'essai n°62

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,7	±0,1	-19,7	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.109 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
9,9	6	33,6	±1,8	49,8	±2,5	2,7	±2,4	1,2	±2,7

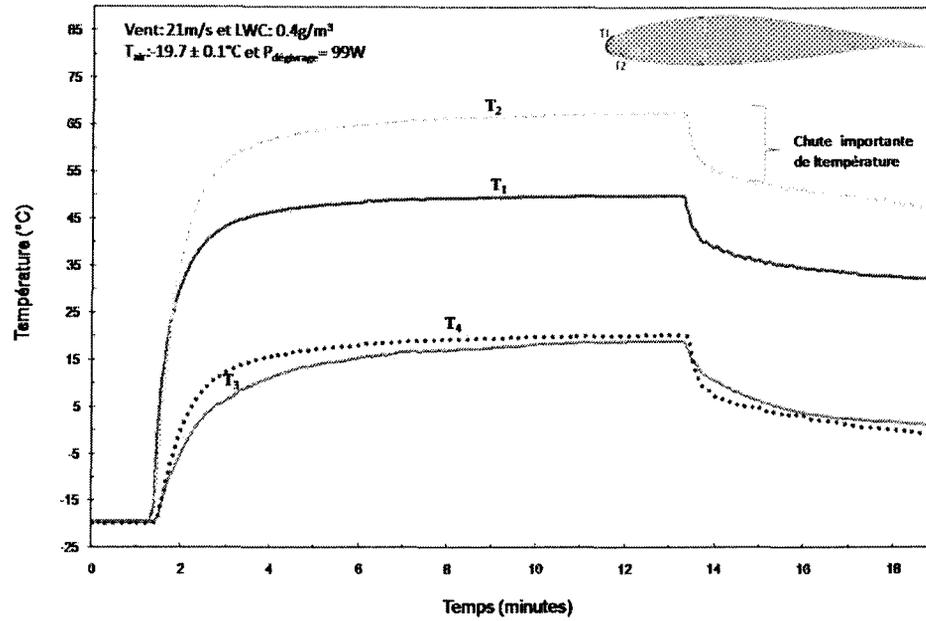


Figure C.77 Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°62

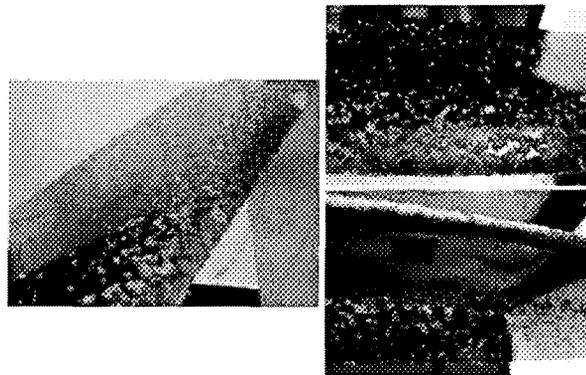
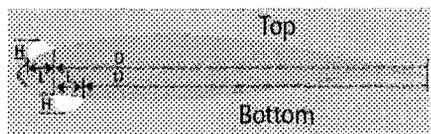


Figure C.78 : Image de la pale à la fin de l'essai n°62

Tableau C.110 : Formes de glace pour l'essai n°62

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
7,490	2,580	0,590	5,654	2,3	0,01	

C.2.32. Essai n°83

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement Wearlon F1-Ice.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°54 et 62.

Résultats

Tableau C.111 : Tableau des conditions pour l'essai n°83

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,7	±0,1	-20,1	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.112 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
9,9	6	34,7	±2,3	51,6	±2,7	4,6	±2,8	1,7	±2,3

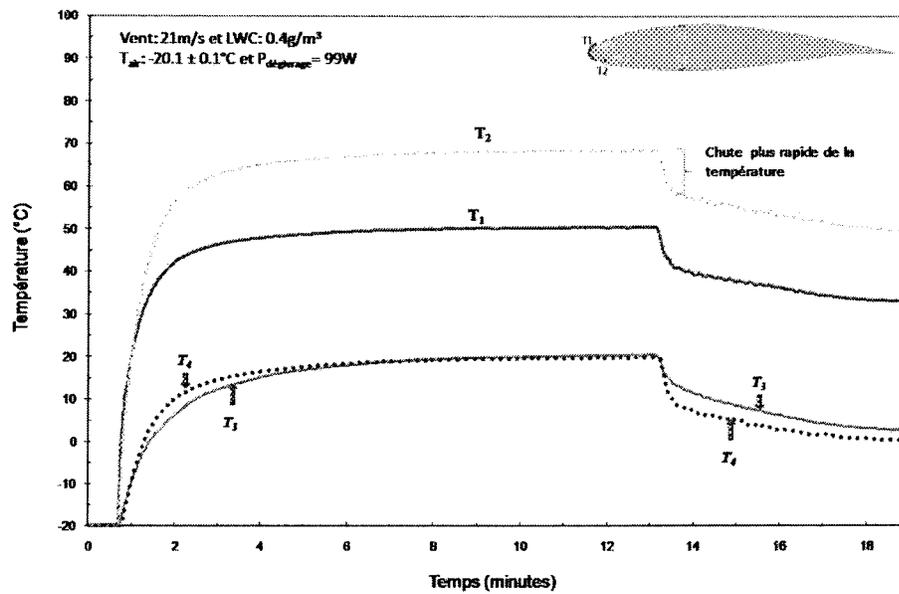


Figure C.79 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°83

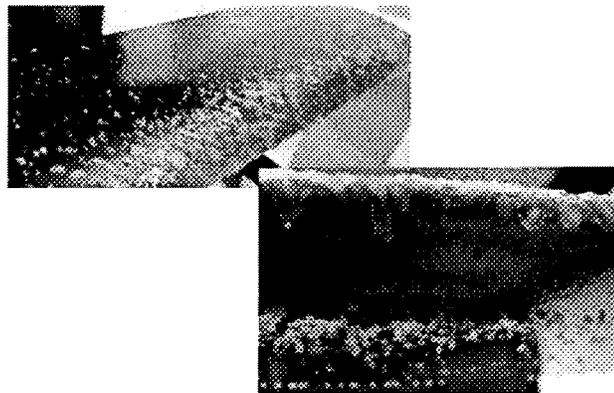
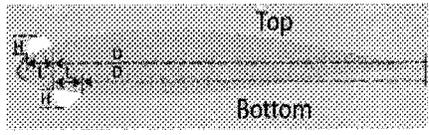


Figure C.80 : Image de la pale à la fin de l'essai n°83

Tableau C.113 : Formes de glace pour l'essai n°83

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,118	2,758	0,056	4,391	1,59	0,022	

C.2.33. Essai n°64

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement StaClean™.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le StaClean™ en condition climatique n°3.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°22, 54 et 88 en ce qui concerne le comportement sous ruissellement et la valeur de P_{seuil} en condition climatique n°3.
- Faire d'autre part une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°85.

Résultats

Tableau C.114: Tableau des conditions pour l'essai n°64

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,7	$\pm 0,1$	-20	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.115 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
10,8	6	39,8	$\pm 2,0$	57,4	$\pm 2,0$	7,1	$\pm 3,1$	3,7	$\pm 2,4$

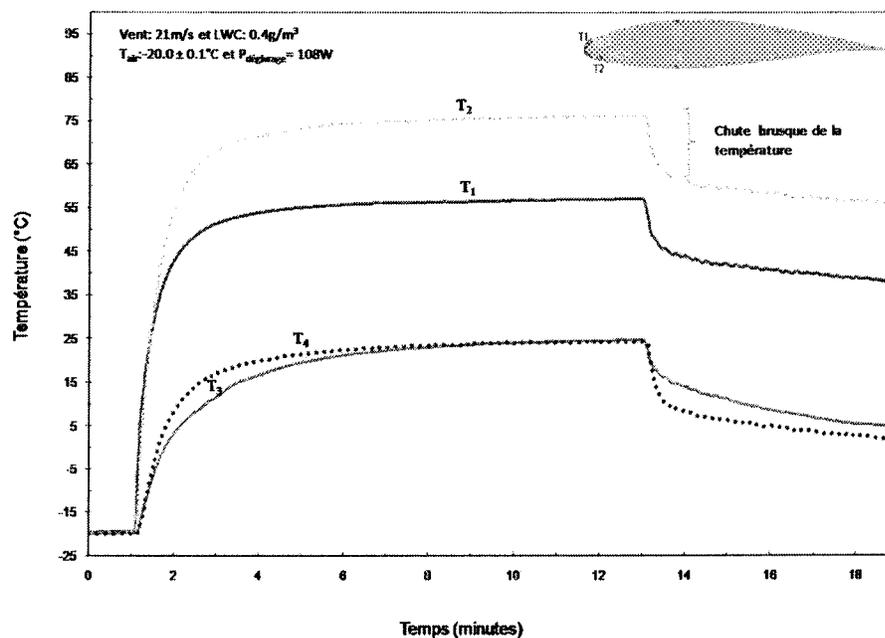


Figure C.81: Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°64

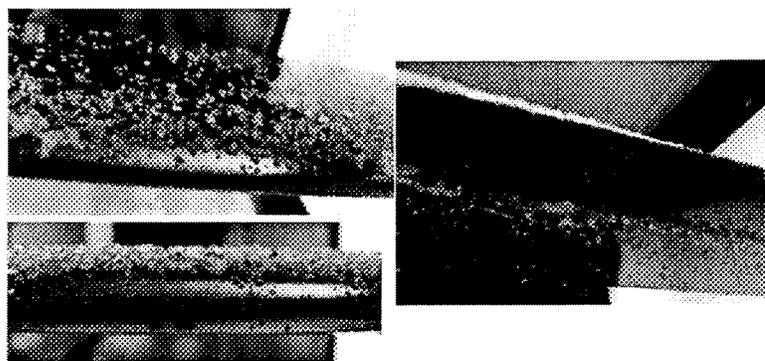
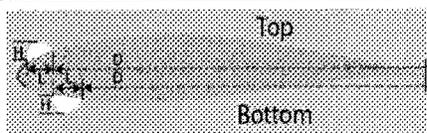


Figure C.82 : Image de la pale à la fin de l'essai n°64

Tableau C.116 : Formes de glace pour l'essai n°64

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
6,833	3,06	0,113	5,272	2,342	0,09	

C.2.34. Essai n°85

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement Wearlon F1-Ice.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°64

Résultats

Tableau C.117 : Tableau des conditions pour l'essai n°85

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,7	±0,2	-20,2	±0,0	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.118 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
10,8	6	42,1	±1,3	60,5	±1,8	9,2	±2,3	6,3	±2,0

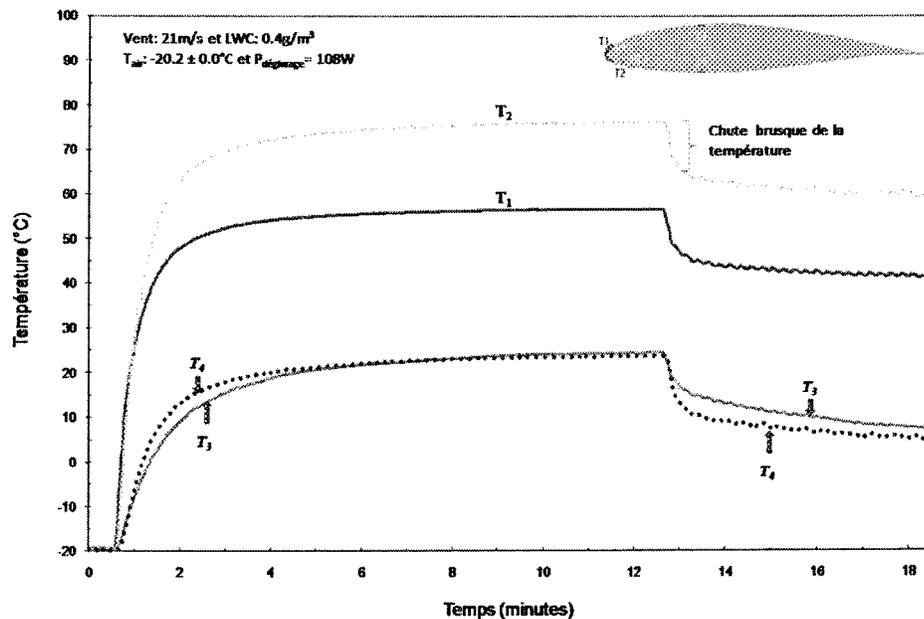


Figure C.83 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°85

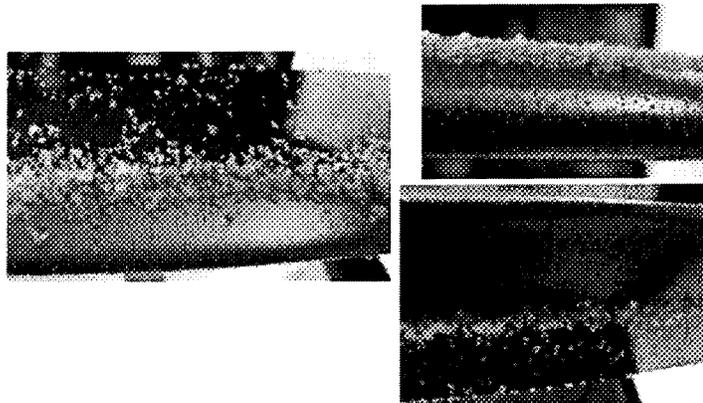


Figure C.84 : Image de la pale à la fin de l'essai n°85

Tableau C.119 : Formes de glace pour l'essai n°85

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
6,776	2,086	0,198	5,096	2,100	0,150	

C.2.35. Essai n°88

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement Wearlon F1-Ice.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le Wearlon F1-Ice en condition climatique n°3.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°22, 54 et 64 en ce qui concerne le comportement sous ruissellement et la valeur de P_{seuil} en condition climatique n°3.

Résultats

Tableau C.120: Tableau des conditions pour l'essai n°88

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,7	$\pm 0,2$	-20,2	$\pm 0,0$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.121 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
10,6	6	39,3	$\pm 2,3$	57,5	$\pm 2,6$	7,7	$\pm 2,7$	3,5	$\pm 2,5$

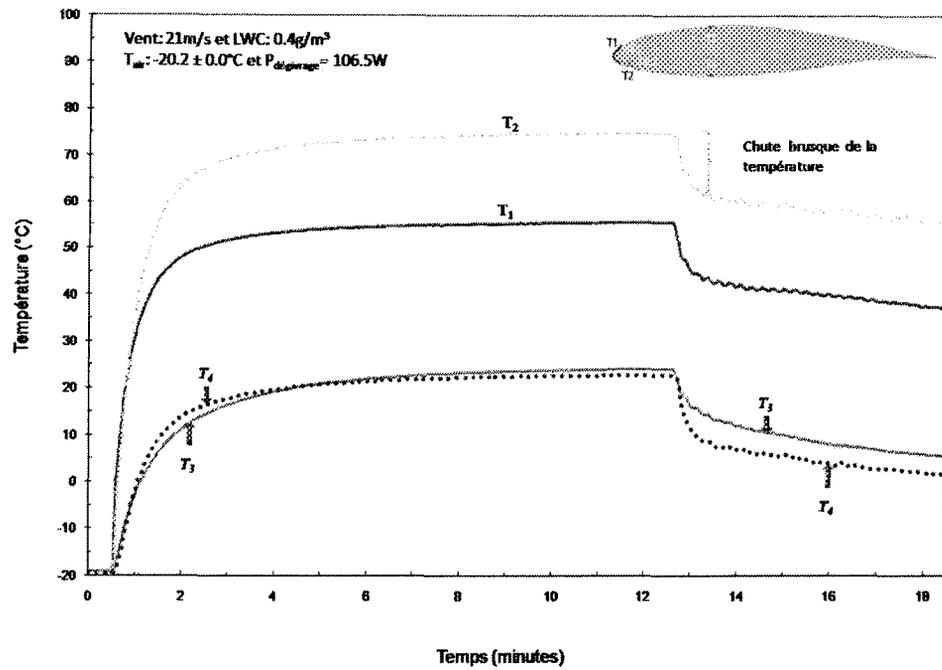


Figure C.85 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°88

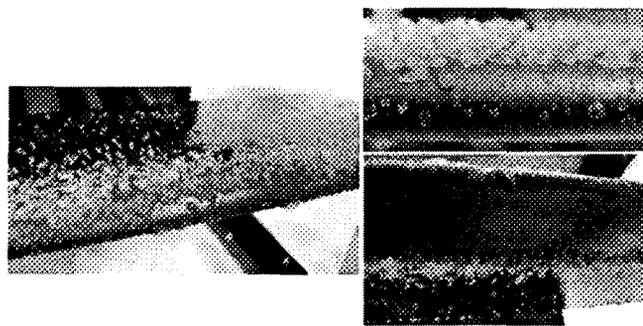
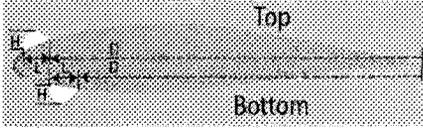


Figure C.86 : Image de la pale à la fin de l'essai n°88

Tableau C.122 : Formes de glace pour l'essai n°88

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
7,028	2,938	0,258	5,074	1,881	0,100	

C.2.36. Essai n°28

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale revêtue juste de la pellicule plastique.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour la pellicule plastique en condition climatique n°4.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°92 pour ce qui est du comportement sous ruissellement et la valeur de P_{seuil} en condition climatique n°4.
- Faire d'autre part une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°90 et 137.

Résultats

Tableau C.123 : Tableau des conditions pour l'essai n°28

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	32,7	$\pm 0,2$	-17,8	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.124 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
13,1	6	34,3	$\pm 1,7$	68,4	$\pm 1,7$	-0,2	$\pm 2,4$	14,7	$\pm 2,4$

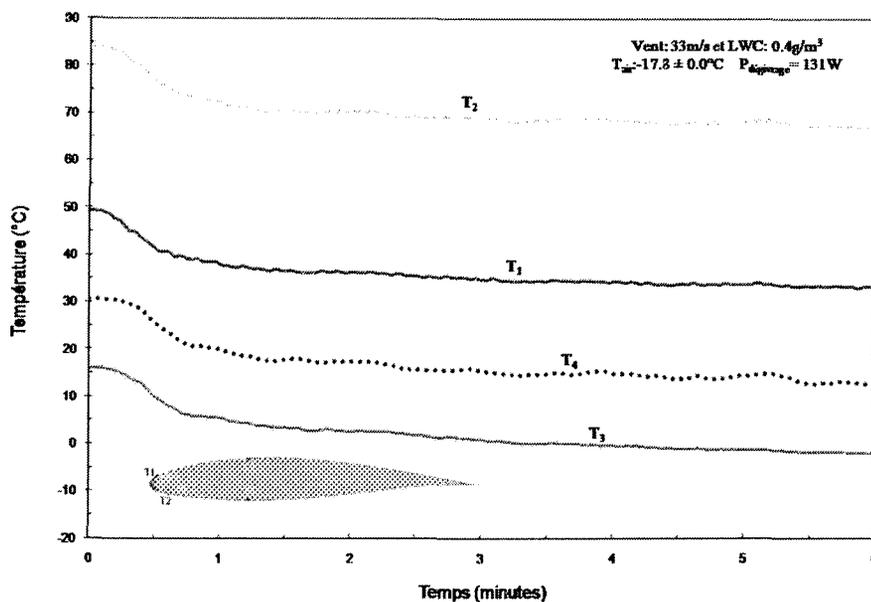


Figure C.87 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°28

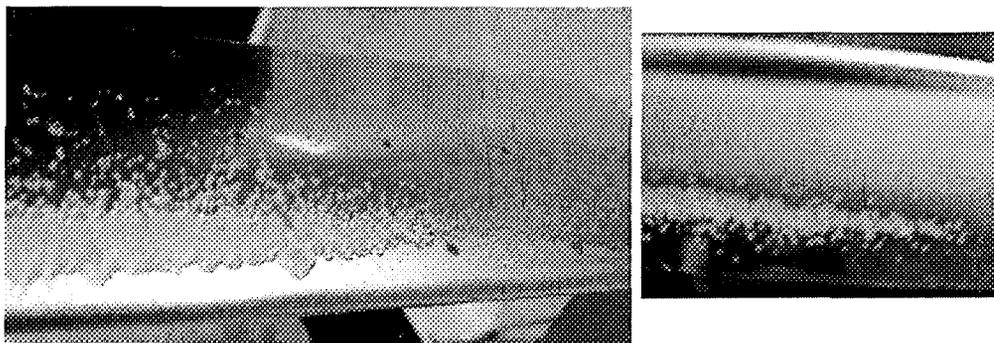
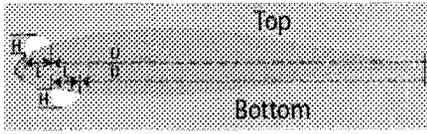


Figure C.88 : Image de la pale à la fin de l'essai n°28

Tableau C.125 : Formes de glace pour l'essai n°28

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,172	1,270	0,414	5,354	2,074	0,328	

C.2.37. Essai n°90

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats avec ceux des essais n°28 et 137.

Résultats

Tableau C.126 : Tableau des conditions pour l'essai n°90

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	32,7	±0,2	-19,8	±0,0	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.127 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT	µ	ΔT
13,1	6	45,6	±1,7	72,7	±1,8	6,9	±2,8	10,4	±2,1

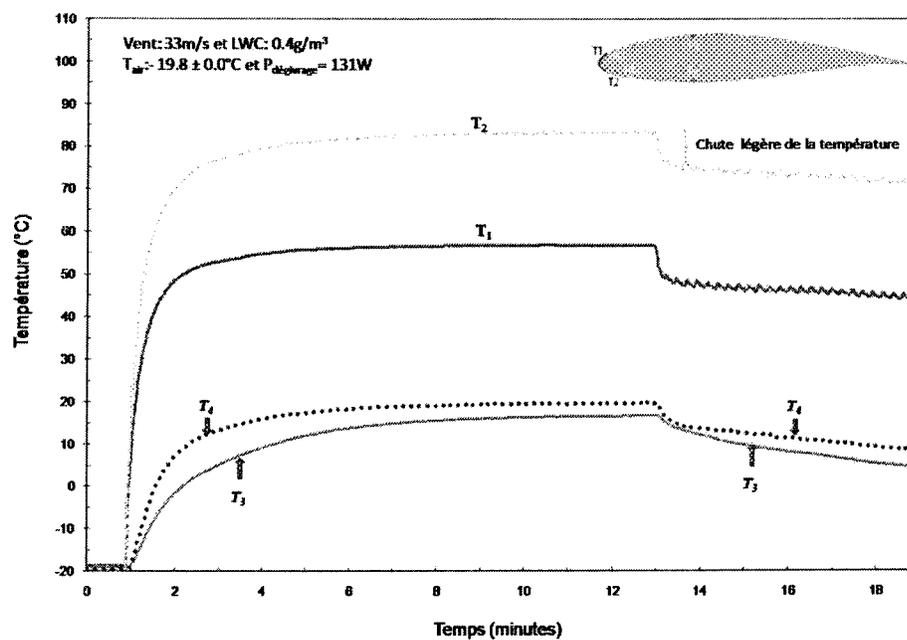


Figure C.89 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°90

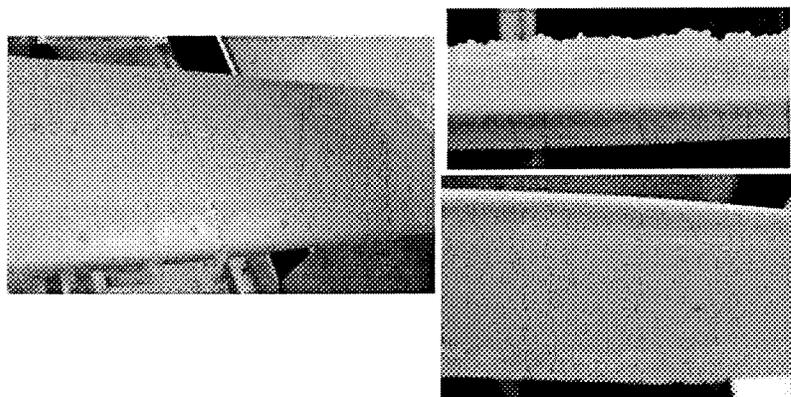


Figure C.90 : Image de la pale à la fin de l'essai n°90

Tableau C.128 : Formes de glace pour l'essai n°90

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
6,014	2,339	0,264	4,162	1,322	0,03	

C.2.38. Essai n°137

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale sans aucun revêtement et sans la pellicule plastique.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux des essais n°28 et 90.

Résultats

Tableau C.129 : Tableau des conditions pour l'essai n°137

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	32,6	±0,2	-19,5	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.130 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
		μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT	μ	ΔT
13,1	6	22,7	±0,7	51,9	±1,7	-8,5	±0,6	1,7	±1,9

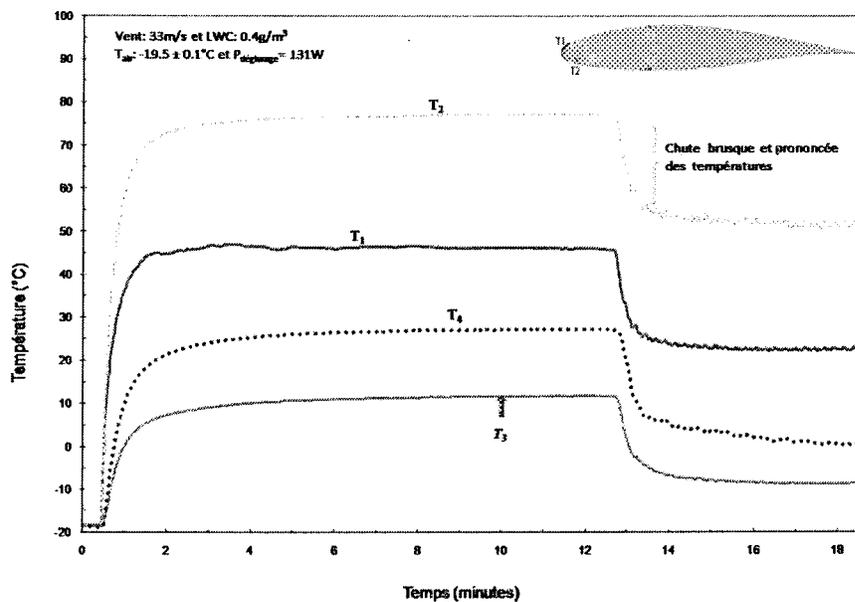


Figure C.91 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°137

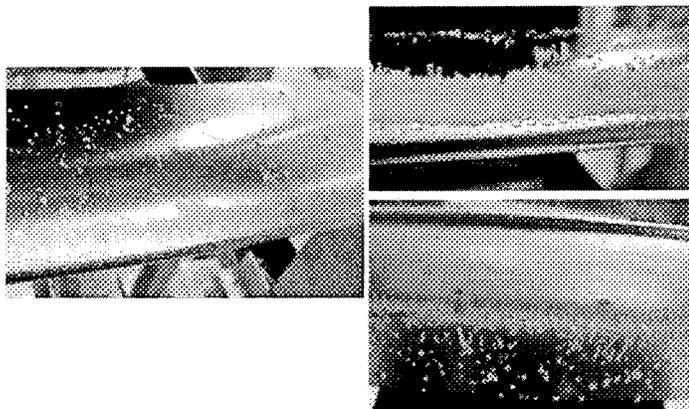
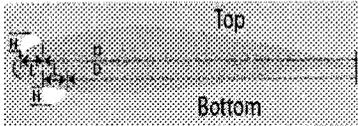


Figure C.92 : Image de la pale à la fin de l'essai n°137

Tableau C.131 : Formes de glace pour l'essai n°137

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
8,206	1,149	0,162	5,920	0,940	0,072	

C.2.39. Essai n°31

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale revêtue juste de la pellicule plastique.

Objectifs

Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°28.

Résultats

Tableau C.132 : Tableau des conditions pour l'essai n°31

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	32,8	$\pm 0,2$	-18,6	$\pm 0,0$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.133 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
6,6	6	10,9	$\pm 1,0$	25,7	$\pm 0,6$	-8,5	$\pm 1,5$	-1,1	$\pm 0,9$

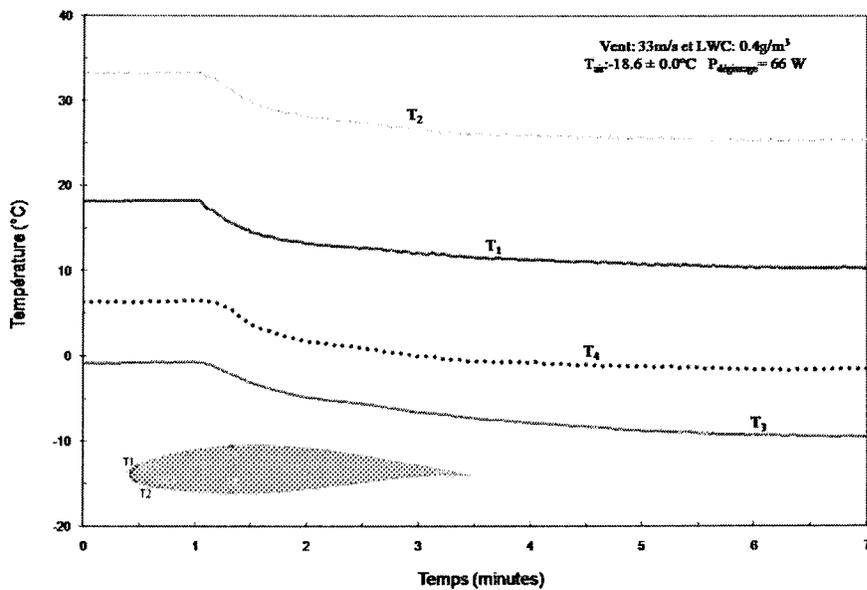


Figure C.93 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°31

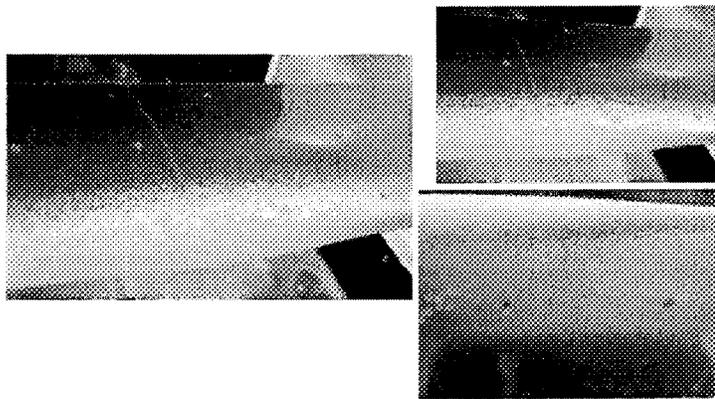
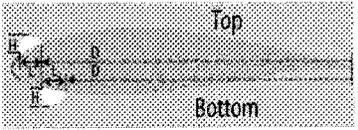


Figure C.94 : Image de la pale à la fin de l'essai n°31

Tableau C.134 : Formes de glace pour l'essai n°31

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,824	2,064	0,530	9,371	1,054	0,530	

C.2.40. Essai n°92

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectifs

- Trouver la puissance de ruissellement (P_{seuil}) pour le HIREC 1450 en condition climatique n°4.
- Faire une comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'essai n°28 pour ce qui est du comportement sous ruissellement et la valeur de P_{seuil} en condition climatique n°4.

Résultats

Tableau C.135 : Tableau des conditions pour l'essai n°92

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	32,6	±0,2	-20,1	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.136 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
12	6	39,2	±1,9	67,8	±1,9	2,7	±2,3	6,4	±2,3

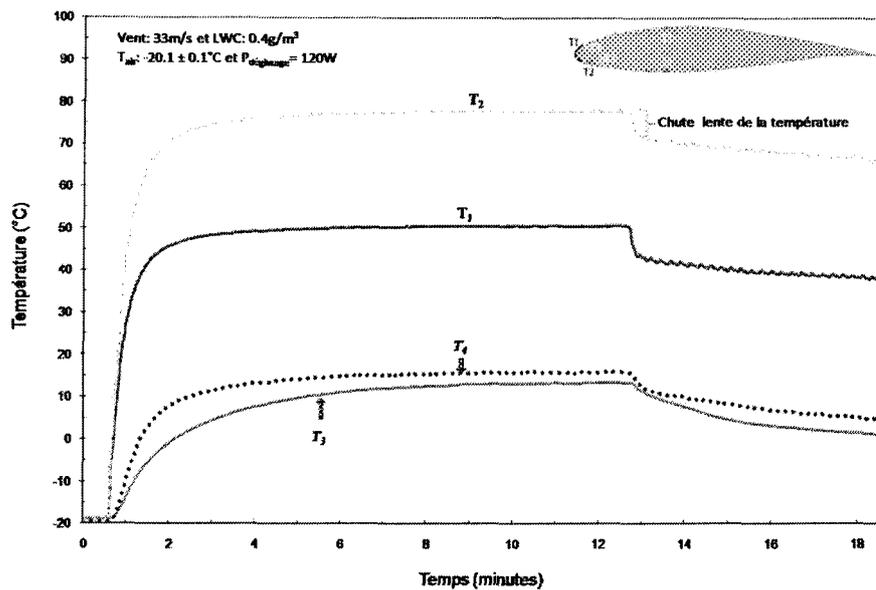


Figure C.95 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°92

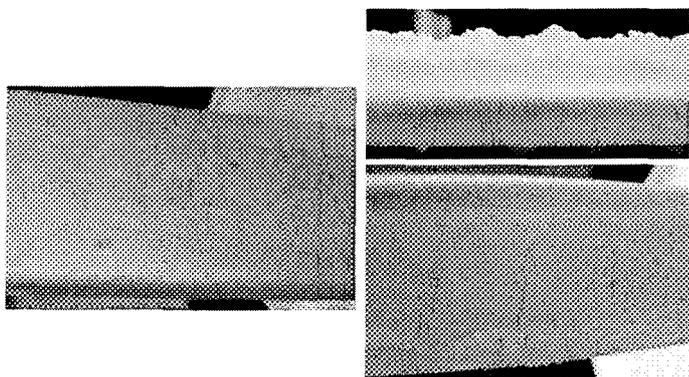
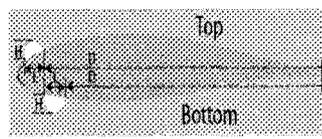


Figure C.96 : Image de la pale à la fin de l'essai n°92

Tableau C.137 : Formes de glace pour l'essai n°92

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
7,654	1,600	0,300	4,120	2,244	0,048	

C.2.41. Essai n°140

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectifs

Faire une reprise de l'essai n°92.

Résultats

Tableau C.138 : Tableau des conditions pour l'essai n°140

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	32,6	$\pm 0,2$	-18,9	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.139 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
12	6	38,8	$\pm 1,7$	69,5	$\pm 1,5$	-2,4	$\pm 1,5$	5,1	$\pm 1,7$

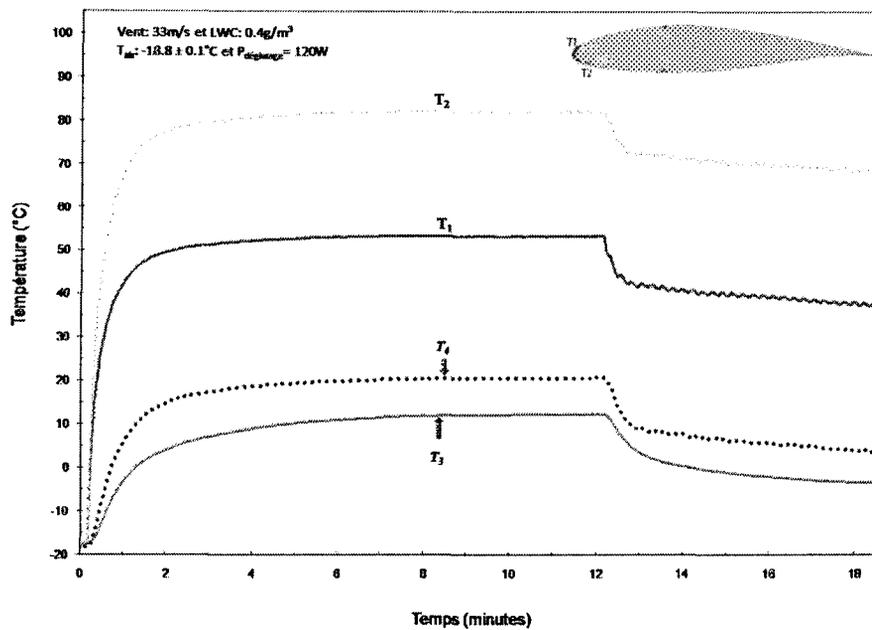


Figure C.97 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°140

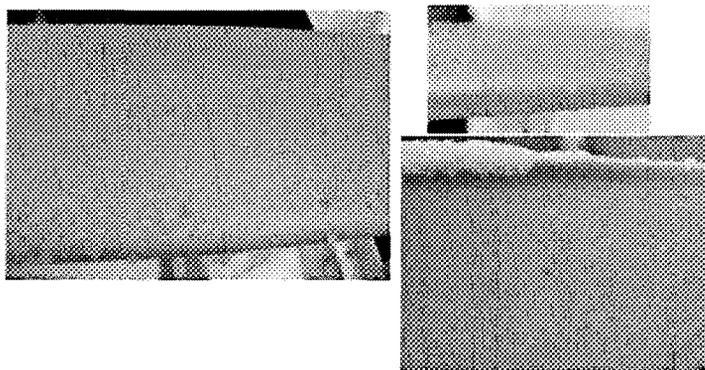


Figure C.98 : Image de la pale à la fin de l'essai n°140

Tableau C.140 : Formes de glace pour l'essai n°140

D _{Top} (cm)	L _{Top} (cm)	H _{Top} (cm)	D _{Bottom} (cm)	L _{Bottom} (cm)	H _{Bottom} (cm)	
7,820	2,026	0,138	3,974	2,470	0,001	

C.2.42. Essai n°143

Cet essai en mode antigivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la la pale revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe : le HIREC 1450.

Objectifs

Faire une reprise des essais n°92 et 140.

Résultats

Tableau C.141 : Tableau des conditions pour l'essai n°143

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	32,9	$\pm 0,1$	-18,9	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.142 : Températures en régime établi : moyennes et variations

Puissance (W/po ²)	Durée (minutes)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
		μ	ΔT						
12	6	35,1	$\pm 2,6$	65,9	$\pm 4,4$	-3,3	$\pm 1,9$	3,3	$\pm 3,4$

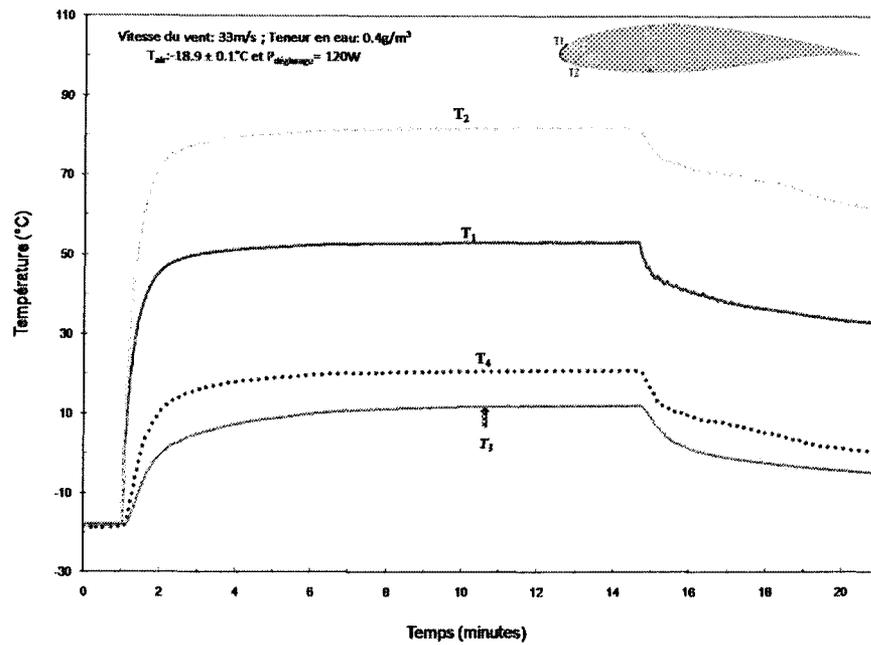


Figure C.99: Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°143

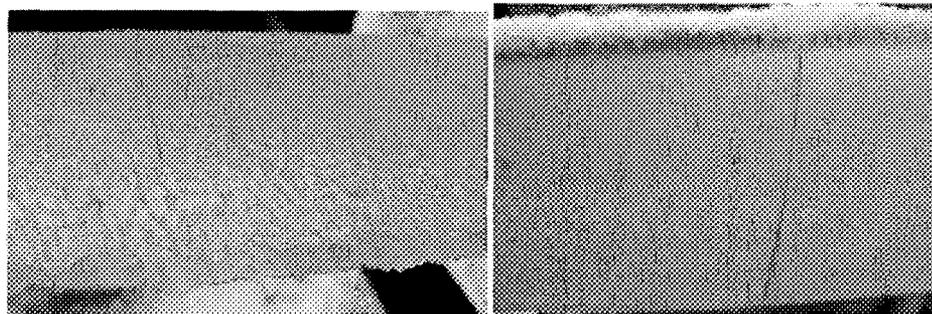
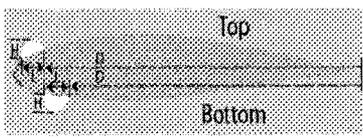


Figure C.100 : Image de la pale à la fin de l'essai n°143

Tableau C.143 : Formes de glace pour l'essai n°143

D_{Top} (cm)	L_{Top} (cm)	H_{Top} (cm)	D_{Bottom} (cm)	L_{Bottom} (cm)	H_{Bottom} (cm)	
8,170	1,818	0,110	4,650	2,442	0,001	

C.3. Essais en mode dégivrage

C.3.1. Dégivrage de l'intrados

La liste des essais effectués en mode «dégivrage de l'intrados» est présentée dans le Tableau 4.15. Les sections C.3.1.1 à C.3.1.7 présentent ces essais de façon détaillée.

C.3.1.1 Essai n°123

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale en aluminium revêtue de la pellicule plastique.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage et en régime sec pour la surface concernée et comparer les résultats obtenus avec ceux des essais n°127 et 120.

Résultats

Tableau C.144 : Tableau des conditions pour l'essai n°123

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,8	$\pm 0,2$	-20	$\pm 0,2$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.145 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°123

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
9,6	58,5	40,2	94,9	10,7	3,1	-6,2	16,1	-7,8

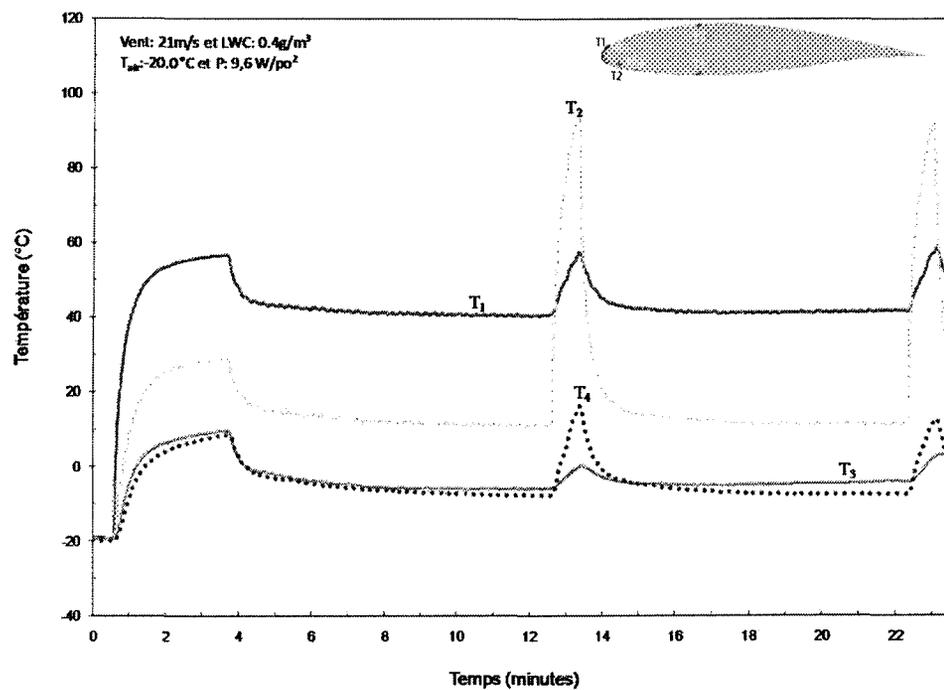


Figure C.101 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°123

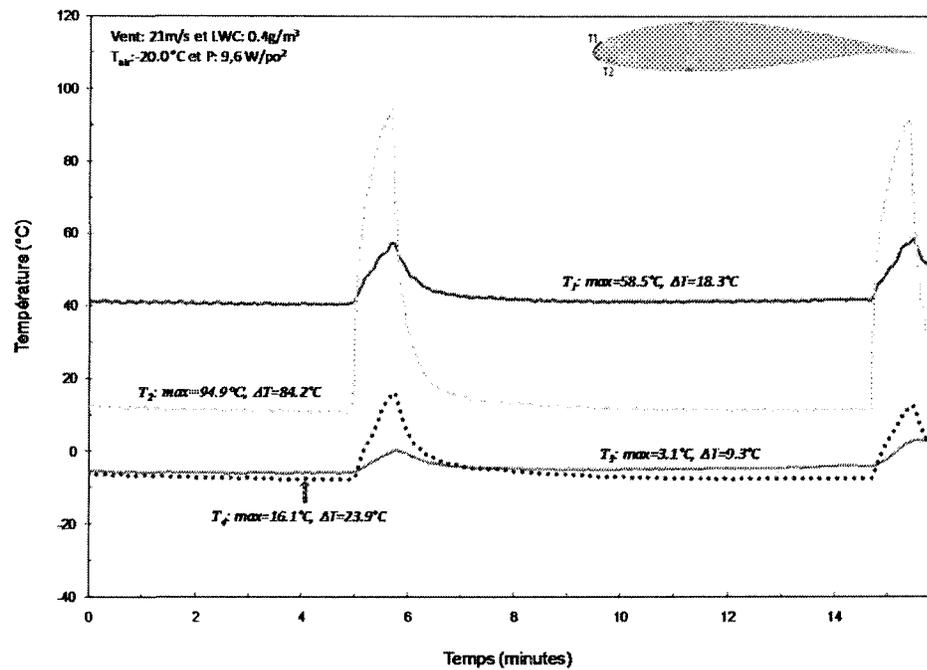


Figure C.102 : Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°123

C.3.1.2 Essai n°127

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale en aluminium sans la pellicule plastique et sans aucun des revêtements à l'étude.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage et en régime sec pour la surface concernée et comparer les résultats obtenus avec ceux des essais n°120 et 123.

Résultats**Tableau C.146 : Tableau des conditions pour l'essai n°127**

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	19,6	$\pm 0,7$	-20,4	$\pm 0,1$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.147 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°127

Puissance (W/po ²)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
9,6	56,8	34	96,8	6,6	2,2	-8,7	23,7	-10

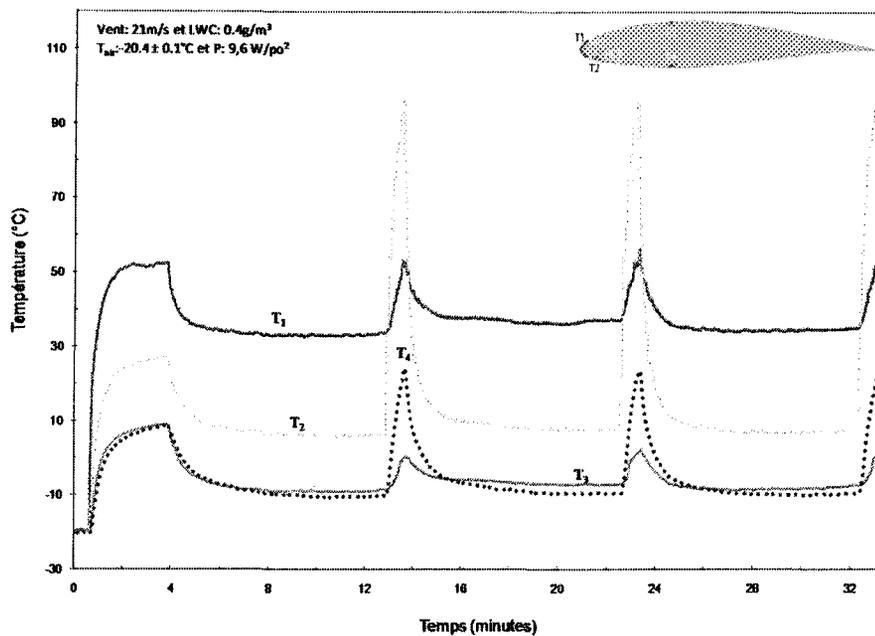


Figure C.103 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°127

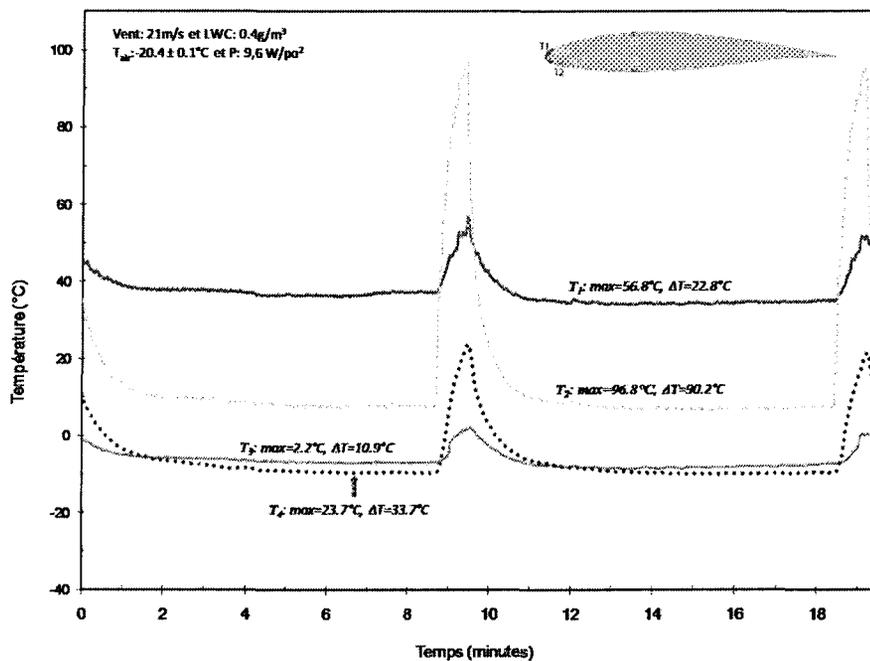


Figure C.104 : Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°127

C.3.1.3 Essai n°120

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale recouverte de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe, le HIREC 1450.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage et en régime sec pour la surface concernée et comparer les résultats obtenus avec ceux des essais n°123 et 127.

Résultats

Tableau C.148 : Tableau des conditions pour l'essai n°120

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,9	±0,2	-19,9	±0,2	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.149 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°120

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
9,77	69,7	45,5	117,5	3,2	0,0	-7,2	16,1	-8,3

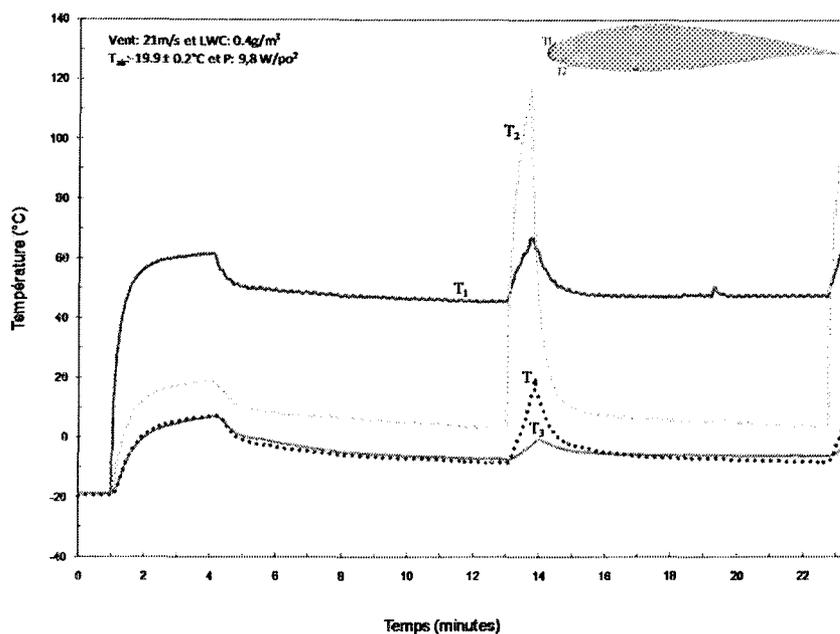


Figure C.105 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°120

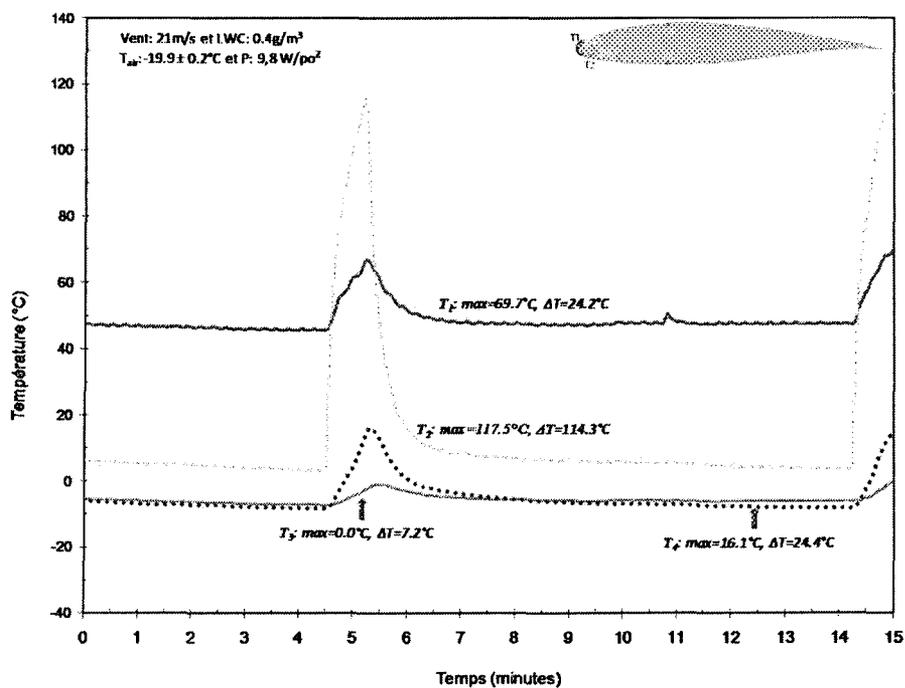


Figure C.106 : Image montrant le régime établi pour l'essai n°120

C.3.1.4 Essai n°124

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale en aluminium revêtue de la pellicule plastique.

Objectifs

Étudier le comportement en régime sec à forte vitesse pour la surface concernée et comparer les résultats obtenus avec ceux de l'essai n°119.

Résultats

Tableau C.150 : Tableau des conditions pour l'essai n°124

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	32,5	±0,3	-19,9	±0,2	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.151 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°124

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
11,2	67,1	44,7	108,0	11,1	3,6	-7,5	19,0	-8,7

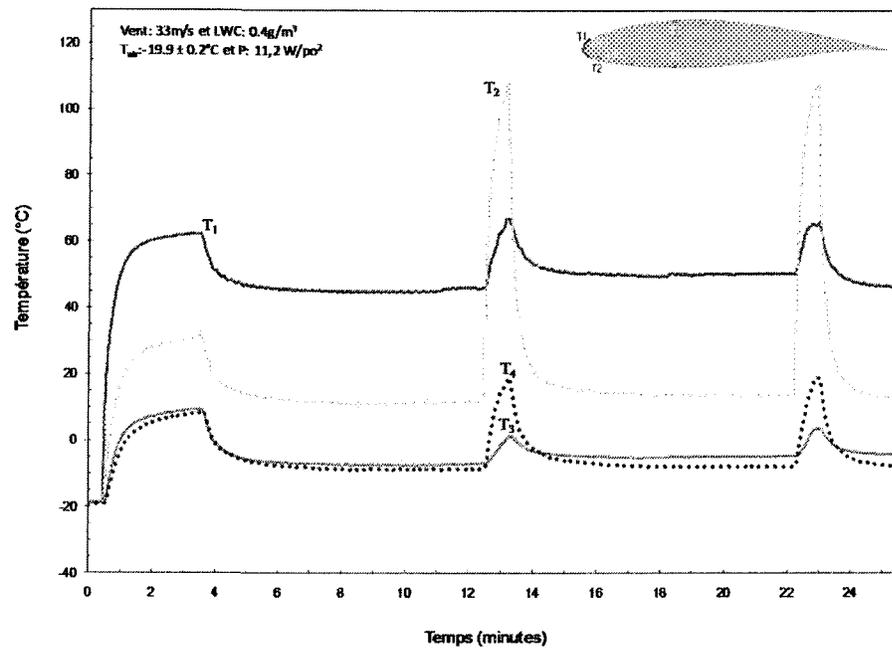


Figure C.107 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°124

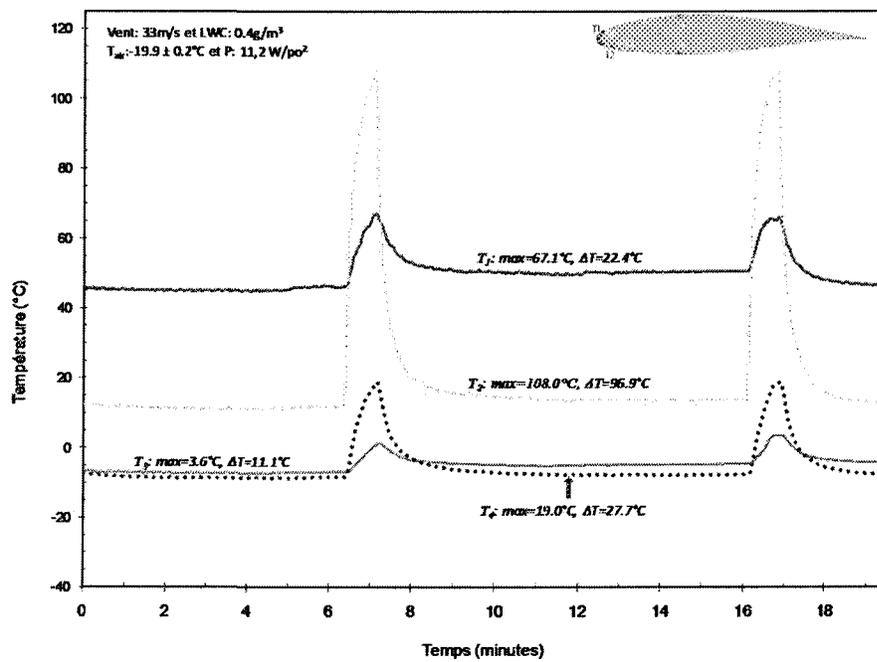


Figure C.108 : Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°124

C.3.1.5 Essai n°119

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale en aluminium revêtue de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe, le HIREC 1450.

Objectifs

Étudier le comportement en régime sec à forte vitesse pour la surface concernée et comparer les résultats obtenus avec ceux de l'essai n°124.

Résultats

Tableau C.152 : Tableau des conditions pour l'essai n°119

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	33	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	32,5	±0,3	-19,9	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.153 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°119

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
11,4	74,4	51,1	128,1	1,7	-1,7	-8,4	12	-10

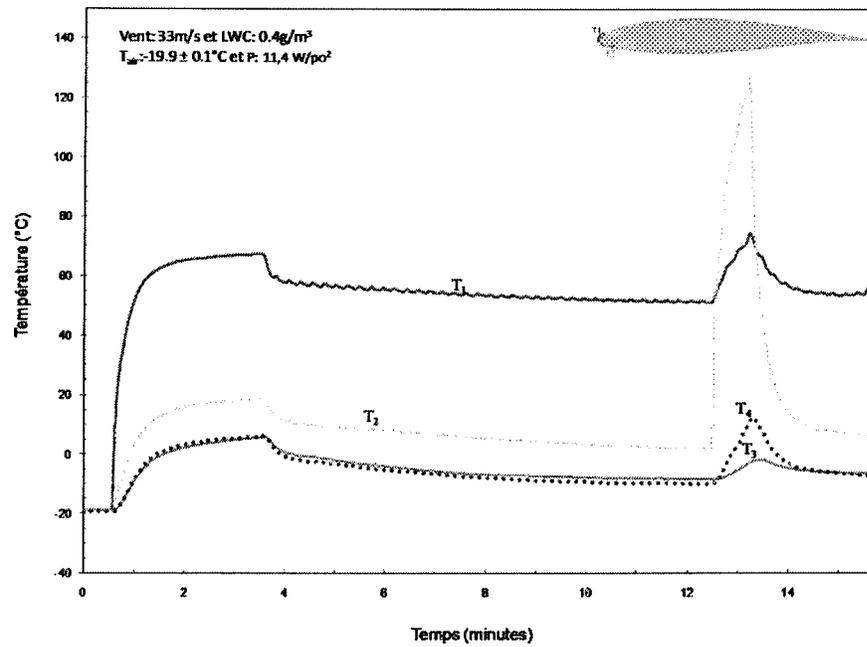


Figure C.109 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°119

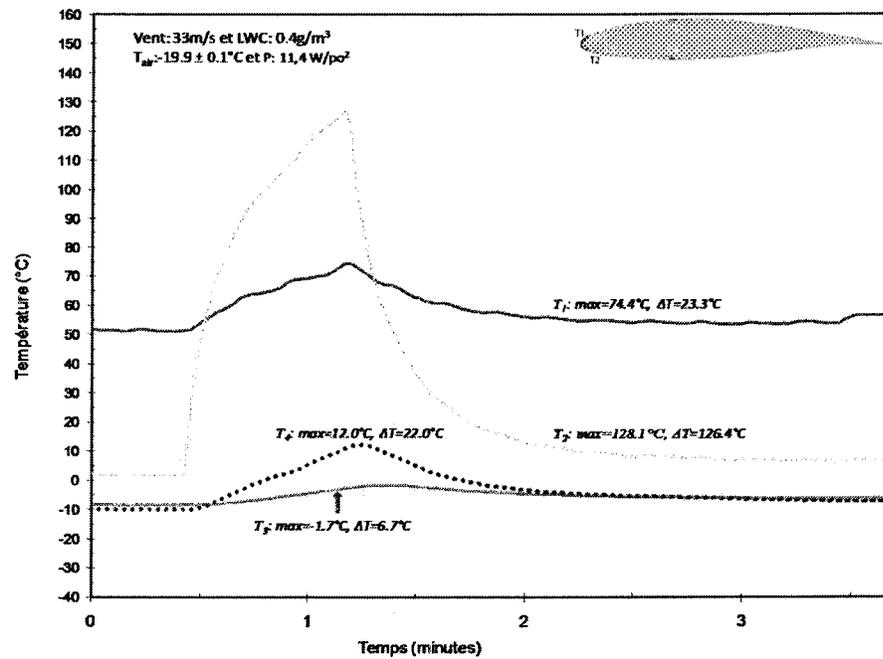


Figure C.110 : Image montrant un cycle de dégivrage pour l'essai n°119

C.3.1.6 Essai n°125

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale en aluminium revêtue de la pellicule plastique.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage et en régime sec pour la surface concernée et comparer les résultats obtenus avec ceux de l'essai n°130.

Résultats

Tableau C.154 : Conditions pour l'essai n°125

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	33,0	NA	-20,0	NA	0,4	18
Réelle	32,1	±0,5	-19,7	±0,3	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.155 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°125

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
10,9	65,0	45,7	91,5	11,5	0,5	-7,3	9,8	-8,5

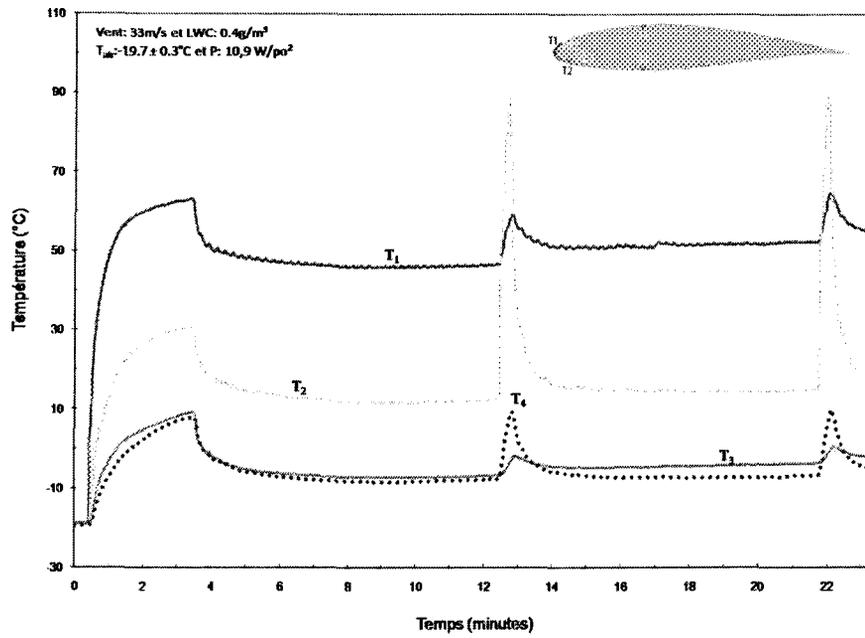


Figure C.111 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°125

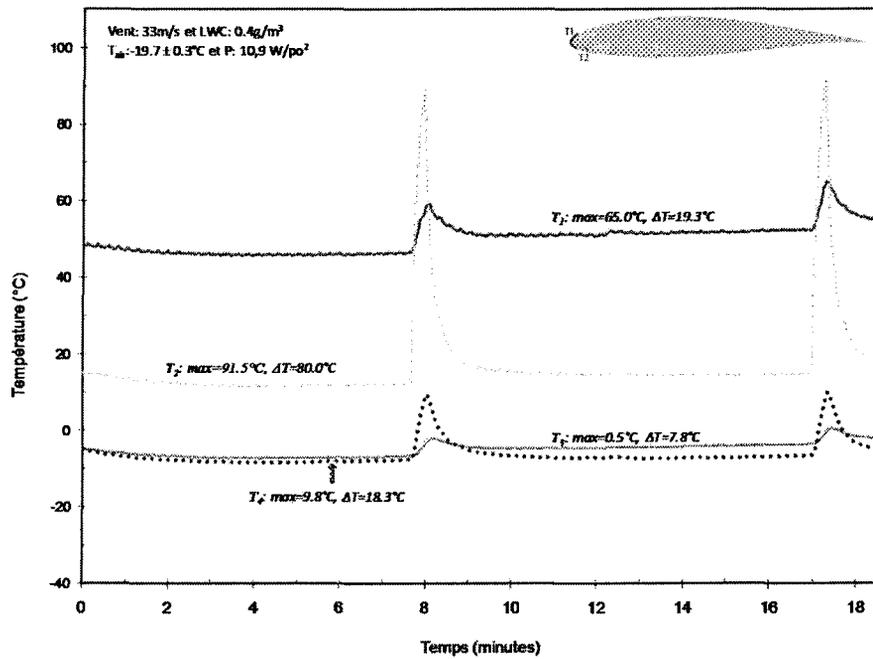


Figure C.112 : Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°125

C.3.1.7 Essai n°130

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°4 avec la pale en aluminium sans aucun revêtement, ni la pellicule plastique.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage et en régime sec pour la surface concernée et comparer les résultats obtenus avec ceux de l'essai n°125.

Résultats

Tableau C.156 : Tableau des conditions pour l'essai n°130

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	33,0	NA	-20,0	NA	0,4	18
Réelle	32,5	±0,3	-19,4	±0,2	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.157 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°130

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
10,9	51,5	36	90,3	6,5	-5,0	-10,2	17,5	-11,5

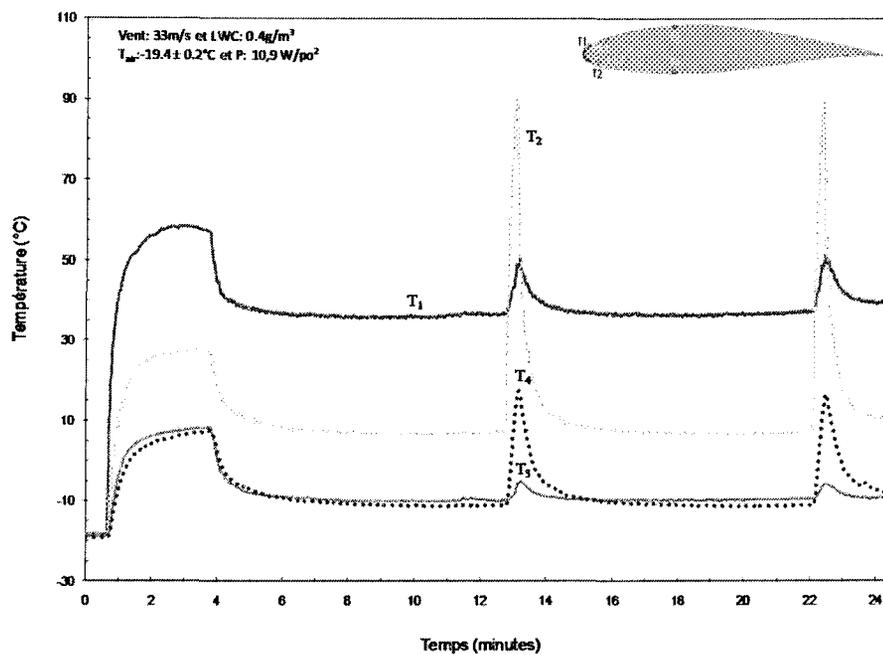


Figure C.113 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°130

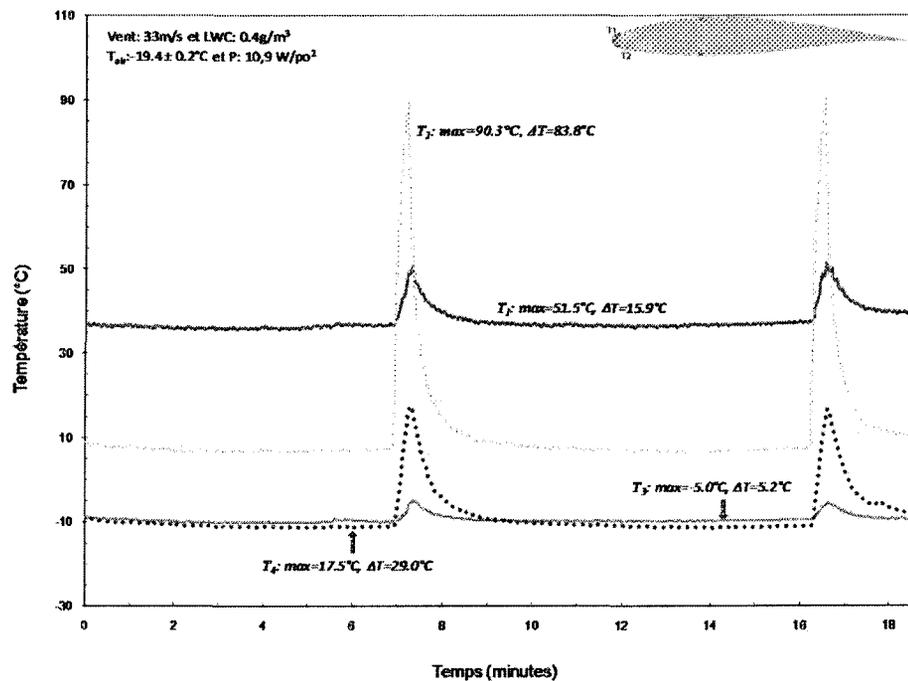


Figure C.114 : Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°130

C.3.2. Dégivrage du bord d'attaque

La liste des essais effectués avec ce mode de dégivrage est présentée dans les tableaux ci-dessous (Tableau C.158 et Tableau C.159). Ils sont regroupés par condition climatique. Les sections C.3.2.1 à C.3.2.8 présentent ces essais de façon détaillée.

Tableau C.158 : Liste des essais effectués en régime humide

Revêtement	Condition			N° d'essai	Puissances (W)		Temps (s)		P _{surf} (W/po ²)
	Vitesse (m/s)	T _{air} (°C)	LWC (g/m ³)		P1	P2	t _{on}	t _{off}	
Pellicule plastique	21	-5	0,4	159	53,7	30	75	360	3,9
Pellicule plastique +HIREC	21	-5	0,4	155, 156	53	25	60	360	3,3
Pellicule plastique +Wearlon	21	-5	0,4	164	53,7	27,5	70	360	3,6

Tableau C.159 : Liste des essais effectués en régime sec

Revêtement	Condition			N° d'essai	Puissances (W)		Temps (s)		P _{surf} (W/po ²)
	Vitesse (m/s)	T _{air} (°C)	LWC (g/m ³)		P1	P2	t _{on}	t _{off}	
Pellicule plastique	21	-20	0,4	162	109,2	75,7	70	360	9,4
Pellicule plastique +HIREC	21	-20	0,4	148 ; 150	108,6	86,5	40	360	8,7
Pellicule plastique +Wearlon	21	-20	0,4	166	109,2	75,7	35	360	8,5

C.3.2.1 Essai n°159

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale en aluminium revêtue de la pellicule plastique.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage (« du bord d'attaque ») sous le régime d'accrétion humide pour le revêtement concerné et comparer les résultats obtenus avec ceux des essais n°155 ou 156 et 164.

Résultats

Tableau C.160 : Tableau des conditions pour l'essai n°159

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	21	±0,08	-5,7	±0,3	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.161 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°159

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
3,9	35,7	1,4	40,5	22,7	6,2	-2,1	11,5	3,9

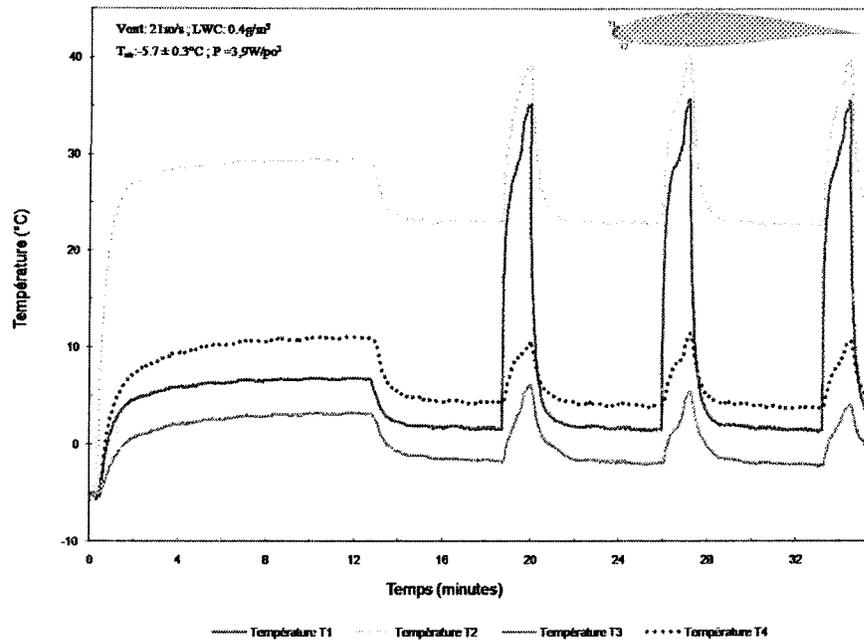


Figure C.115 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°159

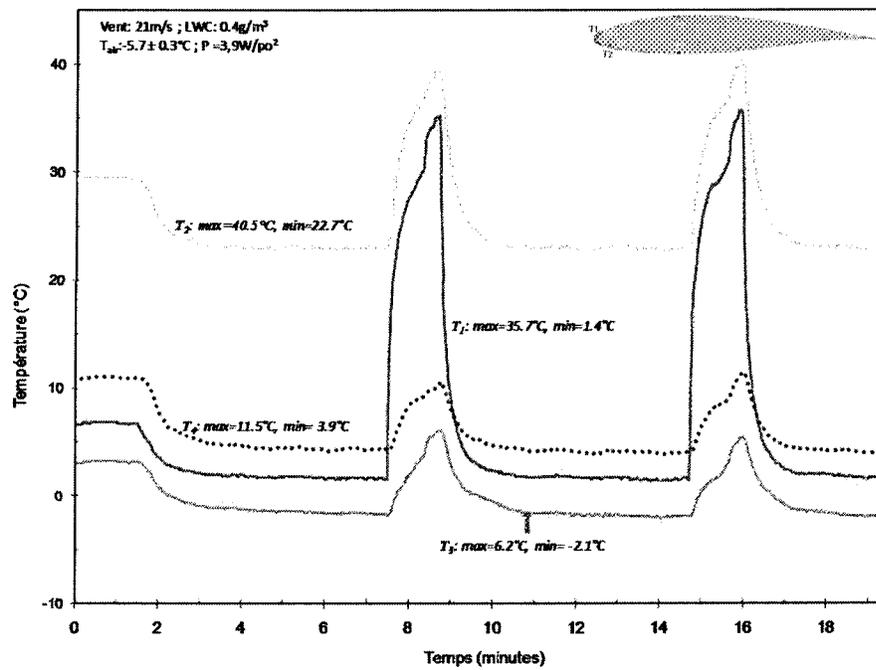


Figure C.116 : Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°159

C.3.2.2 Essai n°155

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale en aluminium recouverte de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe, le HIREC 1450.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage (« du bord d'attaque ») sous le régime d'accrétion humide pour le revêtement concerné et comparer les résultats obtenus avec ceux des essais n°159 et 164.

Résultats

Tableau C.162: Tableau des conditions pour l'essai n°155

	U_{air} (m/s)		T_{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,2	$\pm 0,4$	-5,7	$\pm 0,2$	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.163 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°155

Puissance (W/po ²)	T_1 (°C)		T_2 (°C)		T_3 (°C)		T_4 (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
3,3	40,4	1,0	39,3	25,1	5,1	-1,2	10,0	1,3

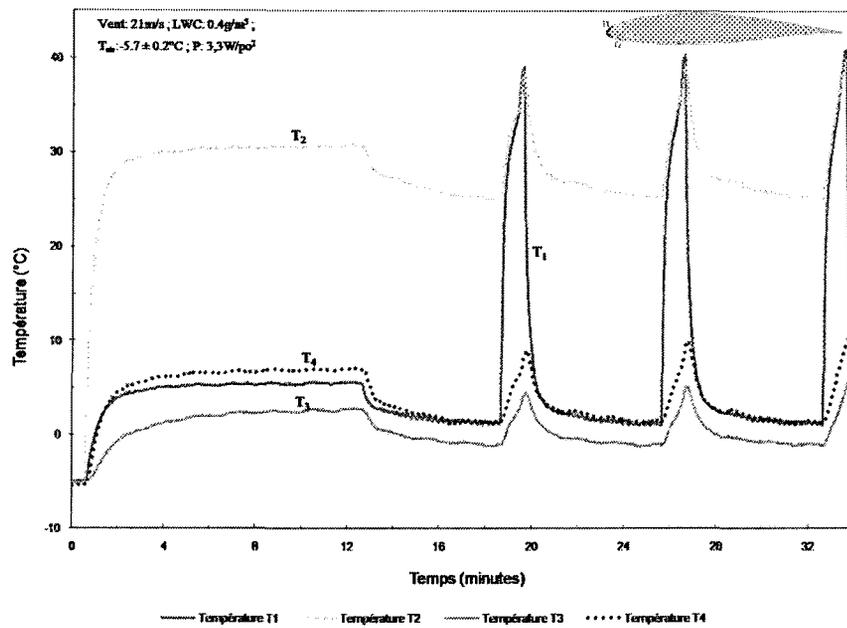


Figure C.117 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°155

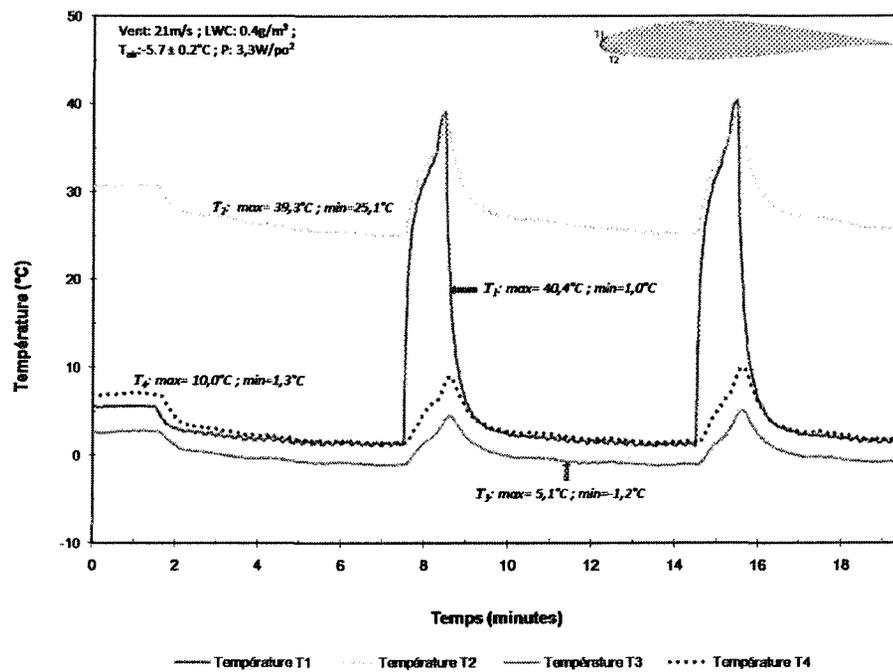


Figure C.118 : Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°155

C.3.2.3 Essai n°156

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale en aluminium recouverte de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe, le HIREC 1450.

Objectifs

Répéter l'essai n°155

Résultats

Tableau C.164 : Tableau des conditions pour l'essai n°156

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,9	±0,2	-5,7	±0,2	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.165 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°156

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
3,3	41,9	0,8	40,8	25,1	6,2	-1,2	11,1	1,3

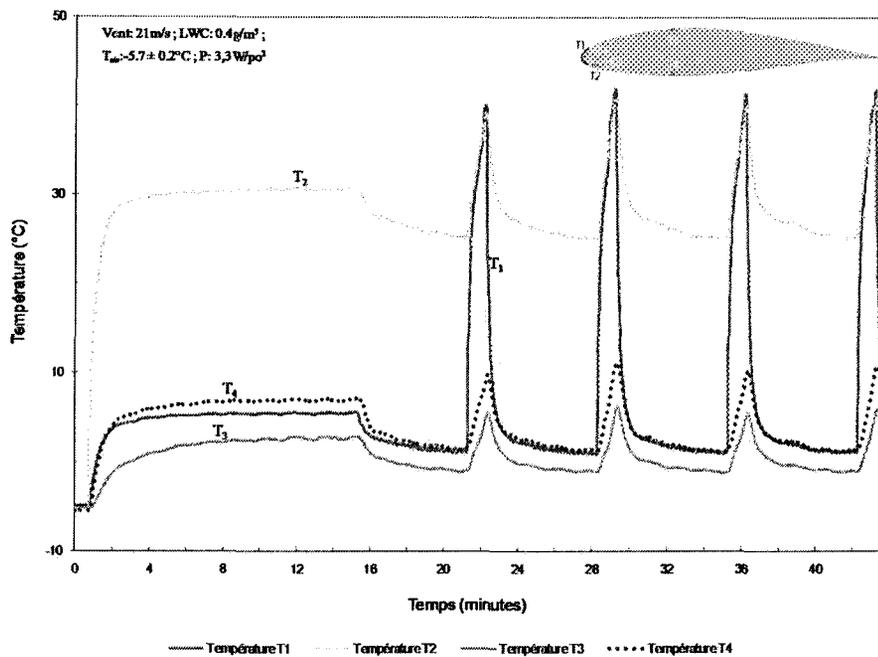


Figure C.119 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°156

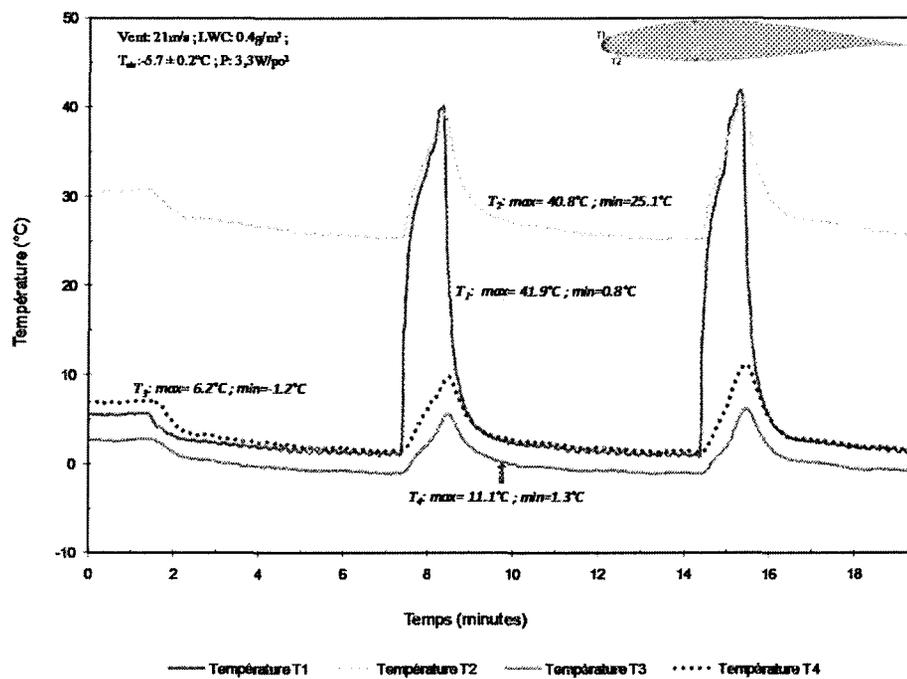


Figure C.120 : Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°156

C.3.2.4 Essai n°164

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°1 avec la pale en aluminium recouverte de la pellicule plastique et une couche du revêtement hydrophobe Wearlon F1-Ice.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage (« du bord d'attaque ») sous le régime d'accrétion humide pour le revêtement concerné et comparer les résultats obtenus avec ceux des essais n°155 ou 156 et 159.

Résultats

Tableau C.166 : Tableau des conditions pour l'essai n°164

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-5	NA	0,4	18
Réelle	20,1	±0,6	-5,6	±0,2	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.167 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°164

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
3,6	43,4	2,1	40,6	26,6	11,4	0,9	8,7	1,5

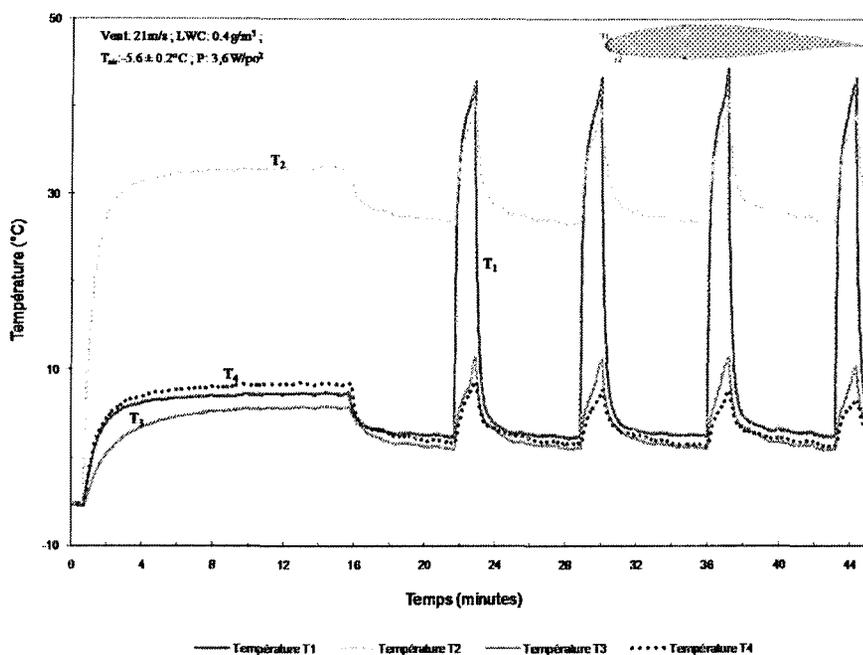


Figure C.121 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°164

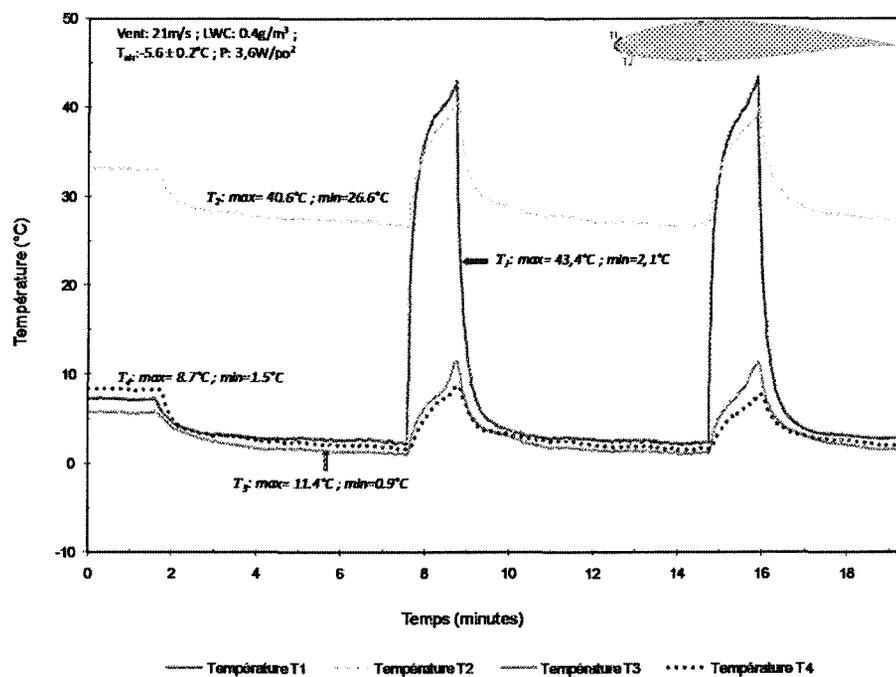


Figure C.122 : Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°164

C.3.2.5 Essai n°162

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale en aluminium revêtue de la pellicule plastique.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage (« du bord d'attaque ») sous le régime d'accrétion sec pour le revêtement concerné et comparer les résultats obtenus avec ceux des essais n°148 ou 150 et 166.

Résultats

Tableau C.168 : Tableau des conditions pour l'essai n°162

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,4	±0,3	-20,6	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.169 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°162

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
9,3	76,9	1,0	97,7	55,4	12,7	-9,4	32,1	8,5

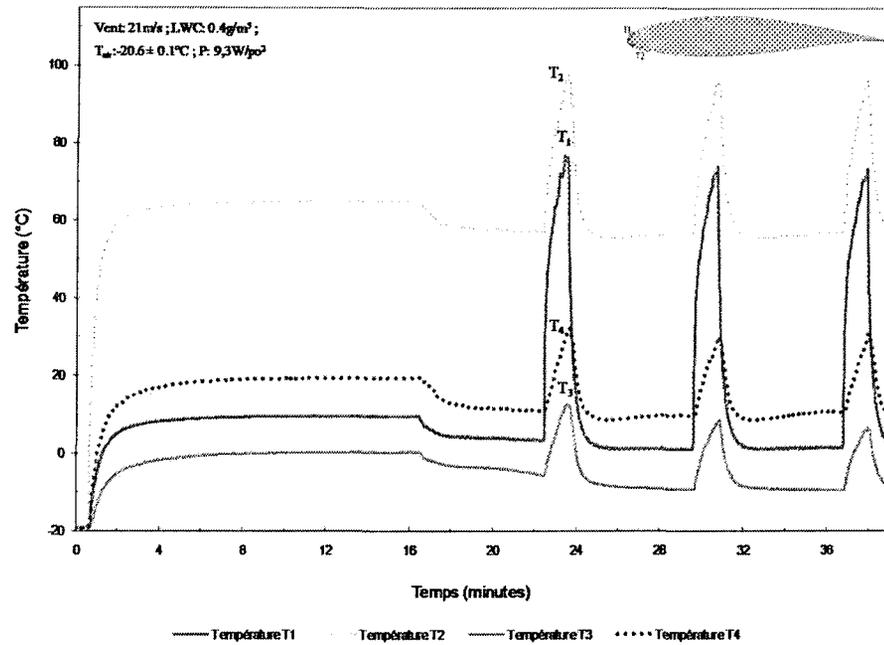


Figure C.123 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°162

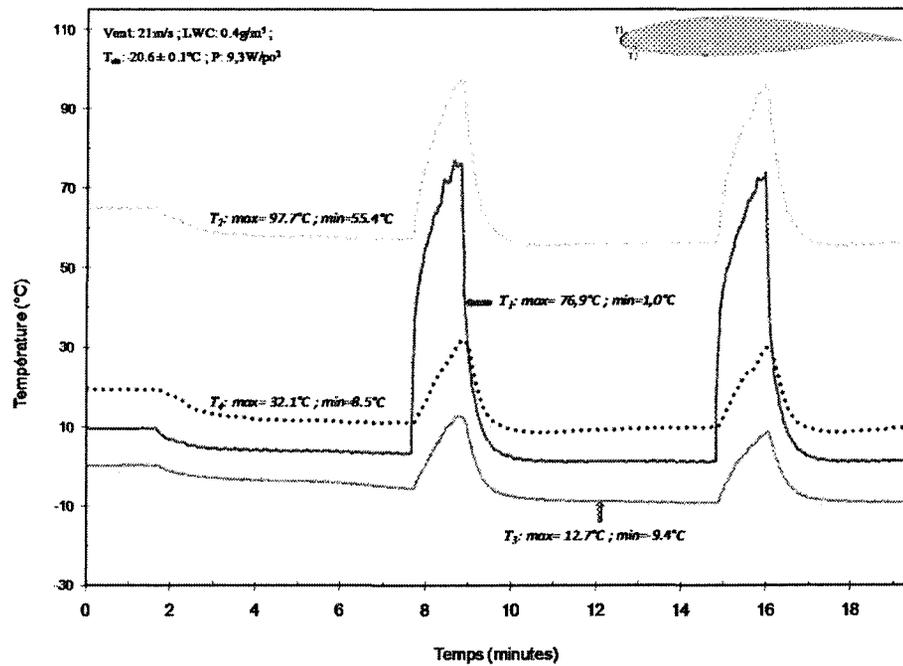


Figure C.124: Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°162

C.3.2.6 Essai n°148

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale en aluminium recouverte de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe, le HIREC 1450.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage (« du bord d'attaque ») sous le régime d'accrétion sec pour le revêtement concerné et comparer les résultats obtenus avec ceux des essais n°162 et 166.

Résultats

Tableau C.170 : Tableau des conditions pour l'essai n°148

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (μm)
	μ	ΔT	μ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	21	±0,08	-20,5	±0,1	0,4	18

Où μ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.171 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°148

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
8,7	78,7	2,7	102,2	76,7	7,1	-5,9	22,2	4,0

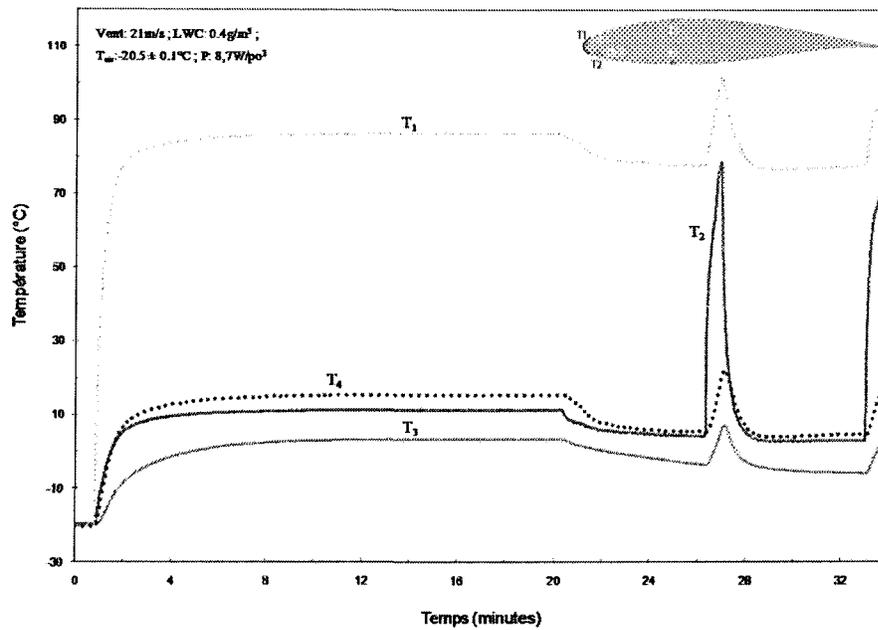


Figure C.125: Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°148

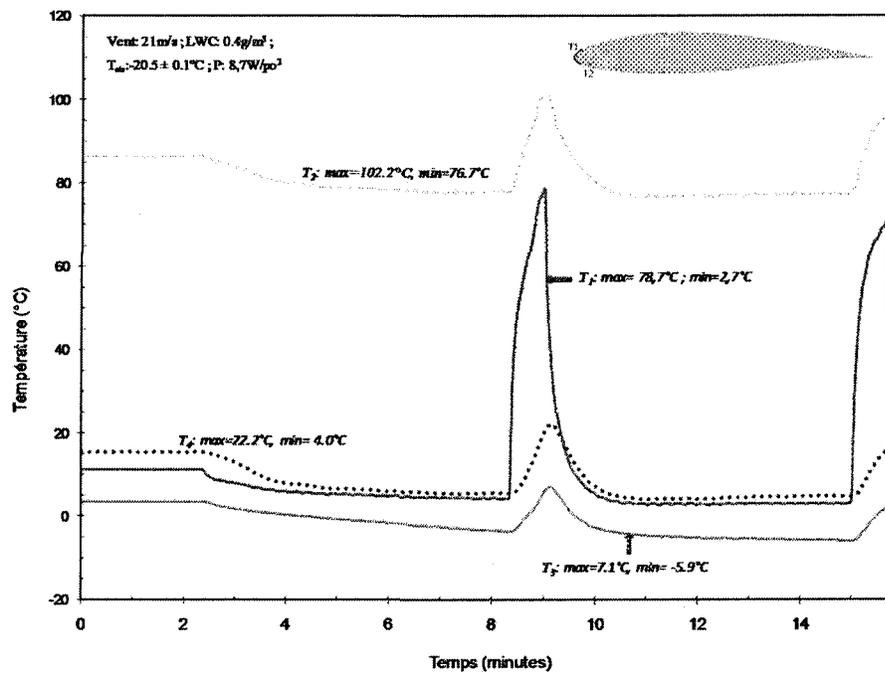


Figure C.126: Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°148

C.3.2.7 Essai n°150

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale en aluminium recouverte de la pellicule plastique et une couche du revêtement superhydrophobe, le HIREC 1450.

Objectifs

Répéter l'essai n°148

Résultats

Tableau C.172 : Tableau des conditions pour l'essai n°150

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,7	±0,4	-20,5	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.173 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°150

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
8,7	76,1	-0,1	99,1	70,2	5,5	-1,3	20,9	-2,3

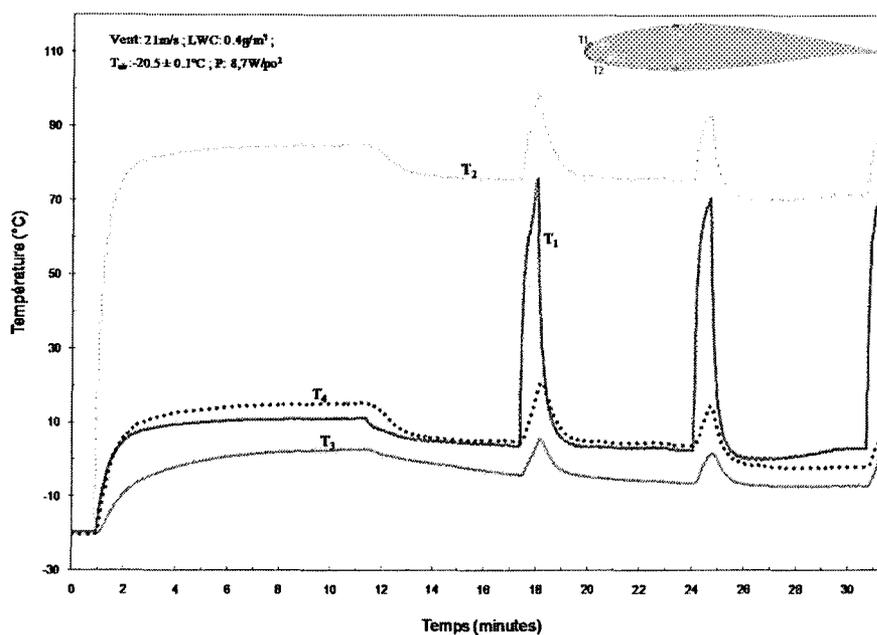


Figure C.127 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°150

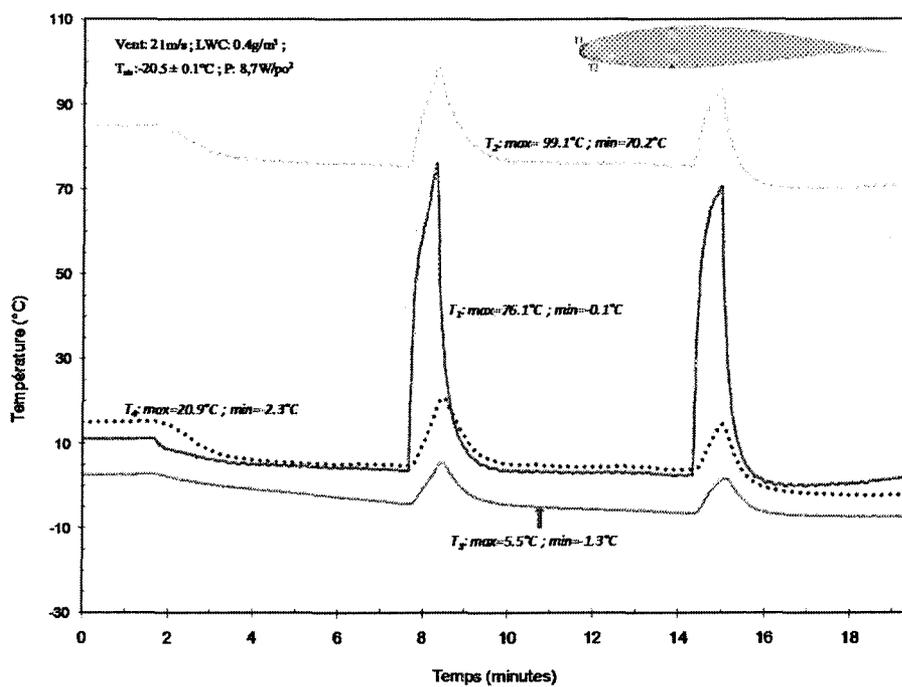


Figure C.128: Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°150

C.3.2.8 Essai n°166

Cet essai en mode dégivrage, a été fait sous la condition climatique n°3 avec la pale en aluminium recouverte de la pellicule plastique et une couche du revêtement hydrophobe Wearlon F1-Ice.

Objectifs

Étudier le comportement en mode dégivrage (« du bord d'attaque ») sous le régime d'accrétion sec pour le revêtement concerné et comparer les résultats obtenus avec ceux des essais n°148 ou 150 et 162.

Résultats

Tableau C.174 : Tableau des conditions pour l'essai n°166

	U _{air} (m/s)		T _{air} (°C)		LWC (g/m ³)	MVD (µm)
	µ	ΔT	µ	ΔT		
Ciblée	21	NA	-20	NA	0,4	18
Réelle	20,2	±0,6	-20,6	±0,1	0,4	18

Où µ est la moyenne et ΔT l'écart-type.

Tableau C.175 : Variation des températures internes en régime établi pour l'essai n°166

Puissance (W/po ²)	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
8,5	90,4	7,1	100,7	73	27,0	3,6	23,0	9,0

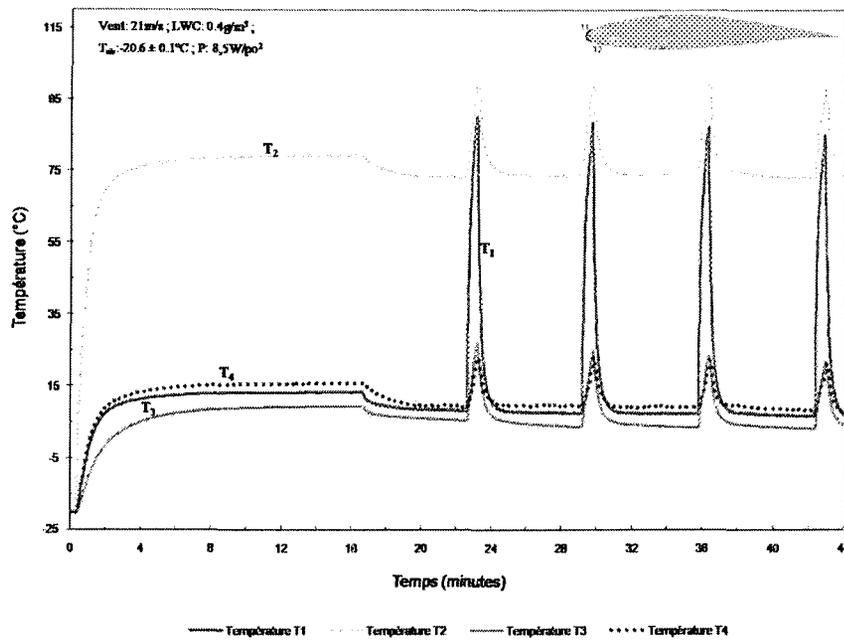


Figure C. 129 : Courbes des températures internes en fonction du temps pour l'essai n°166

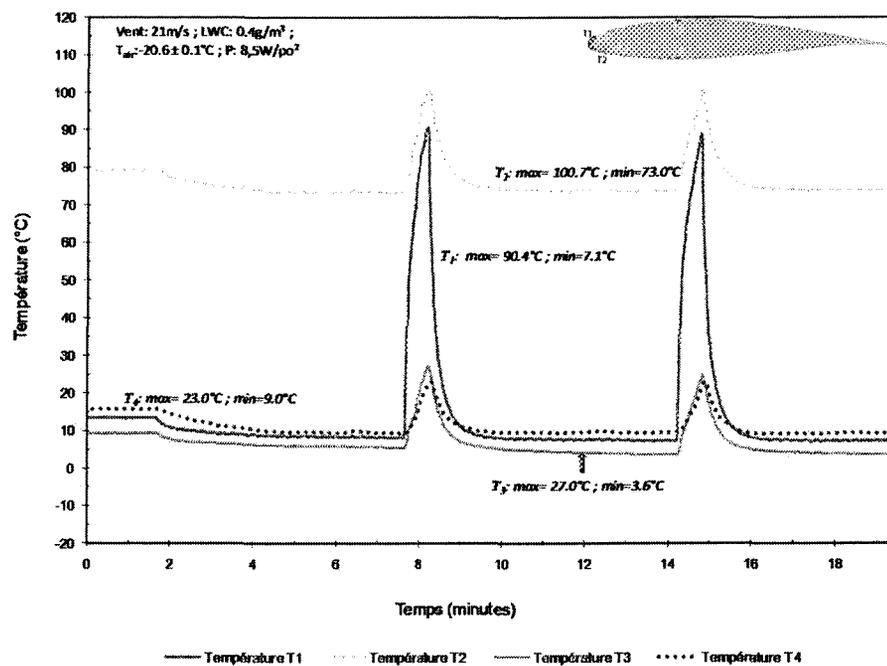


Figure C. 130: Image montrant deux cycles de dégivrage pour l'essai n°166

ANNEXE D

INFORMATIONS SUR LES PRODUITS

PU 8592 E

3M™ High Performance Protective Film

Physical Properties (Typical Values)

Characteristics	Results	Test Method
Thickness (film+adhesive)	200 ± 20 µm	3M LS 034
Weight per unit (film+adhesive)	231,3 ± 16,2 g/m ²	3M LS 041
Tensile Strength, Elongation	7206 N/cm ² , 689 %	3M LS 005,006
Dimensional Stability (Shrinkage) - after 7d 80 °C, 30 min. 120 °C	< 0,1 % / < 0,1 %	3M LS 026

Performance Properties (Typical Values)

180° Peel Adhesion (Aluminium)	Results	Test Method
30 min. at SLC	5,8 N/cm	3M LS 007
72 h at SLC	8,7 N/cm	3M LS 007
7 d at 80 °C	10,4 N/cm	3M LS 008
7 d at 38 °C, 98 % moisture	9,7 N/cm	3M LS 010
Thermal Cycling	10,2 N/cm	3M LS 009
Surface Appearance	Results	Test Method
7 d at 80 °C	no changes	3M LS 019
30 min. 120 °C	no changes	3M LS 019
7 d at 38 °C, 98 % moisture	no changes	3M LS 019
Thermal Cycling	no changes	3M LS 019
Resistance to Wax and Dewax	no changes	3M LS 024
Resistance to Fluids (25 rub cycles) - Windshield Washer Solvent - Antifreeze - Car Wash Detergent - Oil	no changes no changes no changes no changes	3M LS 023 3M LS 023 3M LS 023 3M LS 023
Gasoline Resistance (dip test / 6 rub cycles) - Unleaded Super Fuel - Diesel Fuel	no changes / no changes no changes / no changes	3M LS 015 3M LS 015
Abrasion Resistance (Taber Abraser: 1000 cycles CS 17)	no rub through	3M LS 028
Impact Resistance	no chipping or cracking	3M LS 112
High Pressure Cleaning	no surface damage or adhesion loss	3M TMAE 002

Additional Information

This data sheet contains specific information about the product. General characteristics and application rules of high performance protective films are available separately.

Important notice to purchaser

All statements, Technical information and recommendations herein are based on tests we believe to be reliable, but the accuracy or completeness thereof is not guaranteed. Please ensure before using our product that it is suitable for your intended use. All questions of liability relating to this product are governed by the Terms of Sale subject, where applicable, to the prevailing law.



3M Laboratories (Europe)
Zweigniederlassung der 3M Deutschland GmbH
Automotive Laboratory Europe
Carl-Schurz-Strasse 1
D-41453 Neuss
Tel. (49)-2131-142890
Fax. (49)-2131-143849

PU8592E High Performance Protective Film_02/ps
Page 2 of 2
Issue Date: 11/2002
Ref: TL-8455