

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**ÉVALUATION DE L'ADHÉRENCE DE LA GLACE À
PARTIR DU MODÈLE RÉDUIT D'UNE PALE
D'HÉLICOPTÈRE EN ROTATION**

MÉMOIRE Présenté à
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

Comme exigence partielle du programme de maîtrise en ingénierie
Pour l'obtention du grade de maître en sciences appliquées
(M. Sc. A.)

Par
GAETAN GOUEZ

JANVIER, 2010



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Résumé

Afin d'améliorer les connaissances relatives aux propriétés adhésives de la glace sur une pale d'hélicoptère en rotation, le Laboratoire International des Matériau Antigivres (LIMA) en collaboration avec le Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatiale du Québec (CRIAQ) et le Conseil National de Recherche du Canada (CNRC) a développé un modèle réduit d'un rotor d'hélicoptère qui a été installé dans une soufflerie réfrigérée générant des précipitations givrantes afin de simuler les conditions verglaçantes affectant les hélicoptères en vol. L'objectif de ce mémoire est de présenter les résultats relatifs à la validation du modèle réduit du phénomène d'accrétion de glace sur une pale d'hélicoptère en rotation et dans les résultats d'adhérence de la glace calculés analytiquement à partir des simulations expérimentales.

Ce travail de recherche s'appuie principalement sur l'acquisition de données expérimentales obtenues à l'aide d'un modèle réduit. Ce modèle réduit à l'échelle 1/18^{ème} comprend : un rotor d'un diamètre de 0,78 m et deux pales d'aluminium de profil NACA-0012 de longueur 0,315 m avec une corde de 69,64 mm. Un moteur électrique entraîne le rotor et les pales. La section d'essai de la soufflerie réfrigérée du LIMA mesure 1,7 m de long par 0,914 m de large par 0,762 m de hauteur. La précipitation verglaçante est simulée à l'aide d'une rampe oscillante de neuf gicleurs pulvérisant des gouttelettes en amont de la section d'essai. La vitesse de l'écoulement d'air est de 15 m/s. Les essais de simulations ont été réalisés à des températures contrôlées variant entre -5 et -20 °C.

En réalisant le bilan mécanique des forces agissant sur la pale, la valeur de l'adhérence de la glace est calculée. Le bilan mécanique contient trois principales composantes: la force centrifuge, la cohésion de la glace et l'adhérence de la glace sur la pale. Un essai consiste à

givrer les pales jusqu'à ce que le poids du dépôt de glace soit suffisamment élevé pour qu'il se détache de la pale sous l'action de la force centrifuge. L'adhérence peut ainsi être calculée à partir de deux méthodes dépendamment de l'issue de l'essai. Si une pale est déglacée, l'adhérence est calculée en utilisant la masse du dépôt qui ne s'est pas détachée; c'est la méthode de la masse. Si les deux pales se sont déglacées, l'épaisseur de glace sur les pales est extrapolée pour ensuite déduire la masse de glace décrochée; c'est la méthode de l'épaisseur.

Les 150 essais réalisés ont montré que les formes de glace accrétées concordent avec celles décrites par la littérature et varient selon la température de l'air pendant l'essai. Effectivement, il apparaît que l'épaisseur de glace accrétée diminue lorsque la température augmente dû à l'écoulement d'une partie de l'eau captée par la pale. À -15°C , la valeur de l'adhérence de la glace sur la pale d'aluminium, obtenues selon les deux méthodes varie entre 0,19 MPa pour la méthode de la masse et 0,20 MPa par la méthode de l'épaisseur avec un écart type moyen de 25 %.

Les résultats d'adhérence de la glace calculés à partir du modèle réduit concordent très bien avec ceux de la littérature lorsque l'accrétion de glace est réalisée dans des conditions similaires. Les résultats obtenus par la méthode de la masse et par la méthode de l'épaisseur sont très proche, et en deçà des disparités qui existent entre les résultats d'une même méthode. La formule semi-empirique pour déterminer l'adhérence à partir du modèle réduit de pale en rotation est donc valide. Il sera donc possible d'utiliser ce nouvel outil afin de par exemple, évaluer l'efficacité de revêtements glaciophobes à différentes températures sur des pales d'hélicoptères.

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Jean Perron, ainsi que mes codirecteurs, Guy Fortin et Nirmal Sinha, pour l'opportunité qu'ils m'ont offerte, les fonds, le temps, et le soutien qu'ils m'ont apporté durant tout ce projet. Je remercie également les techniciens du LIMA, Carol Mercier et Martin Truchon, pour leur grand professionnalisme et leurs très utiles compétences. Je souhaite aussi remercier particulièrement Caroline Blackburn, pour sa « positive attitude », ainsi que Caroline Laforte pour son aide inestimable. Je remercie encore l'ensemble du personnel du LIMA pour avoir rendu ce séjour parmi vous aussi agréable que bénéfique, sans oublier les étudiants du laboratoire, Mohamed Boussetoua, Jean Denis Brassard, Ilham Enaji, Hussein Ibrahim, Maria Dimitrova et Maryelle Adomou.

Je veux aussi remercier très chaleureusement Mariane Tremblay, pour l'exemplarité, la patience, la gentillesse et la folie que chaque jour elle me communique.

Enfin, et non des moindres, j'adresse mes plus grands remerciements à mes parents qui m'ont fait confiance et m'ont permis de traverser l'océan pour découvrir ce nouveau continent.

Tables des matières

Résumé.....	ii
Remerciements	iv
Tables des matières	v
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des symboles.....	xiiiv
1. Introduction.....	2
1.1 Mise en situation.....	2
1.2 Objectifs.....	8
1.2.1 Objectif principal	8
1.2.2 Objectifs secondaires	8
1.3 Méthodologie	8
1.4 Plan de travail	9
1.5 Revue de littérature	10
1.5.1 Le givrage atmosphérique.....	10
1.5.2 Simulation de l'accrétion de glace sur les pales d'hélicoptères.....	14
1.5.3 L'adhérence de la glace	19
2. Description des essais.....	29
2.1 Description du matériel.....	29
2.1.1 Description de la soufflerie.....	29

2.1.2	Description du <i>Spinning Rotor Blade</i> deuxième version (SRB-II).....	31
2.2	Programme d'exploitation informatique.....	33
2.3	Procédure expérimentale.....	34
2.3.1	Protocole	34
2.3.2	Paramètres mesurés lors de l'essai.....	37
3.	Modèle analytique.....	42
3.1	Bilan mécanique	42
3.2	Approximation de la masse.....	46
3.2.1	La forme de la glace accrétée	46
3.2.2	L'épaisseur de glace accrétée	46
3.3	Contrainte limite en traction de la glace	48
3.4	Masse volumique de la glace	53
4.	Résultats.....	58
4.1	Description d'un essai standard	58
4.1.1	Acquisition.....	58
4.1.2	Début de l'essai.....	58
4.1.3	Début de la précipitation.....	59
4.1.4	Évolution de la température sur la pale	60
4.1.5	L'arrêt de l'essai	61
4.1.6	Calculs relatifs à l'essai	61
4.2	Caractérisation de la glace accrétée	64
4.2.1	Formes de la glace	64

4.2.2	Taille des grains	67
4.3	Puissance au décrochage.....	69
4.4	Adhérence de l'accrétion de glace en fonction de la température	70
4.4.1	Masse de glace décrochée.....	71
4.4.2	Épaisseur de glace accrétée à 76 % de la pale en fonction de la température ..	72
4.4.3	Angle d'accrétion en fonction de la température.....	74
4.4.4	Longueur de glace décrochée en fonction de la température.....	75
4.4.5	Valeurs d'adhérence obtenues à différentes températures.....	77
5.	Discussion.....	80
5.1	Reproductibilité des paramètres expérimentaux.....	80
5.1.1	Répartition des essais.....	80
5.1.2	Longueurs de glace décrochée à -15 °C.....	80
5.1.3	Épaisseurs de glace accrétée à -15 °C, à 76 % de la pale	83
5.2	Effet de la température.....	85
5.2.1	Forme et épaisseur de glace accrétée en fonction de la température	85
5.2.2	Masse et longueur de glace décrochée en fonction de la température.....	94
5.2.3	Taille des grains de glace en fonction de la température	94
5.3	Adhérence	96
5.3.1	Effet de la température sur l'adhérence de la glace sur la pale.....	96
5.3.2	Comparaison entre les deux méthodes de mesures.....	97
5.3.3	Validité des résultats.....	98
5.3.3.1	Comparaison avec la littérature	98

5.3.3.2 Origines des différences observées	100
6. Conclusions et recommandations	103
6.1 Conclusion	103
6.1.1 Validation du modèle réduit	103
6.1.2 Influence de la température.....	103
6.1.3 Adhérence de la glace sur le substrat.....	104
6.2 Recommandations.....	104
7. Références.....	107

ANNEXES

ANNEXE 1 : CALCUL DE LA DENSITÉ MAXIMALE THÉORIQUE DE LA GLACE..	2
ANNEXE 2 : FICHE DE MESURE POUR L'ENSEMBLE DES ESSAIS SRB-II.....	3
ANNEXE 3 : GRAPHIQUE DE RÉSULTATS POUR L'ENSEMBLE DES ESSAIS SRB-II.....	42

Liste des figures

Figure 1-1 : Pylônes affaissés durant la « crise du verglas » en 1998	3
Figure 1-2 : Hélicoptère givré.....	4
Figure 1-3 : Moyens de lutte contre le givrage dans l'aviation	6
Figure 1-4 : Représentation schématique de la trajectoire des gouttelettes	12
Figure 1-5 : Accrétion de glace en régime sec (à gauche) et en régime humide (à droite) ..	13
Figure 1-6 : Hélicoptère soumis à une précipitation verglaçante artificielle en vol	14
Figure 1-7 : Forme de glace observée par D.P. Guffond à différentes vitesses (D.P. Guffond, 1986).....	15
Figure 1-8 : Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux par R. J. Flemming, T. H. Bond et R. K. Britton.....	17
Figure 1-9 Comparaison entre la forme obtenue par le code LEWICE (gauche) et la forme obtenue en soufflerie (droite).....	19
Figure 1-10 : Adhérence de la glace en fonction du nombre de liaisons hydrogène (V.F. Petrenko et S. Peng, 2002).....	21
Figure 1-11 : Adhérence de la glace en fonction de l'angle de contact de l'eau sur le SAM (V.F. Petrenko et S. Peng, 2002).	22
Figure 1-12 : Angle de contact de l'eau sur une surface	22
Figure 1-13 : Représentation schématique du montage expérimental utilisé par K. Itagaki.	23
Figure 1-14 : Résultats obtenus par R.J. Scavuzzo et M.L. Chu en 1987 pour la NASA	25
Figure 1-15 : Résultats obtenus par Laforte et al. (J. Druetz, 1978).....	26

Figure 2-1 : Représentation schématique de la soufflerie réfrigérée du LIMA	29
Figure 2-2: Rampe de gicleurs.....	30
Figure 2-3 : Spinning Rotor Blade II	31
Figure 2-4: Rotor du SRB-II.....	32
Figure 2-5: Pale d'aluminium utilisée pour le SRB-II.....	33
Figure 2-6 : Interface du programme	34
Figure 2-7 : Section de glace le long de la pale	38
Figure 2-8 : Dessin d'une coupe perpendiculaire à l'axe de la pale à l'issue d'un essai.....	39
Figure 2-9 : Microtome utilisé au LIMA pour préparer les surfaces à observer	40
Figure 3-1: Représentation des différentes forces présentes sur une pale givré	42
Figure 3-2: Représentation des paramètres pour le calcul de l'adhérence	45
Figure 3-3: Approximation de la forme de l'accrétion.....	46
Figure 3-4: Extrapolation de l'épaisseur à la rupture et de l'épaisseur moyenne.....	47
Figure 3-5 : Évolution de la contrainte limite en traction de la glace à -15 °C, pour une taille de grain variant entre 0.2 et 2 mm	50
Figure 3-6 : Résistance limite en traction de la glace selon différents auteurs.....	51
Figure 3-7 : Valeur de la contrainte limite en traction utilisée pour les différentes températures.....	53
Figure 3-8: Masse volumique de glace en fonction de la vitesse d'impact des gouttelettes .	56
Figure 4-1: Exemple de représentation graphique des données acquises lors d'un essai (SRB-A-089).....	60
Figure 4-2: Feuille de résultat à remplir à la fin de chaque essai	63

Figure 4-3: Négatif du détail de l'accrétion de glace en soufflerie sur une pale en rotation à - 5°C.....	64
Figure 4-4 : Vue de l'accrétion de glace à -10 °C	65
Figure 4-5: Vue du dessous d'une accrétion de glace sur une pale à -15°C.....	66
Figure 4-6 : Vue du dessus de l'accrétion de glace à -20 °C	67
Figure 4-7 : Taille des grains en fonction de la température	68
Figure 4-8 : Puissance au décrochage en fonction de la température.	70
Figure 4-9: Masse de glace décrochée en fonction de la température de l'air	72
Figure 4-10 : Épaisseur de glace accrétée à 76 % de la pale fonction de la température	73
Figure 4-11 : Angle d'accrétion en fonction de la température	75
Figure 4-12: Longueur moyenne de glace décrochée pour différentes températures	76
Figure 4-13 : Contrainte de cisaillement et écart type obtenus selon les différentes méthodes en fonction de la température.....	78
Figure 5-1 : Comparaison entre les fréquences d'apparition des longueurs de glace décrochée et la loi normale	82
Figure 5-2 : Comparaison entre les fréquences d'apparition des épaisseurs de glace accrétée à -15 °C à 76 % de la pale et la loi normale	85
Figure 5-3 : Comparaison entre les formes d'accrétions obtenues par Anderson et pour le SRB-II à - 5°C.....	88
Figure 5-4 : Comparaison entre les formes d'accrétions obtenues par Anderson et pour le SRB-II à - 10°C.....	89

Figure 5-5 : Comparaison entre les formes d'accrétions obtenues par Anderson et pour le SRB-II à – 15 °C.....	91
Figure 5-6 : Comparaison entre les formes d'accrétions obtenues par Anderson et pour le SRB-II à – 20 °C.....	92
Figure 5-7 : Comparaison des tailles de grains mesurées sur le SRB-II aux résultats obtenus par Laforte et al.....	96
Figure 5-8 : Comparaison des résultats de la valeur de l'adhérence selon la méthode employée en fonction de la température	98
Figure 5-9 : Comparaison des résultats du SRB-II avec ceux de la littérature pour différentes températures.....	100

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Paramètres utilisés pour la Figure 1-9	18
Tableau 1-2 : Valeurs de l'adhérence de la glace selon différents auteurs (C. Laforte, 2008)	20
Tableau 3-1 : Valeur de la contrainte limite en traction utilisée pour le calcul de l'adhérence basée sur les valeurs de Flemming	52
Tableau 3-2 : Masse volumique de la glace selon Bain et Gayet et Laforte et al. en fonction de la vitesse d'impact des gouttelettes.	55
Tableau 4-1: Taille des grains à différentes températures	68
Tableau 4-2: Résultats de la puissance au décrochage pour les différentes températures	70
Tableau 4-3: Mesures des masses de glace décrochée en fonction de la température.....	71
Tableau 4-4: Paramètres de la mesure de l'épaisseur de glace accrétée à 76 % de la pale à différentes températures.....	73
Tableau 4-5 : Paramètres de la mesure de l'angle d'accrétion à différentes températures...	74
Tableau 4-6 : Paramètres de mesure de la longueur de glace décrochée à différentes températures de l'air	76
Tableau 4-7: Résultats de la valeur de l'adhérence pour les différentes températures mesurées selon la méthode utilisée	78
Tableau 5-1 : Nombre d'essais réalisé pour les différentes mesures	80
Tableau 5-2 : Fréquence d'apparition des longueurs de glace décrochée à -15 °C comparées à la loi normale.	82

Tableau 5-3 : Fréquence d'apparition des épaisseurs de glace mesurées à -15 °C à 76 % de la pale comparée à la loi normale.	84
Tableau 5-4 : Comparaison des conditions utilisée en soufflerie par Anderson et pour le SRB-II à – 5°C.....	87
Tableau 5-5 : Comparaison des conditions utilisée en soufflerie par Anderson et pour le SRB-II à – 10 °C.....	89
Tableau 5-6 : Comparaison des conditions utilisée en soufflerie par Anderson et pour le SRB-II à – 15°C.....	90
Tableau 5-7 : Comparaison des conditions utilisée en soufflerie par Anderson et pour le SRB-II à – 20 °C.....	92
Tableau 5-8 : Comparaison des termes d'accumulation entre le SRB-II et les résultats d'Anderson.....	93

Liste des symboles

α	Angle d'accrétion de la glace	°
c	Corde la pale	m
C_D	Coefficient de trainée de la pale	
C_L	Coefficient de portance de la pale	
d	Taille des grains de glace	μm
e_m	Épaisseur de glace accrétée moyenne	m
e_s	Épaisseur de glace accrétée à la position du décrochage	m
F_A	Force d'adhérence	N
F_C	Force cohésive	N
F_{Cent}	Force centrifuge	N
F_D	Force de trainée	N
F_L	Force de portance	N
f	fraction solide	
h	Base du trapèze	m
k	coefficient multiplicatif	m
l_c	Longueur de glace décrochée	m
L_{wc}	Teneur en eau liquide	g/m^3
m_{col}	Teneur en eau liquide	g/m^3
m_s	Masse de glace décrochée	g
MVD	Diamètre moyen des gouttelettes	μm
R	Rayon du rotor	m

r	Rayon ou la glace se décroche de la pale	m
S	Surface de la pale orthogonale à l'écoulement	m^2
s	Abscisse curviligne de contact de la glace sur la pale	m
S_A	Surface d'adhérence de la glace	m^2
S_C	Surface cohésive de glace	m^2
T	Température de l'air dans la soufflerie	$^{\circ}C$
t	Temps d'accrétion ou durée de l'évènement de givrage	s
T_f	Température de solidification de l'eau	$^{\circ}C$
T_s	Température de la surface heurtée par les gouttelettes	$^{\circ}C$
U_s	Vitesse de l'air sur la surface du profil	m/s
X	Coefficient de Macklin	
β	Coefficient de collection	
μ	Moyenne	
ρ	Masse volumique de la glace	kg/m^3
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	kg/m^3
ρ_{imax}	Masse volumique maximale de la glace	kg/m^3
ρ_{ref}	Masse volumique de l'eau à 4 $^{\circ}C$	kg/m^3
σ	Contrainte limite en traction	Pa
σ_i	Contrainte limite en traction	Pa
σ_p	Écart type	
τ	Contrainte limite en cisaillement	Pa
ω	Vitesse de rotation du rotor	rad/s

CHAPITRE 1
INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

1.1 MISE EN SITUATION

Au Canada, comme pour les autres régions nordiques, pendant l'hiver, les températures se situent en dessous de zéro degré Celsius. À ces températures : des nuages givrants, de la pluie ou de la bruine verglaçante et des précipitations de neige fondue peuvent subvenir.

Ces précipitations givrantes sont des phénomènes météorologiques particulièrement dommageables pour les activités humaines. Au Québec, la « crise du verglas » de l'hiver 1998 est un bon exemple de l'étendue des problèmes pouvant être occasionnés. Par exemple, les câbles électriques et les pylônes recouverts de givre ont vu leur masse décuplée, de telle sorte qu'ils se sont affaissés Comme montré à la **Figure 1-1**, privant ainsi un million de foyers d'électricité. De plus, les moyens d'interventions habituels comme les échelles d'accès ou les camions de service, étant peu efficace dans ces conditions hivernales extrêmes, la réparation des cent vingt mille kilomètres de lignes, cent trente pylônes et près de trente mille poteaux de bois (D. Phillips, 2002) c'est avéré très ardu. Cet épisode a démontré l'inefficacité des moyens de transport conventionnels dans ce type de situation, et la nécessité d'innovation afin de prévenir les problèmes reliés au givrage.

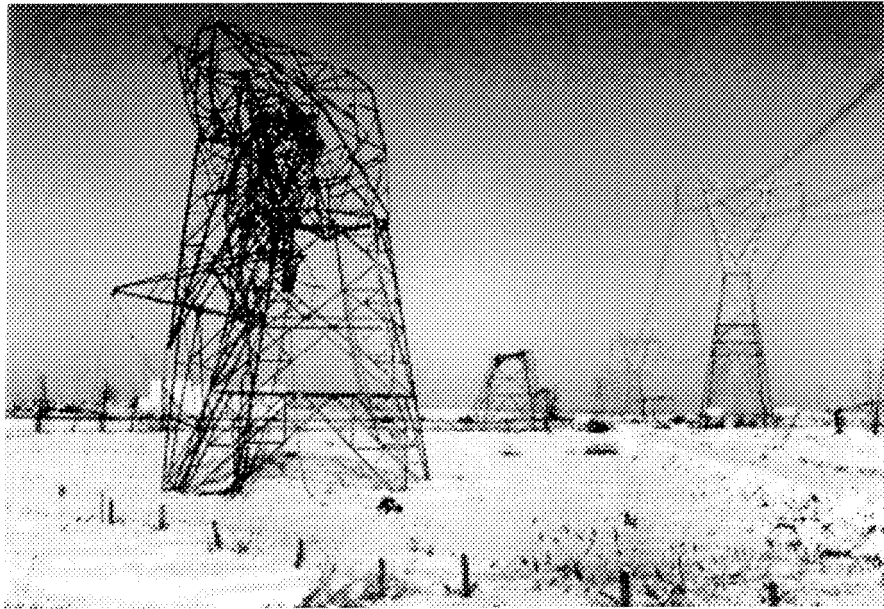


Figure 1-1 : Pylônes affaissés durant la « crise du verglas » en 1998

Ce genre de conditions météorologiques n'est pas si exceptionnel puisqu'à chaque année, il y a entre douze et dix-sept épisodes verglaçants dans la région de Montréal et ses environs. Dans ce genre de situations, l'hélicoptère est le moyen de transport privilégié des services de secours en raison de sa grande mobilité et de sa capacité à atteindre des endroits inaccessibles. Malheureusement, ces conditions particulières modifient de façons significatives les performances générales des hélicoptères et affectent les instruments de mesure. Par exemple, les tubes de Pitot servant à mesurer la vitesse de l'hélicoptère peuvent être rendus inopérants en raison du givre, comme présenté sur la **Figure 1-2**. Afin de prévenir le givrage, des éléments chauffants sont installés sur les zones susceptibles de givrer et présentant un risque pour la sécurité des vols. Cependant, cette technique électrothermique demande une consommation d'énergie importante, combinée à une augmentation considérable du poids de l'appareil causée par l'ajout d'une génératrice pour

la production d'électricité. Par conséquent seuls quelques gros hélicoptères comme les Super Puma ou les Kamov, des hélicoptères de classe 11 tonnes, en sont équipés. Il apparaît donc qu'il existe un réel besoin d'innovation afin de prévenir les problèmes liés au givrage des hélicoptères.



Figure 1-2 : Hélicoptère givré

Les conditions givrantes étant plus fréquentes en altitude, en raison des faibles températures et de la présence de nuage, l'industrie aéronautique, en particulier, a dû s'adapter très tôt aux phénomènes de givrage afin de sécuriser leurs réseaux de transport. Les avions représentent un marché plus important que celui des hélicoptères, c'est pourquoi des solutions furent plus rapidement mises au point. Parmi celles-ci, il est possible d'en citer plusieurs actuellement utilisées :

- Des chambres à air (*boots*) sont installées sur les bords d'attaques des ailes, Comme montré à la **Figure 1-3**. Celles-ci se gonflent pour briser la glace lors des accumulations.
- Le gaz chaud issu des turbines des moteurs circule dans un réseau spécial, sous le bord d'attaque des ailes, empêchant l'accumulation de givre ou en le faisant fondre.
- L'installation d'éléments chauffants résistifs sur le bord d'attaque de l'aile pour empêcher la formation d'une accumulation de glace ou la faire fondre.
- La pulvérisation de fluide antigivre où dégivrant sur les ailes et les parties les plus critiques de l'aéronef avant le décollage empêche la formation ou enlève l'accumulation de glace. La phase de décollage nécessitant la plus grosse consommation de puissance, le fluide s'écoule ensuite sous l'effet des forces aérodynamiques. La pulvérisation de fluide est visible sur la Figure 1-3.

Malheureusement, ces solutions ne sont pas transposables aux petits hélicoptères, en raison des modifications aérodynamiques, de l'érosion du bord d'attaque de la pale, du manque de puissance disponible ou encore de l'intensité de la force centrifuge. C'est pourquoi, les manufacturiers firent appel à des universités et des laboratoires afin d'approfondir leur connaissance sur le sujet.



Figure 1-3 : Moyens de lutte contre le givrage dans l'aviation

Ainsi, la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) aux États-Unis, l'Office Nationale d'Étude et de Recherche Aéronautique (ONERA) en France ou le *National Research Council* (NRC) au Canada, entre autres, effectuèrent des essais et purent améliorer leur compréhension du givre, par la suite, ils proposèrent des solutions pour lutter contre le givre. Cependant, les résultats obtenus sont mitigés en raison de la complexité du problème et de la faible compréhension du mécanisme de l'adhérence. En effet, la quantité de glace accrétée sur une surface avant son élimination par arrachement dépend de l'adhérence de la glace sur la surface qui est déterminée par de nombreuses caractéristiques physico-chimiques reliées entre autres, au type de substrat, aux conditions de surface et enfin aux conditions environnementales.

Bell helicopter Textron a émis le souhait au Consortium pour la Recherche en Aéronautique du Québec (CRIAQ) de voir développer un **système antigivre de basse puissance pour les petits aéronefs à rotor**. Le CRIAQ a donc réuni différents partenaires pouvant mener ce projet à terme. Ainsi, le Laboratoire Internationale des Matériaux Antigivre (LIMA), un laboratoire de recherche sur le dégivrage dans le domaine des transports rattaché au Département des sciences appliquées de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), fut choisi pour son expertise sur le givrage et pour ses installations de simulation expérimentale. Le projet global dont l'objectif principal est de proposer des solutions efficaces au problème du givrage des petits hélicoptères, se divise en deux objectifs partiels :

- Premièrement, améliorer la compréhension de la physique de l'accrétion de glace en vol ou des gouttelettes d'eau surfondues heurtant les pales en rotation et établir des paramètres de similitude pour reproduire le phénomène en modèle réduit comme l'utilisation de revêtements antigivre, d'éléments piézoélectriques ou d'éléments chauffants.
- Analyser de nouveau concept de dégivrage et en démontrer la faisabilité sur modèle réduit ou banc d'essai.
- Analyser des revêtements de nouvelle génération offrant une faible adhérence au givre, et en démontrer la faisabilité sur des modèles réduits ou des bancs d'essais.

Ce travail de maîtrise s'inscrit dans le cadre de ce projet en répondant partiellement au premier objectif portant sur l'accrétion de glace.

1.2 OBJECTIFS

1.2.1 Objectif principal

Pour améliorer la compréhension du phénomène de givrage sur une pale d'hélicoptère, l'objectif principal de ce mémoire de maîtrise est d'établir et valider une équation semi-empirique déterminant la valeur d'adhérence de la glace accrétée sur un modèle réduit d'une pale d'hélicoptère en rotation dans une soufflerie réfrigérée.

1.2.2 Objectifs secondaires

- Établir un protocole expérimental précis afin d'obtenir des valeurs répétitives des paramètres inclus dans le calcul de la glace.
- Développer et valider un modèle semi-empirique bilan mécanique des forces s'exerçant sur le dépôt de glace sur la pale afin de calculer l'adhérence à partir des mesures expérimentales avec le SRB-II.
- Analyser l'influence de la température de l'air sur l'adhérence calculée par le modèle ainsi que sur la taille des grains du dépôt.

1.3 METHODOLOGIE

Le modèle réduit utilisé pour réaliser les essais expérimentaux est appelé le *Spinning Rotor Blade* (SRB-II). Il a été conçu et réalisé au LIMA. Le modèle réduit est utilisé conjointement avec la soufflerie réfrigérée générant des précipitations verglaçantes.

Un protocole d'essai a été standardisé afin de reproduire une accréation de glace sur une pale d'hélicoptère à l'aide du SRB. Ce protocole devait tenir compte de l'influence de différents paramètres sur la valeur de l'adhérence glace/substrat, soit la vitesse de rotation du rotor, la

température de l'air, la teneur en eau liquide dans l'écoulement, le diamètre des gouttelettes d'eau en surfusion, et le matériau constituant la pale. La combinaison de ces paramètres se doit de reproduire une accrétion la plus ressemblante possible à la réalité, tout en tenant rigoureusement compte de l'effet d'échelle dû à l'utilisation d'un modèle réduit. Ces paramètres ont été déterminés et contrôlés par les mesures expérimentales de la longueur de glace arrachée, de la masse de glace accumulée, de l'épaisseur de glace sur le bord d'attaque, de la taille des grains de l'accrétion et de la durée de l'essai.

Afin de valider le modèle semi-empirique d'adhérence, 150 essais ont été répétés à -5, -10, -15 et -20 °C. La répétitivité des paramètres mesurés ainsi que des résultats d'adhérence ont tout d'abord été analysés. Ensuite, l'exactitude des valeurs d'adhérences obtenues a été établie en accord avec celles citées dans la littérature.

1.4 PLAN DE TRAVAIL

Le premier chapitre de ce mémoire présente les contextes scientifiques et industriels de la réalisation de ce projet. Ainsi, la problématique, les objectifs et la méthodologie de ce mémoire seront introduits dans cette première partie. La revue de littérature suivra et permettra aux lecteurs de se familiariser avec les notions essentielles à la compréhension de ce mémoire : le givrage atmosphérique, l'accrétion de glace sur des pales en rotation et les propriétés physiques de la glace.

Le second chapitre de ce mémoire sera consacré à la formule analytique de détermination de l'adhérence ou plus précisément de la contrainte de cisaillement à l'interface

glace/surface de la pale. Les approximations utilisées seront justifiées et les paramètres importants du calcul seront présentés.

Le troisième chapitre sera consacré à la partie expérimentale. Le matériel utilisé pour réaliser les essais et son fonctionnement, c'est-à-dire la soufflerie réfrigérée du LIMA, le SRB-II et le logiciel de contrôle et de traitement des données utilisé durant les essais seront décrits. De plus, le protocole expérimental, d'un essai d'accrétion sera détaillé.

Le chapitre 4 présentera les résultats et débutera par l'explication détaillée de l'analyse d'un essai. Suivra, la présentation des résultats obtenus à l'issue des campagnes d'essais : adhérence et taille des grains.

Dans le chapitre 5 les résultats obtenus seront comparés aux résultats existants dans la littérature. La comparaison entre ces résultats permettra d'observer l'effet de l'échelle réduite et la validité ou non du modèle semi-empirique établi dans ce mémoire.

Pour finir, diverses conclusions et recommandations viendront clore ce travail.

1.5 REVUE DE LITTÉRATURE

1.5.1 Le givrage atmosphérique

D'après les dictionnaires usuels, le givrage correspond littéralement à la formation du givre, le givre étant une fine couche de glace formée par la condensation du brouillard. Le verglas est différent, c'est un dépôt de glace compacte et lisse, généralement transparent, il provient de la solidification de gouttelettes d'eau surfondues. Les gouttelettes d'eau surfondues ont une température inférieure à la température de solidification. Théoriquement, l'énergie nécessaire pour passer de l'état liquide à l'état solide est supérieure à la chaleur latente

produite par la solidification. Cet état est dit métastable, ce qui signifie qu'un infime changement dans son bilan énergétique et les gouttelettes en surfusion se solidifient quasi instantanément.

Donc, l'accrétion de la glace sur une surface est due à l'impact des gouttelettes d'eau surfondues dans un écoulement d'air sur un substrat. Le givrage se produit lorsque les températures de l'air et de la surface sont inférieures à zéro degré Celsius. Ainsi, lorsque les gouttelettes percutent la surface, celles-ci gèlent intégralement ou partiellement à l'impact. La masse d'eau captée des gouttelettes par une surface est décrite par l'**Équation 1-1** (E.P. Lozowski, J.R. Stallabrass, P.F. Hearty, 1983):

$$m_{col} = \beta LwcSU\Delta t.f \quad \text{Équation 1-1}$$

Où :

m_{col}	: masse d'eau captée	g
Lwc	: teneur en eau liquide	$g.m^{-3}$
U	: vitesse de la surface par rapport à l'écoulement d'air	$m.s^{-1}$
S	: surface	m^2
Δt	: temps d'exposition à la précipitation	s
β	: coefficient de captation	-
f	: Fraction solide	-

Le terme β correspond à la capacité d'un objet à capter les gouttelettes d'eau présentes dans l'écoulement. Il est un terme adimensionnel, fonction de la géométrie de l'objet, de la

dimension des gouttelettes et de leurs vitesses. Par exemple, pour un cylindre dont la valeur du coefficient β est de à 0,7, il récupèrera 70 % des gouttelettes de l'écoulement passant par la surface perpendiculaire à l'écoulement comme montré schématiquement sur la **Figure 1-4**. Le terme f correspond à la fraction solide, correspondant à la proportion d'eau captée qui gèlera immédiatement à l'impact, le reste demeurant sur la surface ou s'écoulant sous forme de film d'eau. Il faut préciser que dans **l'Équation 1-1**, les éclaboussures sont considérées nulles, c'est-à-dire que toute l'eau captée par la surface est conservée sur la surface.

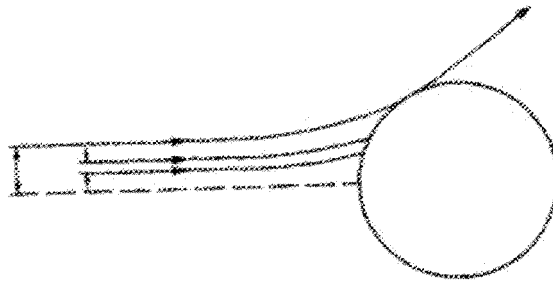


Figure 1-4 : Représentation schématique de la trajectoire des gouttelettes

Lors des essais expérimentaux les accrétions obtenues sont dues aux gouttelettes d'eau surfondues. La différenciation du givre et du verglas est obtenue par la détermination de la fraction solide. La fraction solide est déterminée par le bilan thermique effectué sur un élément de l'accrétion de glace sur la pale. Deux types de régimes d'accrétion sont observés durant le givrage : le sec et l'humide. Ceux-ci sont définis comme suit, durant le régime sec toute l'eau captée gèle à l'impact et forme du givre, durant le régime humide, seulement une fraction de l'eau gèle pour former du verglas. Le givre est blanc et rugueux,

en raison de la présence de bulle d'air entre les différentes gouttelettes accrétées, la présence de ces bulles d'air explique également la masse volumique inférieure. Lorsque la fraction solide descend en dessous de un, la glace accrétée est du verglas, une partie de l'eau sur la pale ne gèlera pas immédiatement et s'écoulera plus loin que le point d'impact. La glace ainsi accrétée est transparente et lisse, en raison de l'absence de bulles d'air et la masse volumique approche la limite théorique de 917 kg.m^{-3} (B. Michel, 1978). En raison, du mouvement de la portion d'eau non gelée et qui peut regeler plus loin, les formes d'accrétion de glace sont très différentes entre les deux régimes d'accrétion Comme montré à la **Figure 1-5**.

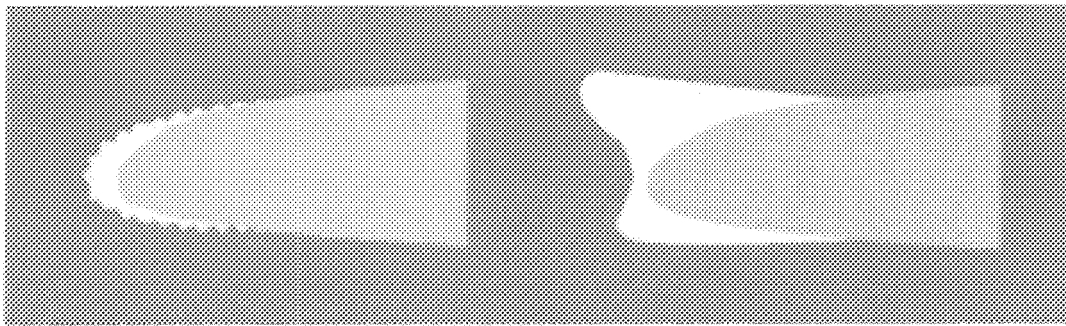


Figure 1-5 : Accrétion de glace en régime sec (à gauche) et en régime humide (à droite)

En aéronautique, les profils de pale utilisés ont des propriétés géométriques spécialement conçus pour avoir des performances optimales dans l'air. La modification du profil des pales induit une baisse de leurs performances. Selon le type du régime d'accrétion, la baisse des performances sera plus ou moins conséquente. Le régime humide étant le régime le plus dommageable en raison de la forme s'opposant à l'écoulement et qui augmente la valeur de la trainée.

1.5.2 Simulation de l'accrétion de glace sur les pales d'hélicoptères

Les recherches sur le givrage en aéronautique visent à l'amélioration des connaissances dans le but de pouvoir lutter plus efficacement contre les accrétions de glace sur les aéronefs. Cependant, le processus menant à la certification antigivre d'un hélicoptère est long et coûteux (4 ans et 20 millions de dollars au début des années 1980 pour le Super Puma de Eurocopter) avant d'arriver à l'étape ultime qui consiste à exposer un hélicoptère en vol à une précipitation verglaçante comme montrés sur la **Figure 1-6**.

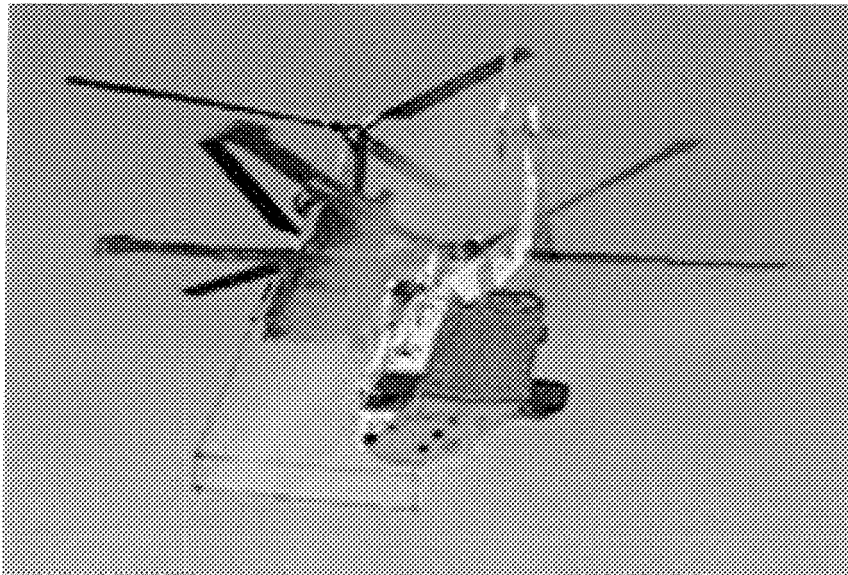


Figure 1-6 : Hélicoptère soumis à une précipitation verglaçante artificielle en vol

C'est pourquoi les industriels passent d'abord par une phase d'observation en soufflerie réfrigérée. Ainsi, de nombreux chercheurs ont pu simuler l'accrétion de glace sur des pales en rotation. En 1981, D.P. Guffond effectua une série d'essais sur un modèle réduit (1/4) composé de quatre pales NACA 0012 en rotation à 960 rpm pour des températures comprises entre -4°C et -11°C . Il remarqua que pour des températures supérieures à -3°C , il

n'y a pas d'accrétion de glace. Aux alentours de -5°C , l'accrétion de glace correspond à une fine couche de verglas, mais la glace se décroche trop rapidement pour obtenir une véritable forme de glace. Finalement, ce n'est que pour les températures les plus basses, environs -11°C qu'il observe des formes significatives, connues sous le nom de cornes « *horn* » et illustrée sur la **Figure 1-7** où M représente le nombre de Mach ($1\text{ M}=331.5\text{ m/s}$)

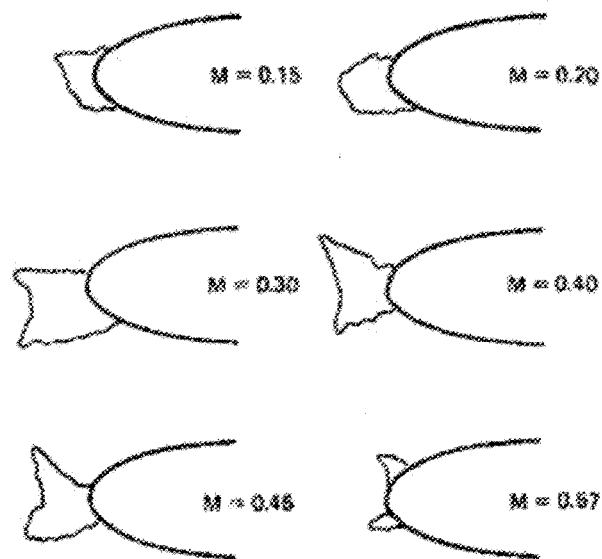


Figure 1-7 : Forme de glace observée par D.P. Guffond à différentes vitesses (D.P. Guffond, 1986).

Les résultats montrés à la **Figure 1-7** ont été obtenus dans la soufflerie S1MA de l'ONERA en France à la température de -11°C , avec une teneur en eau de 5.1 g/m^3 , un diamètre de gouttelette égal à $10\text{ }\mu\text{m}$ et un angle d'incidence de 5.2° . De plus, Guffond conclut que les formes de glace accrétées sur pales tournantes sont similaires à celles sur ailes fixes. Enfin,

il conclut que la température et la vitesse de l'air modifient significativement la forme de la glace, en précisant que dans le cas d'une pale en rotation la masse de la glace ne peut excéder une certaine quantité en raison de la force centrifuge qui provoque l'arrachement (D.P. Guffond, 1986).

En 1989, R. J. Flemming, T. H. Bond et R. K. Britton réalisèrent des essais dans le *NASA Lewis Research Icing Research* pour la compagnie constructrice d'avions et d'hélicoptères Sikorsky. L'objectif principal de ces essais étant de comparer les types d'accrétion réalisés en soufflerie à ceux obtenus à l'aide d'un code de calcul théorique CAMRAD/JA. Le modèle réduit utilisé était équipé de quatre pales de profil NACA 0012 d'un diamètre de 1.83 m. Le document conclut que la corrélation obtenue est très satisfaisante, mais certaines des mesures essentielles ne sont pas représentées sur les graphiques. Concernant l'arrachement de la glace, les auteurs mentionnent l'influence de la force centrifuge, des forces aérodynamiques et de la déformation de la pale. Ils signalent aussi la dangerosité de ce phénomène avec l'apparition de vibration importante et le risque d'endommager des parties de l'appareil lors du détachement de la glace (R. J. Flemming et al., 1989).

Dans une autre publication (R. J. Flemming, T. H. Bond et R. K. Britton, 1994) les auteurs comparent la variation du couple obtenue par la méthode numérique et par la méthode expérimentale. Comme montrés sur la **Figure 1-8** les comportements réels et simulés réagissent de la même façon et semblent très proche malgré l'absence d'échelle en ordonnée.

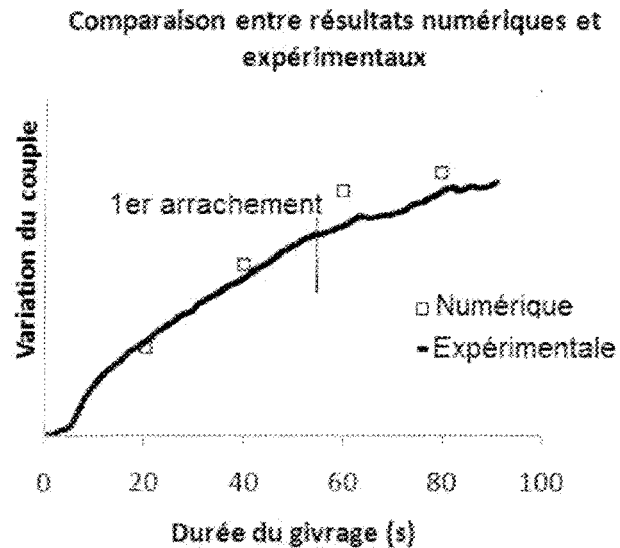


Figure 1-8 : Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux par R. J. Flemming, T. H. Bond et R. K. Britton

Les principaux codes de calcul prédictif dans le domaine de la glace sont le LEWICE aux États-Unis, le TRAJICE au Royaume-Uni, l'ONERA en France et le CANICE au Canada (G. Fortin, 2003).

Le terme MVD (*Median Volume Diameter*) du **Tableau 1-1** correspond à la taille des gouttelettes de la précipitation, celui-ci influence surtout la valeur du coefficient de collection. En 2005, D. R. Miller et M. G. Potapczuk du Glenn Research Center de la NASA étudièrent les formes de glaces obtenues en soufflerie pour les comparer à celles obtenues par le code LEWICE. Il apparaît sur la **Figure 1-9** que la simulation numérique n'est pas en mesure de représenter toute la complexité de la forme de glace obtenue en soufflerie (D. R. Miller et al., 2005). Cependant, si la mesure des paramètres comme

l'augmentation du couple, vu précédemment sur la **Figure 1-8**, n'est pas beaucoup influencée par ces différences entre la modélisation et l'expérimentation, celle de l'arrachement au contraire peut être grandement modifiée par la différence de la forme de l'accrétion, forme qui peut entraîner des concentrations de contrainte à la base des plumes « *feathers* ». Les plumes étant les pointes de glace visible sur l'image de droite, formées par l'accumulation des gouttelettes s'accumulant les unes par-dessus les autres, et caractéristique du régime sec d'accrétion.

Il apparaît également sur la figure de droite que s'il doit y avoir arrachement de glace, ce sera la glace accumulée sur le bord d'attaque qui s'arrachera alors que la glace accrétée sur l'intrados restera attachée.

Tableau 1-1 : Paramètres utilisés pour la Figure 1-9

Paramètres	Unités	Valeurs utilisées
U	m/s	92,6
Lwc	g/m ³	0.6
MVD	μm	80
α	°	2,5
f	-	0,7

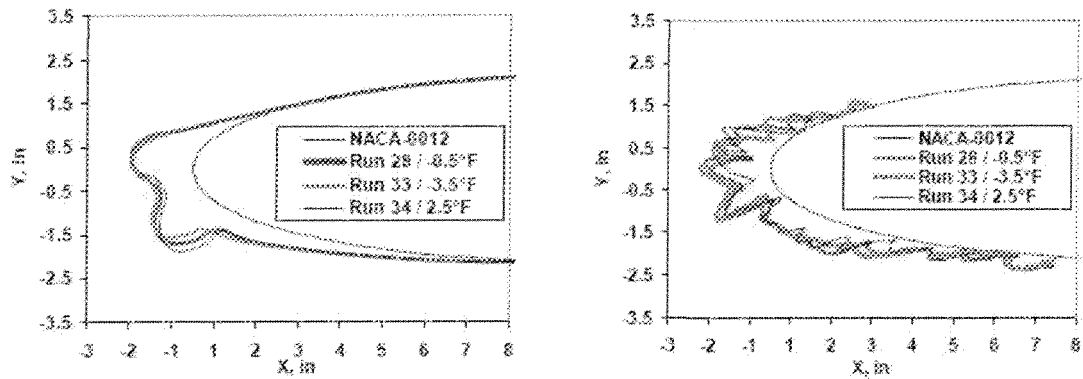


Figure 1-9 Comparaison entre la forme obtenue par le code LEWICE (gauche) et la forme obtenue en soufflerie (droite)

1.5.3 L'adhérence de la glace

Comme mentionné précédemment l'accumulation de glace peut être dommageable à un grand nombre d'activités humaines, ainsi l'adhérence de la glace est un paramètre très important à connaître. En effet, l'adhérence indique la force nécessaire pour détacher la glace du substrat. De nombreux scientifiques ont déjà déterminé la valeur de l'adhérence entre deux surfaces pour différentes applications, comme les colles ou les peintures par exemple. Malheureusement, dans le cas de la glace collée sur une surface métallique, comme le montre le **Tableau 1-2**, cette valeur peut différer selon le protocole et les conditions atmosphériques utilisées. Le **Tableau 1-2** montrant les différentes valeurs obtenues par de nombreux auteurs, indiquent ainsi des variations allant de 0 jusqu'à 2 MPa.

Tableau 1-2 : Valeurs de l'adhérence de la glace selon différents auteurs (C. Laforte, 2008)

	Auteurs	Type de glace	Méthode	Substrat	τ adhérence (MPa)
1	Loughborough et Hass	Eau congelée	Centrifuge	Al Cu	1,52 0,85
2	Druez et al.	Verglas et givre accrété sur un conducteur		Al	0,067 à 0,4
3	Phan et al.				
4	Laforte et al.				
5	Raraty et Tabor	Eau congelée	Centrifuge	Acier inox	1,96
6	Jellinek	Glace de neige	Glace en sandwich entre deux plaques d'acier inox cisailées en torsion	Acier inox	0 à 1,65 (0 à -14 °C)
7	Bascom et al.	Eau congelée	Méthode des plaques parallèles en mode quasi statique	Acier inox poli	1,63
8	Ford et Nichols	Eau congelée	Méthode des plaques parallèles en mode quasi statique	Acier inox poli	0,24
9	Stallbrass et Price	Accrété impact soufflerie réfrigérée	Centrifuge	Al	0,026- 0,127 (-15 à -6,7 °C)
10	Itagaki	Accrété impact	Centrifuge	Al	0,157 (-5 °C)
11	Reich	Eau congelée	Méthode des plaques parallèles en mode quasi statique	Al	0,827- 0,930 (-11 °C)
12	Chu et Scavuzzo	Accrété impact soufflerie réfrigérée	Méthode des plaques parallèles en mode quasi statique	Al	0 à 1,03 (-4 à 0 °C)

En observant ce tableau, il apparaît que l'adhérence de la glace est un processus complexe qu'il est possible d'étudier selon différentes méthodes, mais aussi à différentes échelles. Certains chercheurs comme V.F. Petrenko ont étudié l'échelle moléculaire de l'adhérence en désignant trois forces principales responsable de celle-ci : les interactions

électrostatiques, les liaisons covalentes et les liens chimiques. Il a mis en évidence l'influence des liaisons hydrogène, appartenant au groupe des liaisons chimiques, comme étant le facteur le plus important de l'adhérence, à l'échelle moléculaire, comme montrés par la **Figure 1-10**. Petrenko et Peng ont utilisé un matériau d'une couche monomoléculaire (SAM) entre le substrat et la glace et ont fait varier l'angle de contact entre l'eau et le SAM. Ils ont ainsi montré que l'adhérence de la glace est une fonction de l'angle de contact de l'eau sur la surface SAM comme le montre la **Figure 1-11**. L'angle de contact de l'eau sur une surface est rappelé sur la **Figure 1-12**. Les différents essais d'adhérence réalisés par Petrenko et Peng l'ont été à la température de -10 °C.

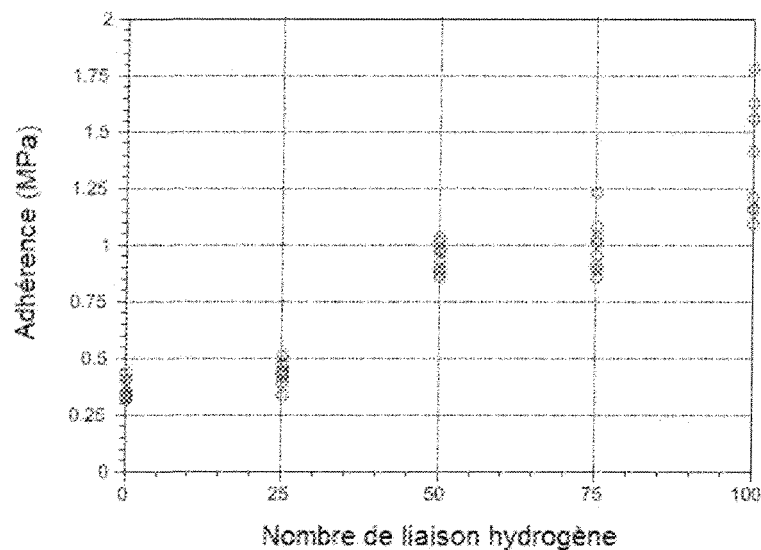


Figure 1-10 : Adhérence de la glace en fonction du nombre de liaisons hydrogène (V.F. Petrenko et S. Peng, 2002).

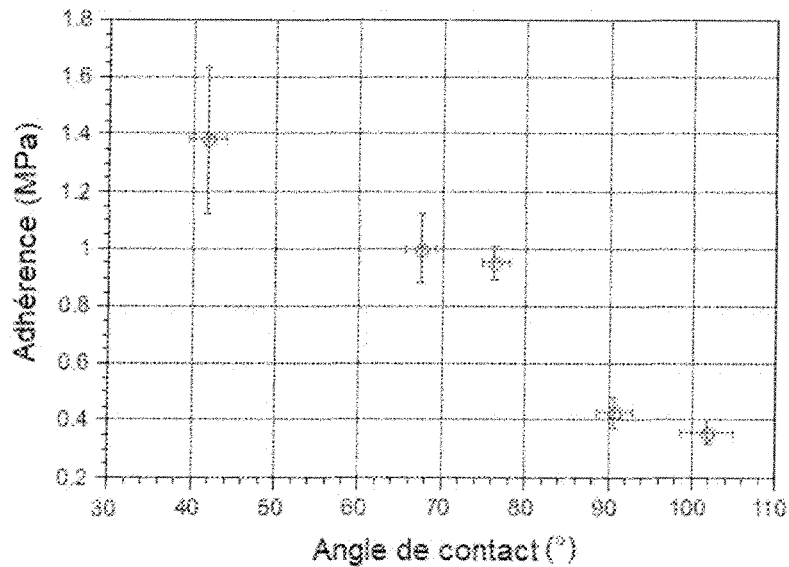


Figure 1-11 : Adhérence de la glace en fonction de l'angle de contact de l'eau sur le SAM
(V.F. Petrenko et S. Peng, 2002).

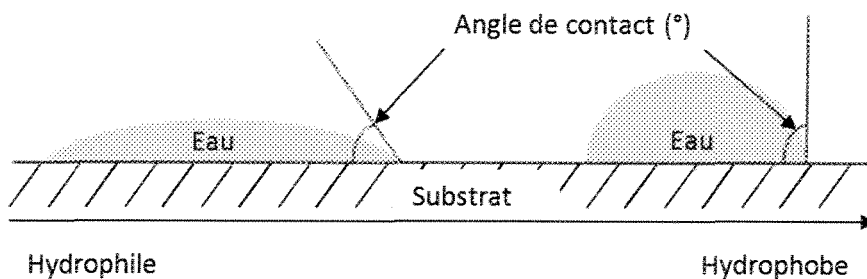


Figure 1-12 : Angle de contact de l'eau sur une surface

A l'échelle atomique les liaisons hydrogènes sont les principales responsables de l'adhérence, cependant, il est difficile d'évaluer ce nombre de liaisons sans un appareillage très couteux. Le protocole expérimental de ce mémoire consiste à l'étude de l'adhérence de

la glace, mais plutôt à l'échelle macroscopique et microscopique de la glace sur une pale tournante en aluminium. Donc, voici une revue des ouvrages oubliés sur l'adhérence de la glace lorsque celle-ci est soumise à une force centrifuge.

En 1984, K. Itagaki a étudié l'arrachement d'une accréation de glace sur une plaque d'aluminium fixée sur un rotor en rotation à 3600 RPM comme montrée sur la **Figure 1-13**.

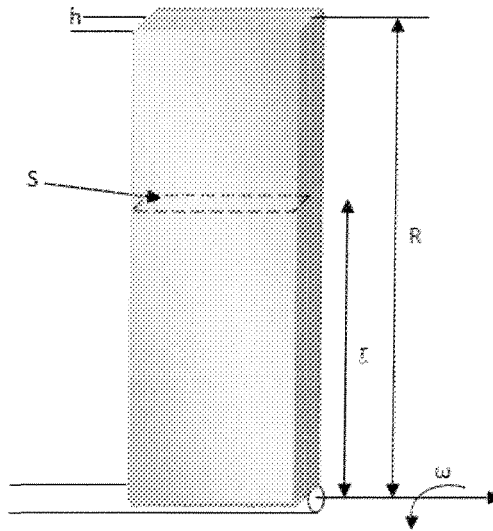


Figure 1-13 : Représentation schématique du montage expérimental utilisé par K. Itagaki.

Il a réalisé le bilan mécanique des forces sur l'accréation. À partir de celui-ci, il détermine successivement les valeurs de la contrainte maximale en traction et en cisaillement, décrites par l'**Équation 1-2** et l'**Équation 1-3** respectivement et dont les termes sont résumés ci-dessous.

$$\sigma = \frac{\omega^2 \rho (R-r)^2}{2} \quad \text{Équation 1-2}$$

$$\tau = \frac{e \omega \rho (R^2 \omega^2 \rho - 2\sigma)}{\omega \pi R + \sqrt{2\rho\sigma}} \quad \text{Équation 1-3}$$

La validité des résultats d'Itagaki est discutable car ceux-ci sont très variables. Ainsi pour des températures variant de 1 °C entre -14.5 et -15.5 °C, il trouve des contraintes limites en traction variant pratiquement d'un facteur 4 soit 2,19 et 0,58 MPa. L'analyse de ses résultats montre que le facteur le plus important pour déterminer l'adhérence est le taux d'accrétion, c'est-à-dire la vitesse avec laquelle la glace s'accumule. Par contre, la température de l'air n'influerait que très peu les valeurs obtenues.

σ	:	Contrainte limite en traction	Pa
ω	:	Vitesse de rotation du rotor	rad/s
ρ	:	Masse volumique de la glace	kg/m ³
R	:	Rayon du rotor	m
r	:	Rayon où apparaît le décollement	m
e	:	Épaisseur accrétée (considérée uniforme sur le rayon)	m
τ	:	Contrainte limite en cisaillement	MPa

Le rapport NASA-CR-179580 écrit en 1987 par R.J. Scavuzzo et M.L. Chu présente les résultats obtenus sur des cylindres en rotation. Les essais ont été effectués sur des cylindres en acier inoxydable 316, en aluminium et en néoprène. Les résultats des contraintes de cisaillement obtenus avec les cylindres d'aluminium sont représentés graphiquement en fonction de la température de surface à la **Figure 1-14**.

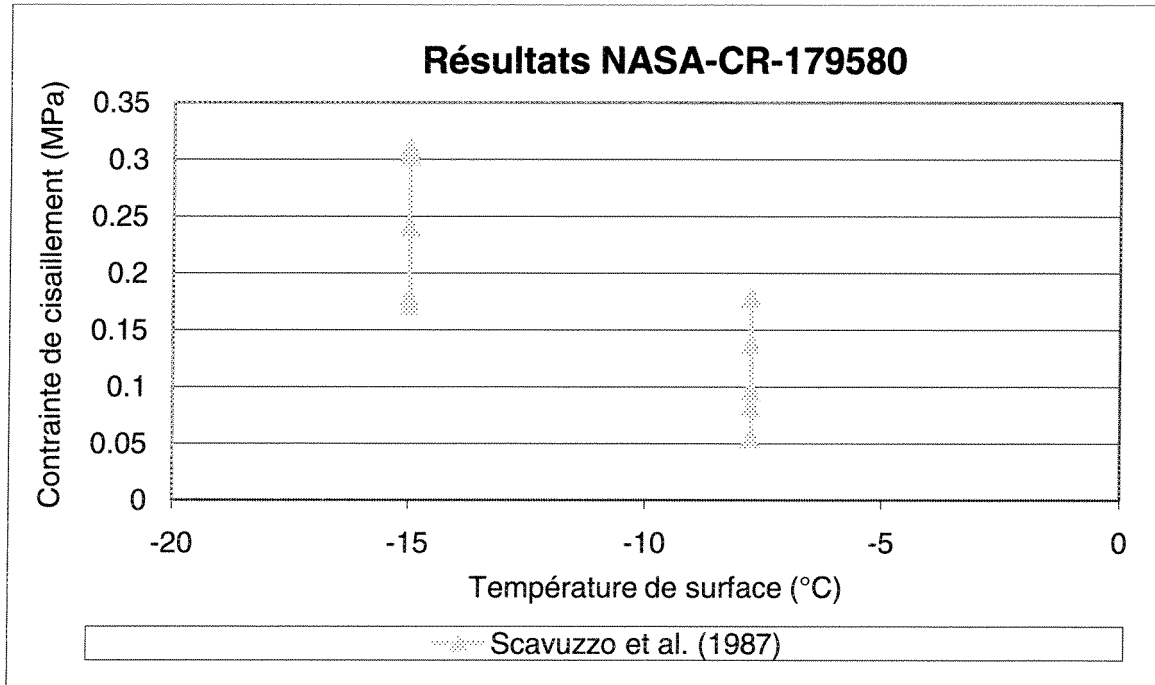


Figure 1-14 : Résultats obtenus par R.J. Scavuzzo et M.L. Chu en 1987 pour la NASA

Ces résultats ont été obtenus pour une vitesse de l'air de 58 m/s et un diamètre des gouttelettes de 30 μm à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ et de 20 μm à $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Contrairement, aux observations d'Itagaki, la contrainte de cisaillement augmente avec la diminution de la température de surface et la diminution du diamètre des gouttelettes d'eau. En effet, elle passe de 0,1 MPa à $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 0,25 MPa à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. En conclusion les auteurs comparent leurs valeurs à celles obtenues par Laforte et al. et constatent une grande similitude 0.25 Mpa pour chacun à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, malgré la différence de leurs protocoles, car les travaux de Laforte et al. étaient basés sur l'étude de l'adhérence d'une accréction de glace en soufflerie, mais sur des câbles d'aluminium. Les principaux résultats de Laforte et al. sont présentés sur la **Figure 1-15**.

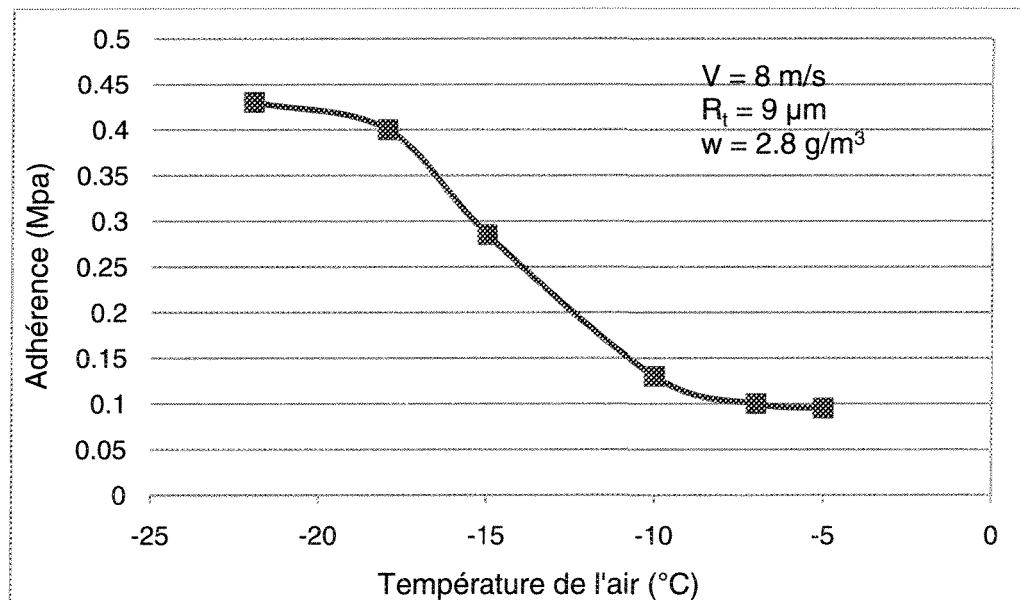


Figure 1-15 : Résultats obtenus par Laforte et al. (J. Druez, 1978)

Laforte et al. concluent également en insistant sur l'influence de la rugosité du matériau employé et sur celle de la température de l'air à l'impact des gouttelettes. Le rapport de Y. Boluck (Boluck Y, 1996) va également dans ce sens en soulignant dans sa revue de littérature que les valeurs d'adhérence mesurées peuvent varier de 1,65 MPa sur des surfaces brutes à 0,07 MPa sur des surfaces polies. Température et rugosité semblent donc être des paramètres importants. Malgré les différences de protocole entre les auteurs, les valeurs de l'adhérence semblent être comprises entre 0,05 MPa pour la température de -5 °C et 0,4 MPa pour les températures inférieures à -20 °C. Il faut toutefois noter que les modifications des conditions météorologiques ou des matériaux peuvent changer significativement ces résultats. Il faut aussi remarquer la différence faite par certains auteurs entre la température de l'air et la température de surface. Dans ce mémoire de maîtrise, l'appareillage est maintenu dans la soufflerie, à la température de l'air de

l'écoulement pendant une certaine période de temps pour que les deux températures soient égales.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DES ESSAIS

2. DESCRIPTION DES ESSAIS

2.1 DESCRIPTION DU MATERIEL

2.1.1 Description de la soufflerie

Les essais sont réalisés dans la soufflerie réfrigérée du LIMA schématisée à la **Figure 2-1**. Elle fonctionne en boucle fermée et à faible vitesse. La soufflerie peut opérer jusqu'à des températures de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 35 HP (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 50 HP (37.3 kW) permettant un flux d'air de 31 kg/s dans la section d'essai.

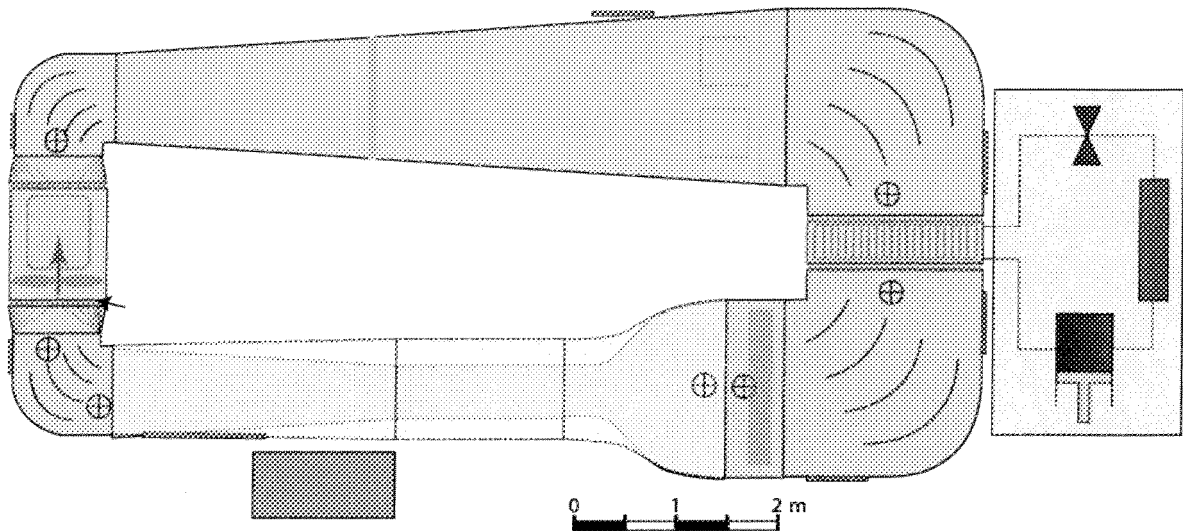


Figure 2-1 : Représentation schématique de la soufflerie réfrigérée du LIMA

La rampe de gicleurs, visible sur la **Figure 2-2** a été conçue au LIMA, elle est composée de neuf gicleurs pneumatiques. Ce montage permet d'atteindre des teneurs en eau liquide de l'écoulement variant de $0,15$ à 28 g.m^{-3} dont les gouttelettes ont des diamètres moyens variant entre 16 et $50 \text{ }\mu\text{m}$. Afin d'homogénéiser verticalement la teneur en eau dans la section d'essai, la rampe de gicleurs effectue un balayage vertical.

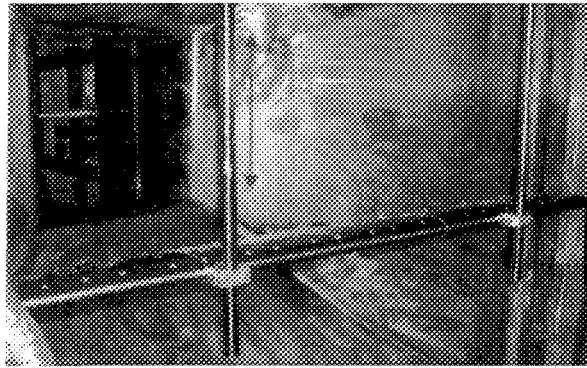


Figure 2-2: Rampe de gicleurs

La section d'essai a une dimension de $1,7 \text{ m} \times 0,914 \text{ m} \times 0,762 \text{ m}$. Les parois de la section d'essai sont composées de deux couches de Lexan d'une épaisseur de $12,7 \text{ mm}$ chacune. Elle est la partie de la soufflerie dans laquelle est installé le SRB-II. Afin de garantir des résultats cohérents et transposables à des conditions de givrage naturelles, il a été nécessaire d'effectuer de nombreux essais d'étalonnage pour vérifier la répartition de la vitesse, de la température, de la teneur en eau et la taille des gouttelettes. Cette caractérisation a été effectuée dans l'optique d'être habilité à effectuer des essais dans le domaine de l'aéronautique.

Les principaux capteurs de mesure soit les thermocouples et les prises de pressions statiques sont installés dans la section d'essai et à l'entrée du convergent.

La soufflerie a été étalonnée et ajustée pour correspondre aux recommandations des rapports SAE ARP 5905 *Calibration and Acceptance of Icing Wind Tunnels* et SAE AIR 4906 *Droplet Sizing Instrumentation Used in Icing Facilities*.

2.1.2 Description du *Spinning Rotor Blade* deuxième version (SRB-II)

Le SRB-II est un modèle réduit d'un rotor d'hélicoptère. Il est composé d'un moteur, d'un arbre de transmission, d'un moyeu et de deux pales. Le SRB-II a été développé au LIMA.

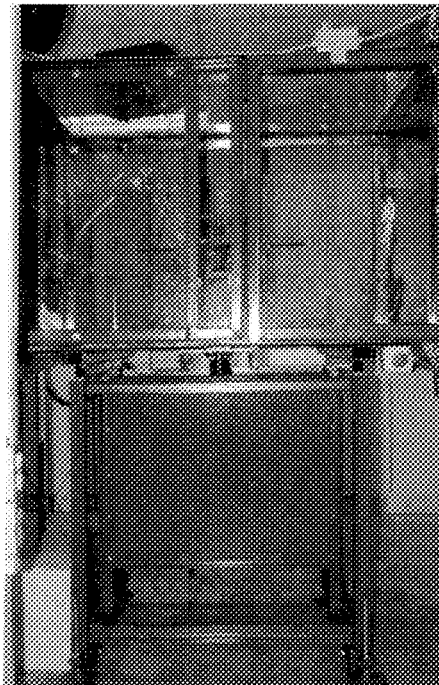


Figure 2-3 : Spinning Rotor Blade II

Le moteur électrique

Le moteur électrique développe une puissance de 10 HP pour une vitesse de rotation de 3 600 RPM. Un capteur mesurant l'impulsion à chaque tour a été installé directement sur

l'arbre de sortie du moteur afin de déterminer la vitesse de rotation. La consommation énergétique du moteur est mesurée à l'entrée de la commande de puissance, elle permet d'observer l'évolution de la puissance consommée durant le givrage.

Le rotor

Le rotor de la **Figure 2-4** provient d'un modèle réduit téléguidé pour les loisirs de la compagnie Hawkpro. Le rotor possède deux pales. Certaines modifications ont été effectuées pour réaliser les essais dans les conditions souhaitées. Par exemple, l'arbre principal en acier a été remplacé par un arbre en acier inoxydable de 12,7 mm et les mains qui maintiennent les pales ont également été modifiées pour permettre d'augmenter la vitesse de rotation initialement prévue sur le modèle de loisir. Avec le rotor, il est possible de faire varier l'angle de calage entre -10° et 10° . La variation de l'angle s'effectue manuellement et ne peut donc être effectuée pendant les essais.

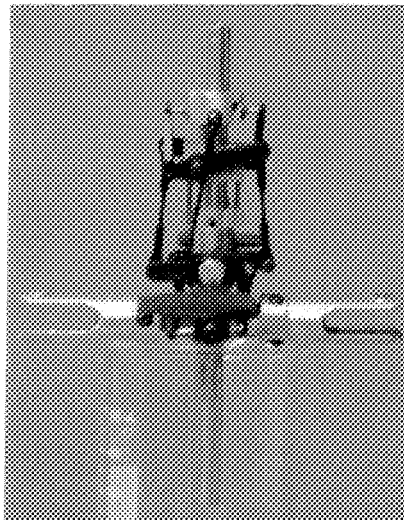


Figure 2-4: Rotor du SRB-II

Les pales

Les pales utilisées pour le SRB-II, présentées sur la **Figure 2-5** sont en aluminium Al 6063-T6. Le profil de la pale extrudée est un NACA-0012. Les pales mesurent 315 mm entre l'extrémité et l'axe de la fixation, pour une corde de 69,64 mm. Lorsqu'elles sont installées, l'extrémité de la pale se trouve à une distance de 390 mm de l'axe de rotation.

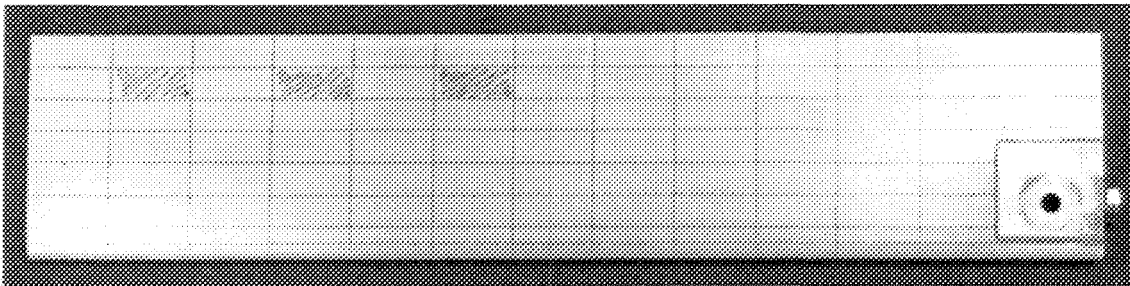


Figure 2-5: Pale d'aluminium utilisée pour le SRB-II

Le montage expérimentale ainsi réalisé permet d'obtenir une vitesse en bout de pale de 131 m/s, soit pour la température de -15°C , 0,41 Mach et un nombre de Reynolds de $0,77 \times 10^6$.

2.2 PROGRAMME D'EXPLOITATION INFORMATIQUE

Un système d'acquisition de données est utilisé pour enregistrer les données. Celui-ci se compose d'une carte d'acquisition National Instrument de 100 kb/s avec 16 canaux et d'un ordinateur AMD Sempron 3400 équipé d'un processeur de 1.8 GHz. Les paramètres enregistrés sont : la vitesse de l'écoulement et la température dans la soufflerie, la puissance consommée par le moteur du SRB-II, la vitesse de rotation du rotor et le débit d'eau à la sortie du réservoir. Un programme à été développé au LIMA pour faciliter la réalisation des essais, l'interface est visible sur la **Figure 2-6**.

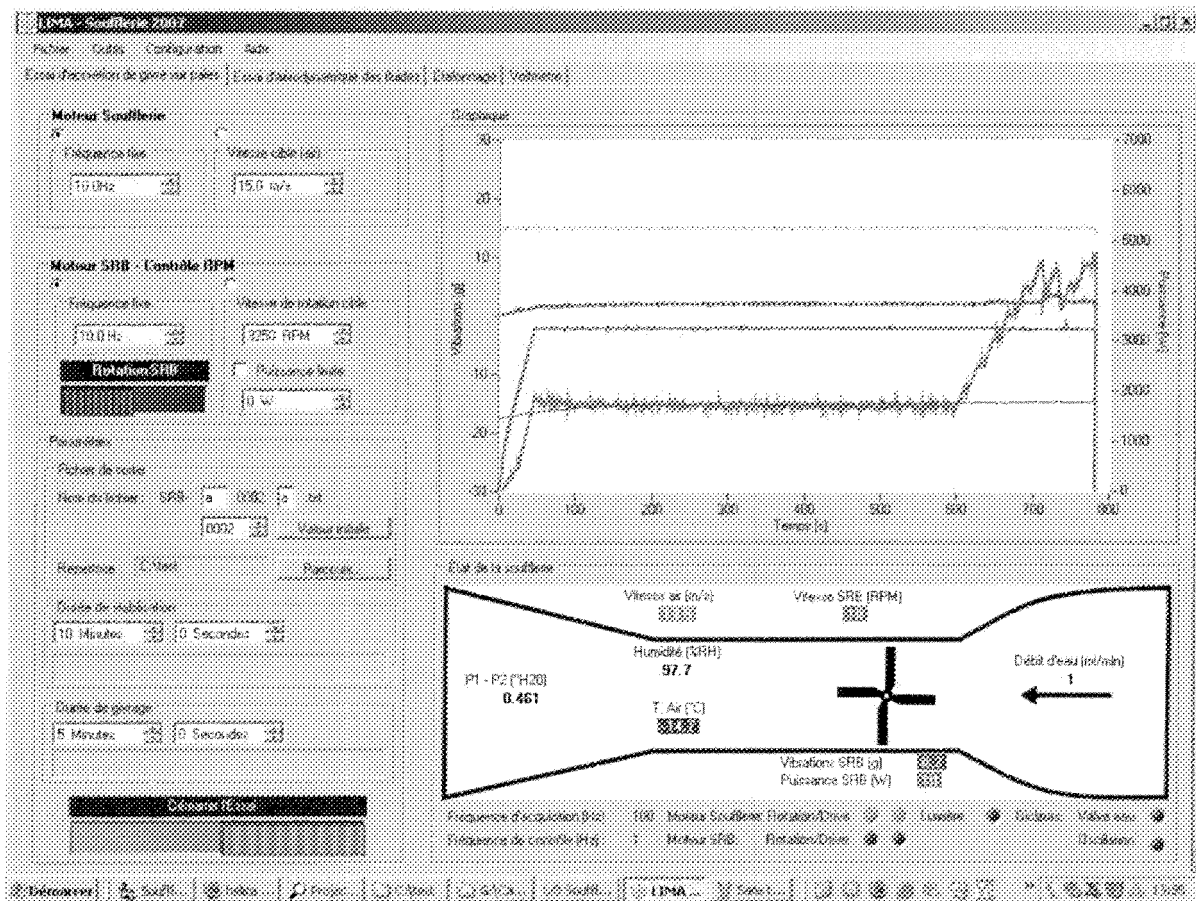


Figure 2-6 : Interface du programme

Enfin, un stroboscope synchronisé avec la vitesse de rotation de la pale permet de filmer les essais grâce à une caméra fixée sur le dessus de la section d'essai.

2.3 PROCEDURE EXPERIMENTALE

2.3.1 Protocole

Les essais ont été réalisés pour une plage de températures de l'air dans la soufflerie variant de -5 à -20 °C. La procédure des essais se divise en plusieurs étapes, regroupées en quatre opérations principales. La première opération consiste à régler la température de la soufflerie, la seconde opération est de régler la rampe des gicleurs, la troisième opération

est d'effectuer un essai et enfin la dernière opération est d'enregistrer les informations obtenues. Les différentes opérations à réaliser pour un essai standard vont maintenant être détaillées de façons plus précises :

1. Les étapes qui suivent servent à régler la température de la soufflerie pour une journée. Elles doivent être faites deux heures avant le début des essais.

- a. Allumer l'ordinateur, démarrer le logiciel de contrôle et régler la vitesse d'écoulement de l'air à la valeur souhaité via l'interface.
- b. Régler la température de l'air dans la soufflerie via l'interface de contrôle, et la température du compresseur en fonction de la température et de la vitesse de l'air dans la soufflerie.
- c. Allumer le compresseur du système de refroidissement.
- d. Laisser la soufflerie en fonctionnement jusqu'à ce que le voyant vert de l'interface de contrôle s'allume pour signaler que la température cible est atteinte et stable.

2. L'étape suivante sert à ajuster la rampe de gicleur utilisée pour simuler la teneur en eau liquide (L_{wc}) et le diamètre moyen des gouttelettes (MVD) présente dans un nuage. Cette étape est réalisée parallèlement à la précédente.

- a. Allumer le système de chauffage de la rampe de gicleur.
- b. Régler le réservoir d'eau à une pression de 552 kPa.
- c. Brancher les circuits d'air et d'eau sur le réservoir et ouvrir le circuit d'eau.
- d. Ajuster les débitmètres pour obtenir la teneur en eau liquide souhaitée.

- e. Ajuster la pression de l'air dans les gicleurs pour obtenir le diamètre moyen de gouttelettes souhaité.

3. L'étape suivante simule le givrage d'un hélicoptère avec le SRB-II.

- a. Allumer et régler la caméra vidéo.
- b. Fermer et bloquer la porte d'accès de la section d'essai.
- c. Ajuster le temps de stabilisation et le temps de givrage dans le programme d'interface.
- d. Choisir le dossier d'enregistrement du fichier.
- e. Choisir la vitesse de rotation du SRB-II dans l'interface du programme puis attendre que la température et la vitesse dans la section d'essai soit stabilisées dans la section d'essai (entre 20 et 40 min selon les conditions).
- f. Démarrer l'essai.
- g. Allumer le stroboscope et la caméra vidéo une minute avant le début de la précipitation, et éteindre la lumière.
- h. A la fin de l'essai, à peu près 3 minutes après le début de la précipitation, arrêter l'enregistrement.

Le démarrage de l'essai démarre simultanément le moteur du rotor et l'acquisition de données. Afin que la température de surface sur les pales soit la même que la température de l'air, celles-ci tournent sans précipitation pendant 10 minutes. Puis, les gicleurs sont activés et le givrage est maintenu jusqu'à ce que le poids de glace accrétée soit suffisamment élevé pour que l'une des pales se déglace sous l'effet de la force centrifuge agissant sur le dépôt.

4. La dernière étape consiste à enregistrer les informations issues de l'essai et à préparer le suivant.

- a. Activer les boutons poussoirs de sécurité.
- b. Ouvrir la section d'essai et prendre les pales en photos sous les quatre différentes vues.
- c. Mesurer l'épaisseur de glace accumulée sur les pales à l'aide d'un pied à coulisse.
- d. Détacher les pales du rotor et les peser sur la balance.
- e. Démonter le rotor pour le déglacer avec les pales, puis les sécher.
- f. Réinstaller le rotor, polir les pales avec un Scotch Brite fin de 3M et les fixer sur les mains d'accroche. Passer de l'alcool sur les pales pour enlever les résidus de polissage.
- g. Fermer la porte de la section d'essai et réactiver les boutons poussoir de sécurité.

2.3.2 Paramètres mesurés lors de l'essai

Photographie

A l'issu de chaque essai, des photographies sont réalisées sous quatre différentes vue de la pale. Ces photographies permettent de s'assurer que l'essai réalisé est bien semblable aux autres. Elles permettent aussi de garder une trace visuelle de l'apparence de la pale à la fin de l'essai.

Vidéo

La caméra vidéo enregistre le déroulement de certains essais. Le stroboscope flash le rotor chaque tour à une même position angulaire. En raison du nombre d'image observable par le cerveau, la fréquence des flashes donne alors l'illusion d'un rotor fixe. L'enregistrement vidéo permet alors de visualiser l'accrétion de glace et le déglacage.

Épaisseur

La mesure d'épaisseur de glace accrétée est réalisée à l'aide d'un pied à coulisse d'une précision de 0,02 mm. La première mesure se fait à 25 mm de l'extrémité de la pale et puis tous les 50 mm jusqu'à l'attache du rotor, comme montré à la **Figure 2-7**.

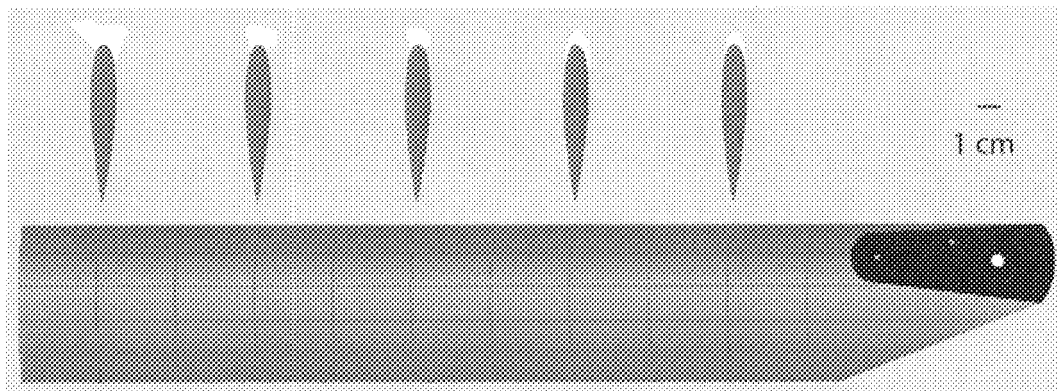


Figure 2-7 : Section de glace le long de la pale

Surface

Certains essais sont effectués pour déterminer la surface de glace accrétée. La surface est dessinée à la fin de l'essai aux mêmes positions que l'épaisseur. Une lamelle métallique préalablement chauffée fait fondre la glace à chacune des positions à mesurer. Ensuite une feuille de carton avec un profil de pale découpée sur le rebord est insérée sur le bord

d'attaque. Puis, à l'aide d'un crayon, le contour de la surface de glace est dessiné sur le carton comme montré à la **Figure 2-8**.

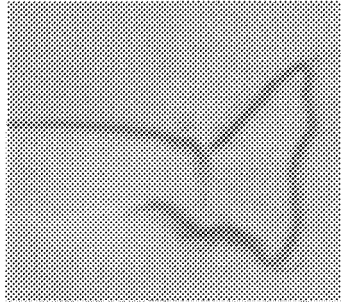


Figure 2-8 : Dessin d'une coupe perpendiculaire à l'axe de la pale à l'issue d'un essai

Enfin, l'utilisation du logiciel d'analyse d'image dgsoft proMED v5.06 permet d'effectuer les mesures souhaitées. La réalisation des dessins permet de déterminer l'abscisse curviligne de contact entre la glace et la pale, la surface de l'accrétion pour les différentes positions ou sont mesurées les épaisseurs et donc d'établir une relation entre l'épaisseur de glace et la surface de glace accrétée. La mesure de la surface permet enfin de corrélérer la masse de glace accrétée aux surfaces mesurées.

Masse

Après un essai, chaque pale est pesée puis en faisant la différence avec la masse de la pale sans glace, la masse de glace accrétée sur chaque pale est connue. Si l'accrétion de glace d'une seule pale s'est détachée, il est possible en faisant le différentiel de masse entre les deux accrétions de glace de déterminer la masse s'étant détachée. Cependant, la détermination de cette masse suppose une accrétion égale sur les deux pales. Cette approximation est légitime puisque les pales sont soumises aux mêmes conditions et

captent donc autant d'eau l'une que l'autre. Les masses de glace sont déterminées à l'aide d'une balance de précision 0,1 g.

Taille des grains

La mesure de la taille des grains est réalisée lors d'essais spécifiques à cette mesure. Pour ce faire, les techniciens du laboratoire ont modifié une paire de pales classiques en découpant le bout de la pale pour le remplacer par une poutre d'aluminium au profil rectangulaire. Ainsi, après un essai, l'échantillon de glace peut être retiré aisément et manipulé. L'échantillon est aminci à l'aide d'un microtome, montré à la **Figure 2-9**, jusqu'à l'obtention d'une surface plane et lisse. Ensuite, la surface est recouverte d'une fine couche de Formvar à 5 % afin de calquer la forme des grains de glace. Lorsqu'il est sec, cette réplique est retirée de l'échantillon à l'aide d'une pince puis, placée sur une lamelle de verre pour être photographiée et analysée avec un microscope à filtre polarisé. Les images prises avec une caméra vidéo (1,3 Méga pixel) sont analysées à l'aide du logiciel dgsoft proMED v5.06. Ce logiciel mesure automatiquement les distances. Les dimensions des grains sont ensuite déterminées en utilisant la méthode d'intersection ou le nombre d'intersections sur la diagonale est divisé par la longueur de celle-ci.

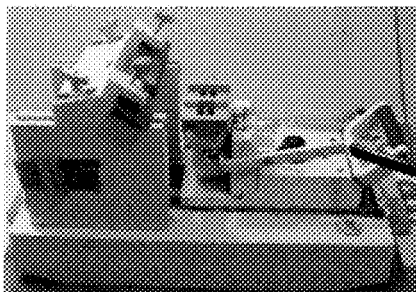


Figure 2-9 : Microtome utilisé au LIMA pour préparer les surfaces à observer

CHAPITRE 3

MODÈLE ANALYTIQUE

3. MODELE ANALYTIQUE

3.1 BILAN MECANIQUE

Pour pouvoir déterminer la valeur de l'adhérence de la glace à l'interface glace substrat, c'est-à-dire la valeur de la contrainte de cisaillement entre les deux matériaux, il faut tout d'abord réaliser le bilan mécanique sur la pale givrée. Les forces en présence sont schématisées sur la **Figure 3-1**.

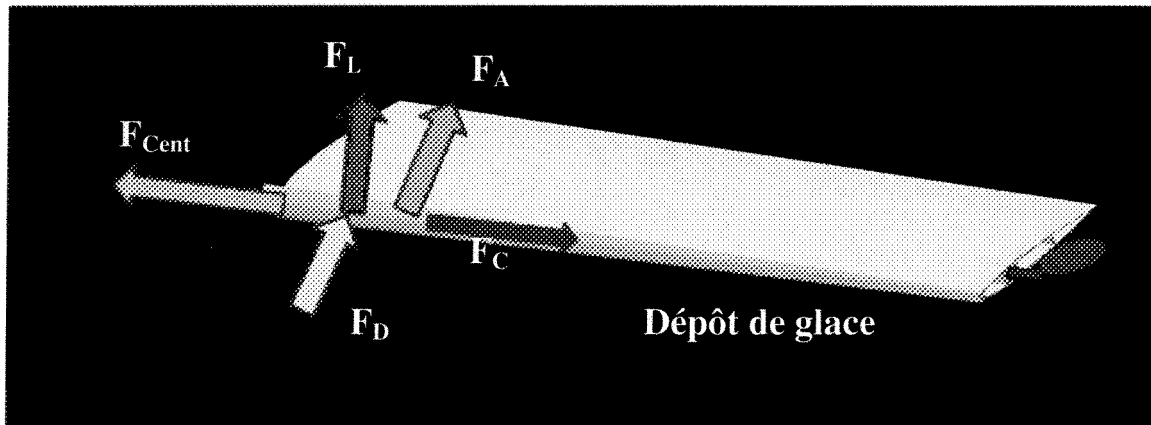


Figure 3-1: Représentation des différentes forces présentes sur une pale givrée

En considérant toutes les principales forces agissant sur la pale en rotation, le bilan mécanique des actions exercées sur le dépôt de glace accrétée est : la force centrifuge F_{Cent} , la cohésion de la glace F_C , l'adhérence de la glace sur la pale F_A , la force de portance F_L et la force de trainée F_D . Le bilan mécanique s'écrit alors :

$$\vec{F}_{Cent} + \vec{F}_A + \vec{F}_C + \vec{F}_L + \vec{F}_D = 0 \quad \text{Équation 3-1}$$

En écrivant les différentes forces sous formes scalaires (Équation 3 à 7). La force centrifuge, F_{Cent} est définie par l'Équation 3-2.

$$F_{Cent} = m_s r \omega^2 \quad \text{Équation 3-2}$$

- m_s : masse de glace décrochée (**Figure 3-2**) en kg.
- r : position au centre du dépôt de glace décrochée (**Figure 3-2**) en m.
- ω : Vitesse de rotation du rotor (**Figure 3-2**) en rad/s.

La force d'adhérence, F_A est définie par l'Équation 3-3.

$$F_A = \tau \cdot S_A \quad \text{Équation 3-3}$$

- τ : Contrainte de cisaillement limite à l'interface entre la glace et le substrat, en Pa.
- S_A : Surface adhésive (**Figure 3-2**) en m^2 .

La force de cohésion, F_C est défini par l'Équation 3-4.

$$F_C = \sigma \cdot S_c \quad \text{Équation 3-4}$$

- σ : Contrainte limite en traction, en Pa
- S_C : Surface cohésive à la position de la rupture, (**Figure 3-2**) en m^2 .

La force de portance, F_L est défini par l'Équation 3-5.

$$F_L = \rho_{air} \cdot S \cdot C_L \cdot V^2 \quad \text{Équation 3-5}$$

- ρ_{air} : Masse volumique de l'air, en $kg \cdot m^{-3}$.
- S : Surface orthogonale à l'écoulement de l'air, en m^2 .
- C_L : Coefficient de portance de la surface dans l'écoulement, adimensionnel.
- V : Vitesse relative de la surface par rapport à celle de l'écoulement d'air, en m/s.

La force de trainée est définie par l'Équation 3-6.

$$F_D = \rho_{air} \cdot S \cdot C_D \cdot V^2 \quad \text{Équation 3-6}$$

Les termes sont similaires à ceux de l'Équation 3-5, hormis le terme C_D qui correspond au coefficient de traînée et qui est adimensionnel.

La détermination de la valeur de la contrainte de cisaillement ne nécessite pas les termes aérodynamiques, leur contribution étant dirigée à 90 °, le produit scalaire sera nul. De plus, les auteurs s'entendent pour négliger ces forces sous la vitesse de 0,45 Mach puisqu'elles représentent moins de 10% par rapport à la force centrifuge. Ainsi, en supprimant c'est deux termes de l'équation et en isolant le terme τ dans l'Équation 3-1, l'écriture de l'adhérence moyenne de la glace à l'interface glace/substrat au point d'arrachement devient :

$$\tau = \frac{m_s \cdot \omega^2 \left(R - \frac{l_c}{2} \right) - \sigma \cdot S_c}{s \cdot l_c} \quad \text{Équation 3-7}$$

- s : Abscisse curviligne de contact entre la glace et la pale (**Figure 3-2**), en m.
- l_c : Longueur de glace décrochée lors du déglçage (**Figure 3-2**), en m.

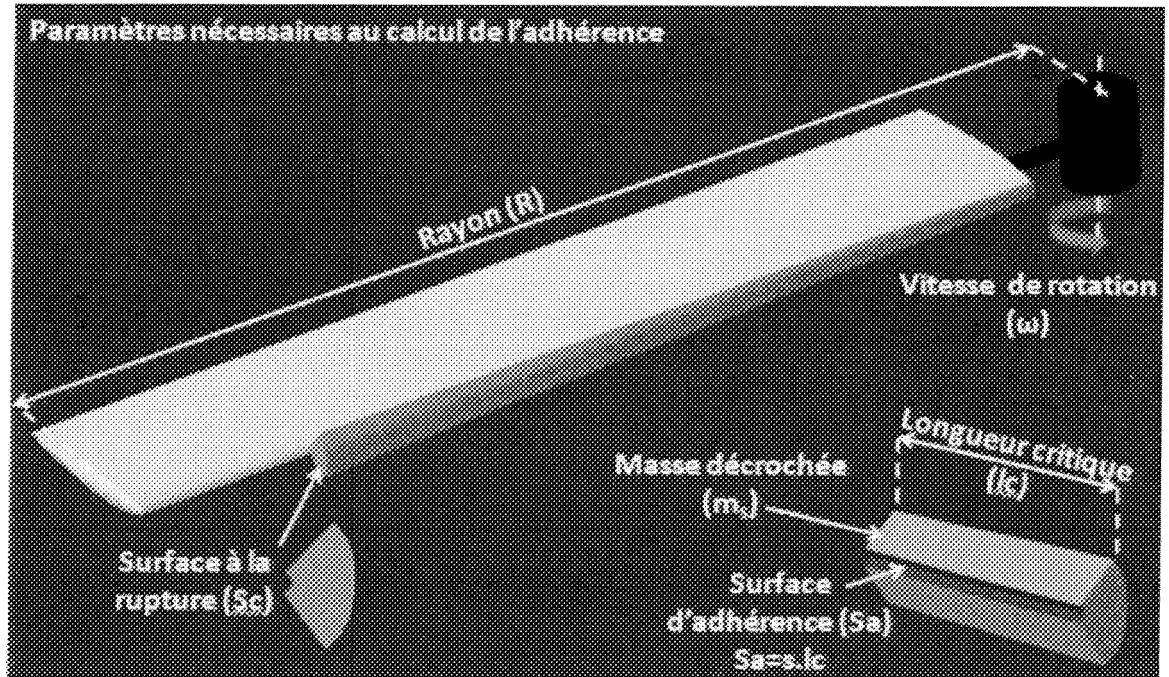


Figure 3-2: Représentation des paramètres pour le calcul de l'adhérence

Les paramètres illustrés sur l'image ci-dessus sont ceux nécessaires à la détermination de l'adhérence de la glace sur la pale. Cependant, la contrainte de cisaillement calculée à partir de l'Équation 3-7 nécessite de connaître la masse de glace décrochée (m_s). Cette méthode de calcul a été nommée, la méthode de la masse. Or, cette valeur n'est pas disponible si les dépôts de glace des deux pales se décrochent simultanément durant l'essai, ce qui se produit pour près de la moitié des essais. C'est pourquoi, des solutions de remplacements ont été recherchées pour combler cette lacune, puisque pour une majorité d'essais, les deux pales se déglacent. En réalisant certaines approximations géométriques, il est possible de d'estimer cette masse. La section 3.2 décrit comment l'estimer à partir de l'épaisseur de glace mesurée.

3.2 APPROXIMATION DE LA MASSE

3.2.1 La forme de la glace accrétée

La première approximation réalisée consiste à remplacer la section de glace accrétée par un trapèze symétrique par rapport à l'écoulement d'air, comme le montre la **Figure 3-3**.

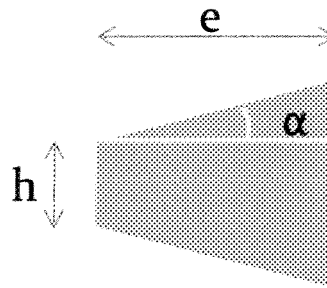


Figure 3-3: Approximation de la forme de l'accrétion

Le terme e représente l'épaisseur de glace accrétée, l'angle α représente l'angle d'accrétion de la glace. L'angle d'accrétion dépend de la température d'accrétion, en effet plus la température est froide et plus l'angle est aigu. Le terme h représente la petite hauteur du trapèze. Ainsi, la surface de la section de glace devient :

$$S_{\text{section}} = e(h + e \tan(\alpha)) \quad \text{Équation 3-8}$$

3.2.2 L'épaisseur de glace accrétée

L'épaisseur de glace augmente en fonction de la vitesse et donc de la distance par rapport à l'axe de rotation. En raison du décrochement de la glace, l'épaisseur de la glace au milieu du morceau décrochée est inconnue. L'épaisseur moyenne est alors extrapolée en

considérant que l'épaisseur de glace accrétée le long de la pale augmente de façon linéaire, comme montrée à la **Figure 3-4**.

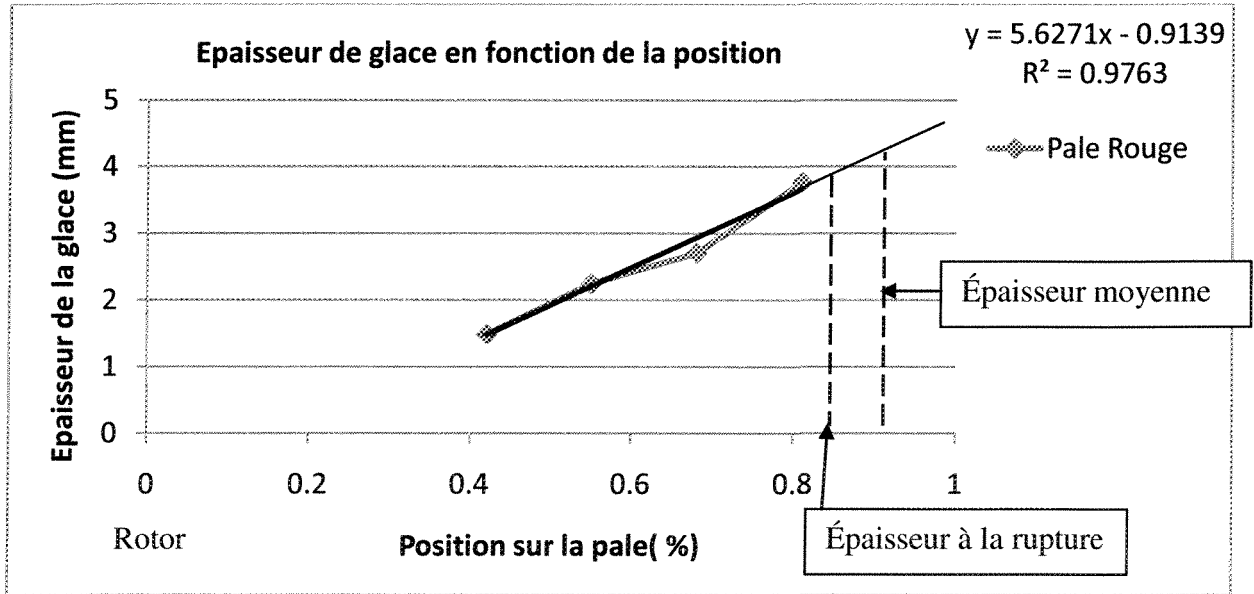


Figure 3-4: Extrapolation de l'épaisseur à la rupture et de l'épaisseur moyenne

Ce graphique représente l'épaisseur de glace accrétée sur la pale rouge pour l'essai A-089. Chaque point correspond à la mesure de l'épaisseur prise aux positions montrées sur la **Figure 2-7**. La droite en noire correspond à la corrélation linéaire obtenue à partir des points mesurés et dont l'équation est indiquée en haut à droite du cadre. Les deux droites en pointillées montre la position à la rupture, c'est-à-dire la longueur de glace décrochée ou sera extrapolée l'épaisseur à la rupture e_s , et la position moyenne, c'est-à-dire le centre de l'échantillon de glace décrochée ou sera extrapolée l'épaisseur moyenne e_m .

Ainsi, la masse décrochée m_s approximée s'écrit :

$$m_s = \rho_l e_m (h + e_m \tan(\alpha)) \quad \text{Équation 3-9}$$

Ainsi, en remplaçant dans l'Équation 3-7 la masse décrochée écrite dans l'Équation 3-9 et la surface explicitée dans l'Équation 3-8, l'adhérence de la glace devient :

$$\tau = \frac{\rho \cdot e_m \cdot (h + e_m \cdot \tan(\alpha)) \cdot l_c \cdot \omega^2 \left(R - \frac{l_c}{2} \right) - \sigma \cdot e_s \cdot (h + e_s \cdot \tan(\alpha))}{s \cdot l_c} \quad \text{Équation 3-10}$$

Ainsi, il devient possible de déterminer la valeur de l'adhérence même si l'accrétion des deux pales s'est décrochée. Cette méthode présente certains inconvénients, mais elle a été développée en raison du grand nombre d'essais qui avaient déjà été réalisés alors que les épaisseurs avaient été mesurées, mais pas les masses. Il faut préciser qu'un certain nombre d'essai avec une seule pale déglacée est nécessaire pour déterminer un angle d'accrétion moyen (α). La détermination se fait en utilisant l'Équation 3-8 de calcul de la masse puis, en isolant α , la formule devient :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{m_s}{\rho \cdot l_c \cdot e_m} - h}{e_m} \right) \quad \text{Équation 3-11}$$

Les masses approximées sont donc calculées en utilisant un angle d'accrétion qui est la moyenne de ce qu'auraient été les angles d'accrétion de glace si la forme de glace était effectivement un trapèze parfait.

3.3 CONTRAINTE LIMITE EN TRACTION DE LA GLACE

La contrainte limite en traction de la glace σ , est un paramètre déterminant du calcul de l'adhérence. En effet, d'après l'Équation 3-7, la contrainte limite en traction est le seul

terme qui vient contrebalancer la force centrifuge. Cependant, la valeur de la contrainte limite en traction même si elle est citée dans la littérature, est difficilement utilisable en raison de la grande variabilité des résultats entre les différents auteurs est due aux multitudes de méthodologies existantes.

De nombreux auteurs ont décrit l'évolution de la contrainte limite en traction en utilisant une loi bien connue des métallurgistes et autres spécialistes des matériaux : la loi de Hall Petch représentée par l'**Équation 3-12** et qui décrit l'évolution de la contrainte limite en traction en fonction de la taille des grains d , d'un coefficient multiplicatif k et d'une contrainte limite en traction de référence σ_i .

$$\sigma = \sigma_i + k.d^{\frac{1}{2}} \quad \text{Équation 3-12}$$

D'après les résultats expérimentaux de Schulson et al. (1982), à -10°C , les paramètres ci-dessus prennent les valeurs de $\sigma_i = 0,6 \text{ MPa}$ et $k = 0,02 \text{ MPa.m}^{1/2}$. Cette formule est valable pour des tailles de grains d comprises entre 0,2 et 2 mm et donnant des valeurs de contrainte limite en traction comprises entre 2,01 MPa et 1,05 MPa pour de la glace obtenue par congélation. B. Michel (1978) a complété la relation de Hall Petch en ajoutant l'influence de la température. Ainsi, il a écrit l'**Équation 3-13** pour une température de -10°C et une taille de grain variant entre 0,2 et 2 mm représenté par :

$$\sigma = 9,4 \times 10^4 . (d^{\frac{1}{2}} + |T|^{0.78}) \quad \text{Équation 3-13}$$

La **Figure 3-5** représente donc la variation de la contrainte limite en traction en fonction de la taille des grains de glace, dans les limites de 0,2 à 2 mm, à la température de -10°C ,

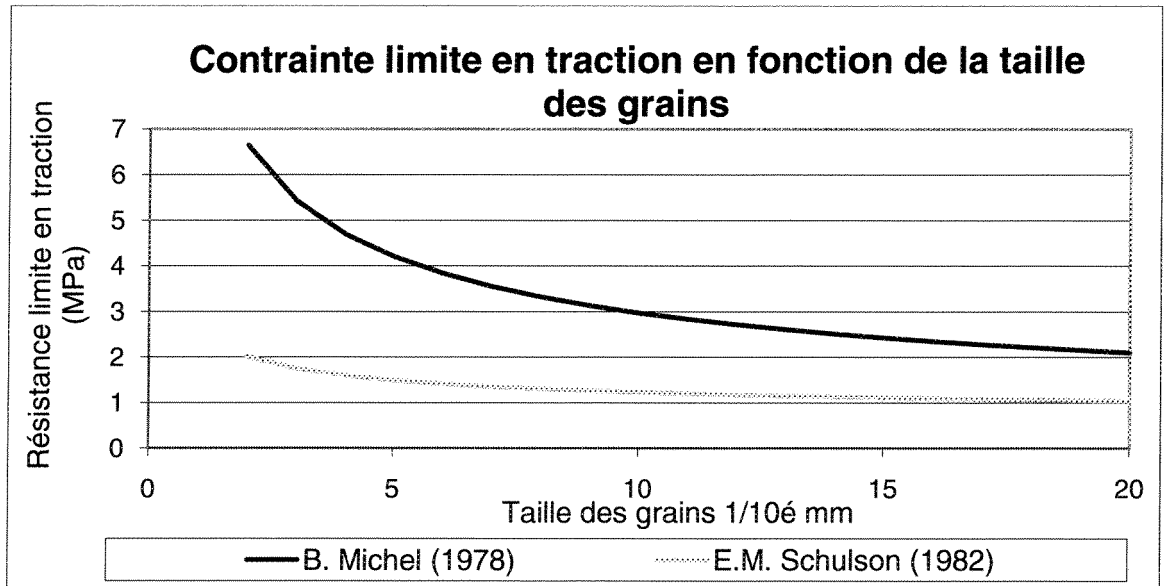


Figure 3-5 : Évolution de la contrainte limite en traction de la glace à -15 °C, pour une taille de grain variant entre 0.2 et 2 mm

Les valeurs obtenues par Michel sont plus élevées que celles obtenues par Schulson et par les autres auteurs qui ont étudié l'influence de la température. La **Figure 3-6** représente l'évolution de la résistance limite en traction en fonction de la température. C'est résultats présentés entre 0 et -25 °C montrent une tendance commune, avec une augmentation assez importante jusqu'à -5 °C, puis une augmentation plus faible jusqu'à -20 °C

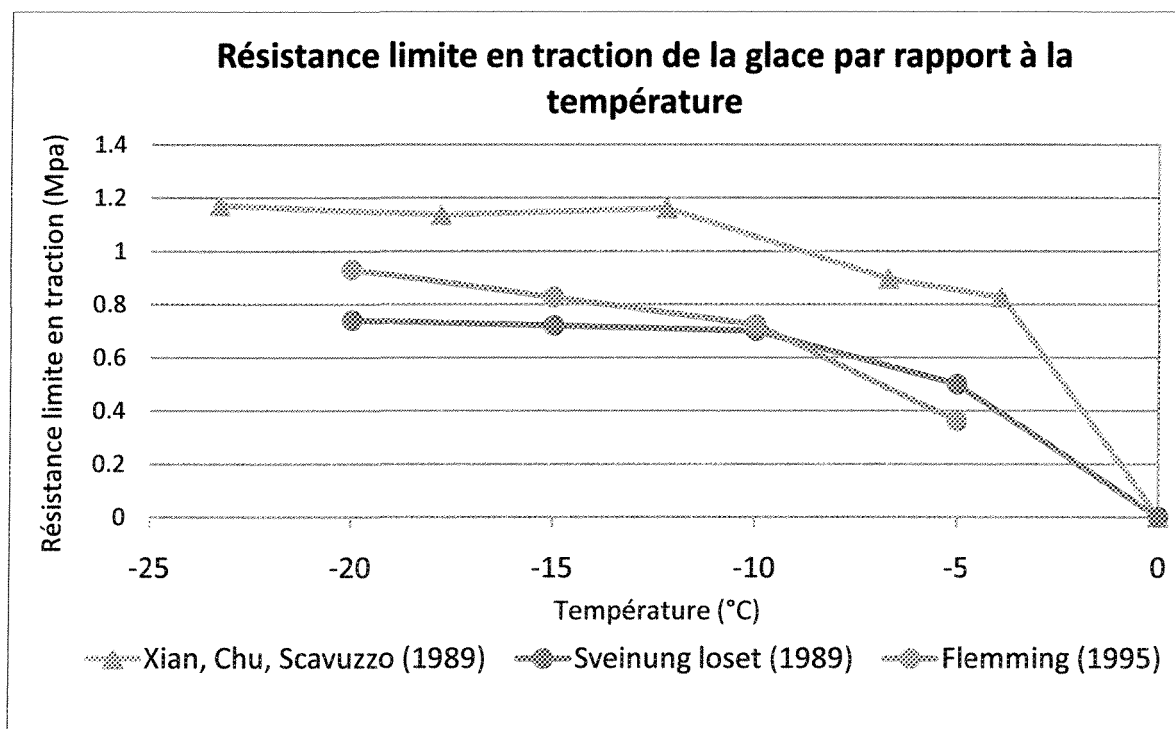


Figure 3-6 : Résistance limite en traction de la glace selon différents auteurs

Les résultats de Sveinung Loset (Loset, 1989) sont plus faibles que ceux des autres auteurs puisque la glace utilisée pour les essais n'est pas de la glace pure obtenue en laboratoire, mais des blocs de glace extraits de glaciers avec une salinité variant entre 1 et 2 %. D'après Chu et al., la résistance en traction de la glace accrétée en soufflerie est significativement plus faible que la glace obtenue en réfrigérant de l'eau. Parmi les résultats ci-dessous les essais de Xian et al (Xian, 1989), et de Flemming (Flemming, 1995) ont été réalisés en accréant la glace en soufflerie. En général, les auteurs observent une augmentation de la valeur de la contrainte limite en traction entre les températures les plus élevées (0 à -5 °C) jusqu'à un palier situé entre -10 °C et -15 °C. Ensuite lorsque la température descend sous ce palier la contrainte limite en traction reste sensiblement la même pour les trois auteurs.

Pour conclure sur la contrainte limite en traction de la glace, il apparaît que la taille des grains et la température joue un rôle dans la valeur finale. Malheureusement n'ayant pas l'appareillage pour la mesurer dans le cas d'une accréation de glace réalisée sur une pale en rotation dans une soufflerie réfrigérée cette donnée demeure inconnue. Les résultats cités dans la littérature sont obtenus dans des conditions différentes de celles de la soufflerie et le type de glace n'est pas nécessairement le même (verglas et givre). Cependant, les auteurs étudiant des problèmes similaires aux hélicoptères, ont utilisé ces résultats pour leurs applications. Flemming a travaillé sur la caractérisation des performances d'un rotor givré. Pour obtenir la valeur de la contrainte limite en traction, il a utilisé des échantillons de glace cylindrique obtenue dans une soufflerie réfrigérée. Les valeurs utilisées sont résumées dans le **Tableau 3-1**. La **Figure 3-7** représente graphiquement les résultats utilisés pour ce travail, pour les différentes températures qui furent étudiées, la valeur de la contrainte limite en traction se décompose en deux parties, premièrement entre 0 et -10 °C, la contrainte limite en traction augmente fortement puis passé -10 °C la pente devient moins élevée. Ces résultats s'apparentent assez à ceux des autres auteurs qui observent un palier passer les températures de -10 à -15 °C.

Tableau 3-1 : Valeur de la contrainte limite en traction utilisée pour le calcul de l'adhérence basée sur les valeurs de Flemming

Température (°C)	-5	-10	-15	-20
Contrainte limite en traction (MPa)	0.36	0.72	0.83	0.93

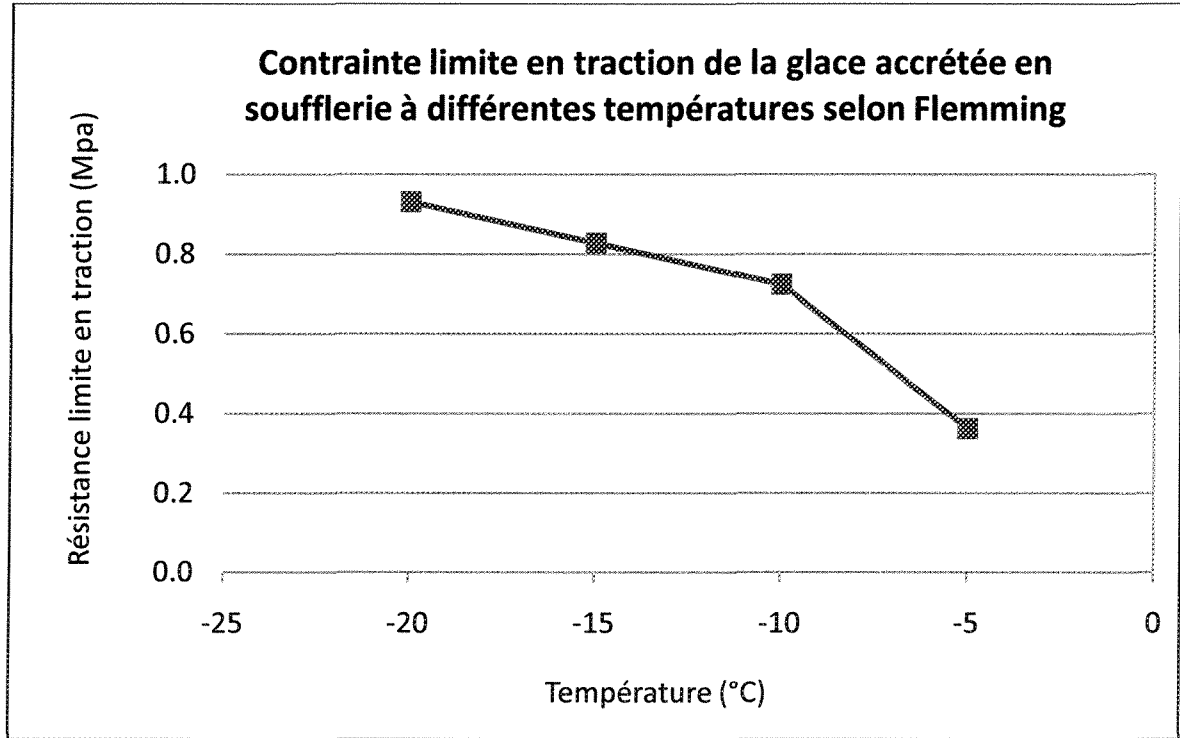


Figure 3-7 : Valeur de la contrainte limite en traction utilisée pour les différentes températures

3.4 MASSE VOLUMIQUE DE LA GLACE

Parmi les paramètres inconnus de l'Équation 3-10 décrivant la contrainte de cisaillement de la glace à l'interface, il y a la masse volumique de la glace. Ce paramètre est bien documenté par plusieurs auteurs l'ayant mesuré en faisant intervenir certains paramètres de la précipitation. La plupart des auteurs ayant décrit la masse volumique de la glace par une équation ont utilisé le paramètre de Macklin (Macklin, 1962) décrit ci-dessous dans l'Équation 3-14 :

$$X = \frac{d_d}{2} \cdot \frac{U}{T_f - T_s} \quad \text{Équation 3-14}$$

Le terme de Macklin est fonction de la taille des gouttelettes d_d en μm , de la vitesse de l'air dans l'écoulement U_∞ en m/s, de la température de solidification exprimée T_f en K et de la température de surface du collecteur T_s en K. La limite inférieure du terme de Macklin est de $1 \mu\text{m}^2.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour éviter d'obtenir des masses volumiques trop faibles.

Macklin a décrit la masse volumique de la glace en utilisant l'**Équation 3-15**, le terme ρ_{ref} correspond à la masse volumique de l'eau mesurée à 4 °C qui est $1\,000 \text{ kg.m}^{-3}$:

$$\rho = \rho_{\text{ref}} \left(\frac{X}{X + 1.5} \right)^2 \quad \text{Équation 3-15}$$

Par la suite, Laforte et al. (Laforte et al, 1992) ont étudiée la masse volumique de la glace et ont écrit l'**Équation 3-17**, ou ρ_{imax} correspond à la valeur maximale de la masse volumique de la glace calculer pour un arrangement de cristaux hexagonaux est égale à 917 kg.m^{-3} .

$$\rho = \rho_{\text{imax}} \left(\frac{X}{X + 1.3} \right)^2 \quad \text{Équation 3-16}$$

Enfin, Bain et Gayet (Bain et Gayet, 1983) ont aussi développé leur équation représentée par l'**Équation 3-17** :

$$\begin{aligned} \rho &= 1000. \left(\frac{X}{X + 5.61} \right) & 10 \leq X \leq 60 \\ \rho &= 917 & 60 \leq X \end{aligned} \quad \text{Équation 3-17}$$

La détermination du paramètre de Macklin se fait en considérant la vitesse de l'écoulement de l'air U_∞ , mais celle-ci a été déterminée sur des cylindres fixes, ou en rotation sur leur axe. Dans le cas du SRB-II, l'extrémité de la pale a une vitesse beaucoup plus rapide que celle de l'écoulement et par conséquent c'est la vitesse relative de la gouttelette à l'impact

qui est utilisée pour le calcul du paramètre de Macklin dans l'Équation 3-14. Les résultats de Laforte et al. et de Bain et Gayet sont les deux seuls présentés sur la Figure 3-8 et résumé dans le Tableau 3-2, en effet dans les conditions d'accrétions utilisées, ce sont leurs résultats qui sont les plus représentatifs. Le Tableau 3-2 présente les masses volumiques de ces auteurs, à différentes positions sur la pale et pour une température de -15 °C. Chaque position sur la pale ayant sa propre vitesse, obtenue ici pour une vitesse de rotation de 3 200 RPM.

Tableau 3-2 : Masse volumique de la glace selon Bain et Gayet et Laforte et al. en fonction de la vitesse d'impact des gouttelettes.

Distance par rapport à l'axe de rotation (m)	0,390	0,375	0,325	0,275	0,225	0,175	0,125	0,075
Vitesse (m.s ⁻¹)	130,7	125,7	108,9	92,2	75,4	58,6	41,9	25,1
Paramètre de Macklin (μm ² .s ⁻¹ .K ⁻¹)	117,6	113,1	98,0	82,9	67,9	52,8	37,7	22,6
Masse volumique de Bain et Gayet (kg.m ⁻³)	917,0	917,0	917,0	917,0	917,0	903,9	870,5	801,3
Masse volumique de Laforte (kg.m ⁻³)	897,1	896,3	893,2	888,9	882,8	873,4	856,9	820,0

Comme le montre le Tableau 3-2, les conditions d'accrétion de glace utilisées durant les essais impliquent de faibles variations de la masse volumique, ceci est du à la vitesse d'impact élevée des gouttelettes sur la pale. La Figure 3-8 représente la masse volumique de la glace pour les mêmes positions que celles écrites dans le Tableau 3-2.

L'Équation 3-15 correspondant au calcul de la masse volumique par Laforte et al. sera utilisée pour la détermination de la contrainte de cisaillement. En effet, comme le montre la Figure 3-7, la masse volumique théorique maximale de glace n'est pas atteinte par sa formule, et à l'issu des essais à -15 °C, la glace obtenue était laiteuse. Ce qui signifie la présence de bulles d'air emprisonnées dans l'accrétion de glace, par conséquent, la glace ne peut avoir une masse volumique égale à la limite théorique maximale et la formule de détermination de la masse volumique de Bain et Gayet ne peut convenir.

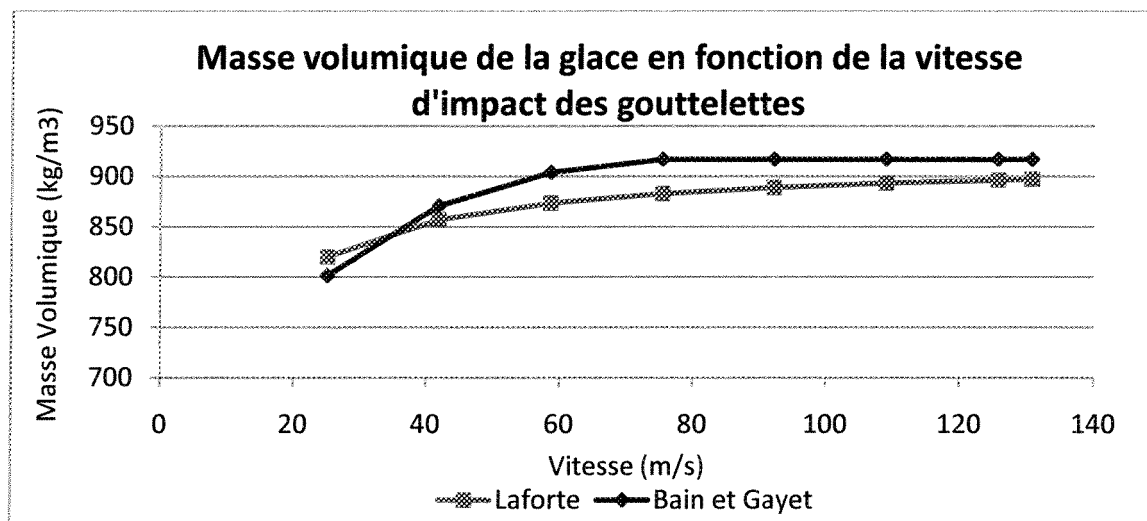


Figure 3-8: Masse volumique de glace en fonction de la vitesse d'impact des gouttelettes

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4. RESULTATS

4.1 DESCRIPTION D'UN ESSAI STANDARD

Pour faciliter l'interprétation des résultats, l'essai SRB A-089 est expliqué en détail dans cette section. Les résultats présentés dans ce mémoire ont été obtenus en suivant le même protocole que celui décrit pour cet essai.

4.1.1 Acquisition

L'analyse des données obtenues via le système d'acquisition est réalisée sur Excel. Chaque capteur fournit une valeur à chaque seconde (1 Hz). Les valeurs : Température de l'air, vitesse de l'air dans la section d'essai, puissance consommée par le moteur actionnant le rotor, vitesse de rotation et débit des gicleurs, sont ensuite représentés graphiquement comme le montre la **Figure 4-1**. Les valeurs représentées sur le graphique au-dessus des courbes correspondent à la valeur moyenne et à l'écart type calculé entre les secondes 60 et 540. Les paramètres mesurés permettent de contrôler la validité ou non des essais en s'assurant que les paramètres de l'essai sont inclus dans la zone de variation permise des essais qui est de 30%.

4.1.2 Début de l'essai

Durant les 60 premières secondes de l'essai montré à la **Figure 4-1**, la vitesse de rotation, en gris foncé, augmente jusqu'à la valeur cible de 3 200 RPM. Parallèlement, la puissance consommée par le moteur, gris clair, augmente jusqu'à atteindre un maximum puis la fluidité du lubrifiant et la stabilisation du système entraine une légère baisse jusqu'à sa

valeur nominale de 1 200 W, en moyenne. Les autres paramètres restent constants. Les 9 minutes suivantes servent à stabiliser la température de la pale pour que celle-ci soit à la même température que l'air de la soufflerie.

4.1.3 Début de la précipitation

À partir de la 10^{ème} minute de l'essai, la précipitation est déclenchée. L'accrétion de la glace sur les pales a pour effet de modifier les performances aérodynamiques de celle-ci. Comme le montre la **Figure 4-1** en page **60**, l'augmentation de la puissance consommée est immédiate et très importante, généralement de l'ordre de 30 W/s soit 2,5 % de la puissance nominale par seconde. L'accrétion dure, dépendamment de la température de l'essai, de l'ordre de 2 minutes, et atteint en moyenne 5 000 W pour la température de -15 °C. La consommation énergétique du rotor augmente donc en moyenne de 400 %. Cette sévère augmentation de la puissance consommée n'est bien entendu pas possible sur un hélicoptère de taille réelle puisque lors de son fonctionnement il consomme déjà aux alentours de 80 % de sa puissance maximale. Ainsi, dans le cas du SRB-II, cette puissance maximale serait de 1 500 W et la durée de givrage nécessaire pour atteindre cette puissance serait de 10 s, en moyenne.

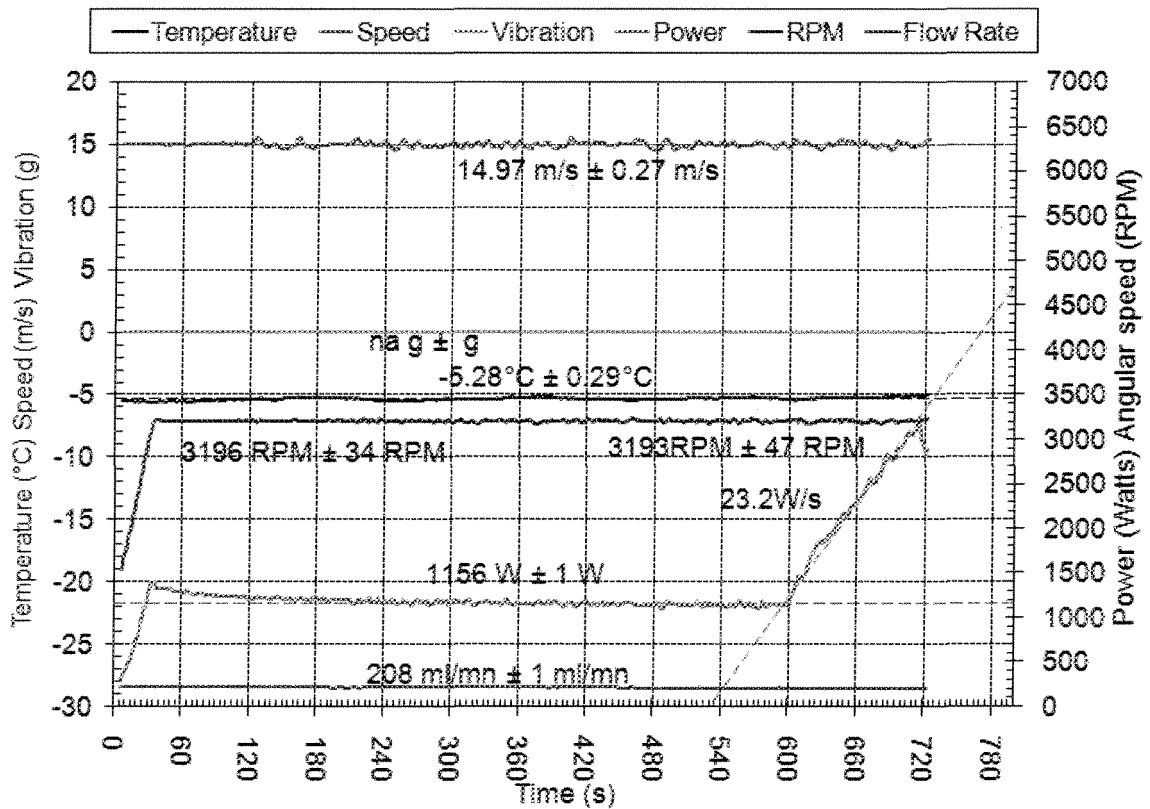


Figure 4-1: Exemple de représentation graphique des données acquises lors d'un essai (SRB-A-089)

4.1.4 Évolution de la température sur la pale

La température de la pale n'est pas mesurée durant l'essai. Celle-ci est inférieure à celle de la soufflerie, car elle est soumise à la convection forcée dans de l'écoulement. Dans le cas du SRB-II, la surface est soumise à la température de l'air de la soufflerie durant, au moins, 10 min, à une vitesse variant entre 15 et 131 m/s. La température de surface a donc été considérée égale à la température de l'air dans la soufflerie. D'autre part, dès le début de la précipitation, la température de surface de l'accrétion change. En effet, l'eau surfondue

lorsqu'elle se solidifie, libère l'énergie dite de solidification, et, par conséquent, augmente la température de l'accrétion par rapport à la température de l'air. Pour pouvoir déterminer la température de la surface d'accrétion à chaque instant, il faudrait utiliser un programme de simulation numérique. Ainsi, les codes de calcul tels que LEWICE de la NASA, CIRA-LIMA réalisée conjointement par le LIMA et le CIRA ou CANICE par l'Université de Montréal sont nécessaires pour déterminer la température de la surface d'accrétion à un instant t de la précipitation. Cependant en observant la glace, il est possible d'avoir un ordre d'idée de la température de la couche de glace sur laquelle se sont accrétées les gouttelettes.

4.1.5 L'arrêt de l'essai

L'essai est arrêté lorsque la glace d'au moins une pale se détache. La glace détachée va percuter les parois de la soufflerie entraînant un fort bruit de choc. Le débalancement du rotor entraîne aussi un bruit de vibration et à l'écran la puissance consommée par le moteur électrique entraînant le rotor chute brusquement en raison du déglacage de la pale. Lorsque cet événement se produit, l'opérateur arrête l'essai manuellement: l'alimentation du moteur électrique est coupée, le ventilateur de la soufflerie s'arrête tout comme l'alimentation en air des gicleurs. La vitesse de rotation du rotor décroît rapidement jusqu'à l'arrêt total.

Ensuite, l'opérateur photographie la pale, mesure les épaisseurs et la longueur de glace décrochée puis pèse les pales.

4.1.6 Calculs relatifs à l'essai

Les résultats sont saisis dans une feuille de calculs Microsoft Excel dont un exemple est présenté à la **Figure 4-2**. Premièrement, cette feuille utilise la température de l'air dans la

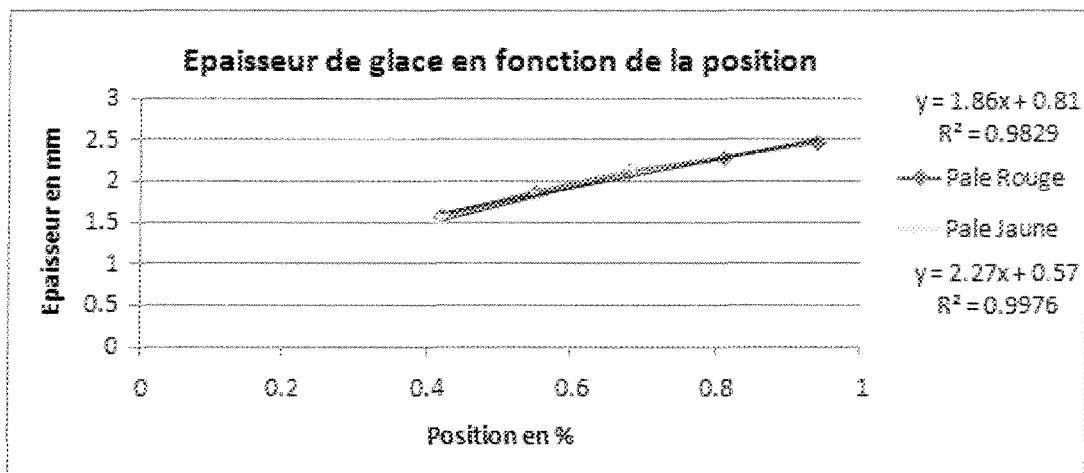
soufflerie mesurée par les capteurs afin de déterminer la valeur de l'angle d'accrétion de la glace qui est utilisé pour approximer: la surface de glace, la valeur de la contrainte limite en traction et enfin la valeur de la masse volumique de la glace accrétée. La vitesse de rotation du rotor est également obtenue via le capteur de vitesse de rotation et retranscrite dans cette page puis utilisée pour le calcul de la masse volumique de la glace accrétée et celui de la force centrifuge. Le tableau des paramètres fixés montre les paramètres utilisés pour le calcul qui restent fixes, excluant l'angle d'accrétion de la glace et la contrainte limite en traction de la glace qui sont fonction de la température. Les cases grises représentent les données mesurées par le manipulateur lors de chaque essai : les épaisseurs mesurées aux différents points de la pale et les deux longueurs de glace décrochée ou longueurs critiques. Une régression linéaire des épaisseurs en fonction de la position sur la pale est effectuée. À partir de cette droite, l'épaisseur moyenne du morceau de glace détaché est approximée. Les valeurs des contributions de la force centrifuge, de la force cohésive et de la surface adhésives sont calculées et affichées dans le tableau du bas. Enfin, les deux dernières cellules affichent les valeurs de l'adhérence des deux pales calculées selon la méthode de l'épaisseur. Dans ce cas, la contrainte de cisaillement pour la pale rouge n'est pas calculée puisque la glace ne s'est pas décrochée de cette pale.

TEST: SRB -0 89

Paramètres moyens mesurés	Valeurs	Unités	Position	Pale Rouge	Pale Jaune
Température de l'air dans la soufflerie	-5.28	°C	%	mm	mm
Vitesse de rotation	334.4	rad/s	0.94	72.10	69.64
			0.81	71.92	69.64
			0.68	71.76	71.76
Masse de la pale et de l'accrétion	g	g	0.55	71.98	71.44
de glace à la fin de l'essai	157.2	153.8	0.42	71.20	71.17

Epaisseur

Paramètres Fixés	Valeurs	Unités	Position	Pale Rouge	Pale Jaune
Rayon du rotor	0.39	m	-	mm	mm
Angle d'accrétion de la glace	1.398	rad	0.94	2.48	0
Diamètre des gouttelettes	0.000026	m	0.81	2.28	0
Abscisse curviligne	0.01	m	0.68	2.12	2.12
Hauteur accretion base	0.005	m	0.55	1.88	1.80
Resistance de rupture de la glace	320000	Pa	0.42	1.56	1.53
			Long Crit.	0	118



	P. Rouge	P. Jaune	Unités
Parametre de densité	321	228	-
Densité de Laforte	910	907	kg/m3
$e = a \cdot x + b$			
a	1.86	2.27	
b	0.81	0.57	
Epaisseur de glace moyenne	2.67	2.16	mm
Contribution			
Force centrifuge	0	146	N
Force cohésive	17.21	11.97	N
Surface adhésive	0.00000	0.00116	m2
Contrainte de cisaillement	0.00	115573	Pa
	0.00	0.118	MPa

Figure 4-2: Feuille de résultat à remplir à la fin de chaque essai

4.2 CARACTERISATION DE LA GLACE ACCRETEE

4.2.1 Formes de la glace

Le premier résultat observable des essais concerne la forme de la glace accrétée sur la pale. La température de l'air dans la soufflerie a une grande influence sur la forme et l'apparence de l'accrétion. À -5°C , la glace obtenue est transparente et l'accrétion est de faible épaisseur. L'accrétion forme une surface plane sur sa partie centrale. Le contour se compose de lignes sinueuses comme le montre la **Figure 4-3**. La figure est en couleur inversée pour une meilleure visibilité de la forme de l'accrétion.



Figure 4-3: Négatif du détail de l'accrétion de glace en soufflerie sur une pale en rotation à -5°C

À -10°C , la glace demeure transparente. Cependant, l'apparition des plumes de givre (*feather*) de part et d'autre de l'accrétion est observée. Le contour est assez semblable à celui que l'on peut observer à -5°C . L'épaisseur de la glace est par ailleurs plus importante comme le montre la **Figure 4-4**. Cette photographie a été réalisée à l'issue d'un essai où l'autre pale s'est déglacée. Les vibrations entraînées par le déglacage ont causé l'apparition

des fissures dans la glace visible sur l'image. Ces fissures apparaissent fréquemment dès le déglacage de l'une des pales, entraînant généralement le déglacage de la seconde.

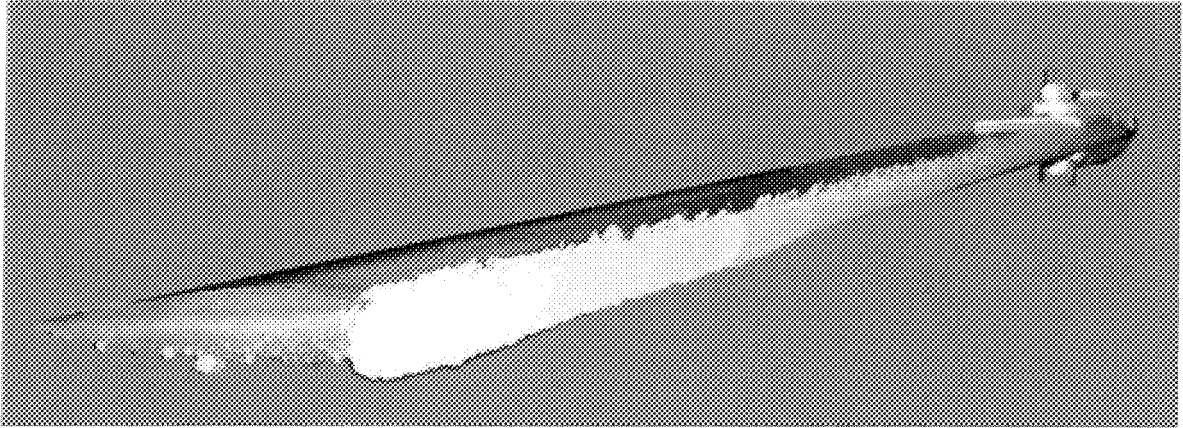


Figure 4-4 : Vue de l'accrétion de glace à -10 °C

À -15°C, la partie de glace accrétée au bord d'attaque reste transparente mais devient néanmoins plus opaque que celle des essais précédents. La tendance trapézoïdale de cette forme accrétée, déjà visible à -10°C se précise et s'affine également. Des stries entre 0,5 et 1 mm apparaissent dans le plan orthogonal à l'accrétion. Étant donné l'angle de calage de 6°, de nombreuses plumes de givre s'accumulent sur l'intrados comme le montre la **Figure 4-5**. A noter qu'au moment du décrochage d'une partie de l'accrétion, ceux-ci demeurent attachés à la pale.

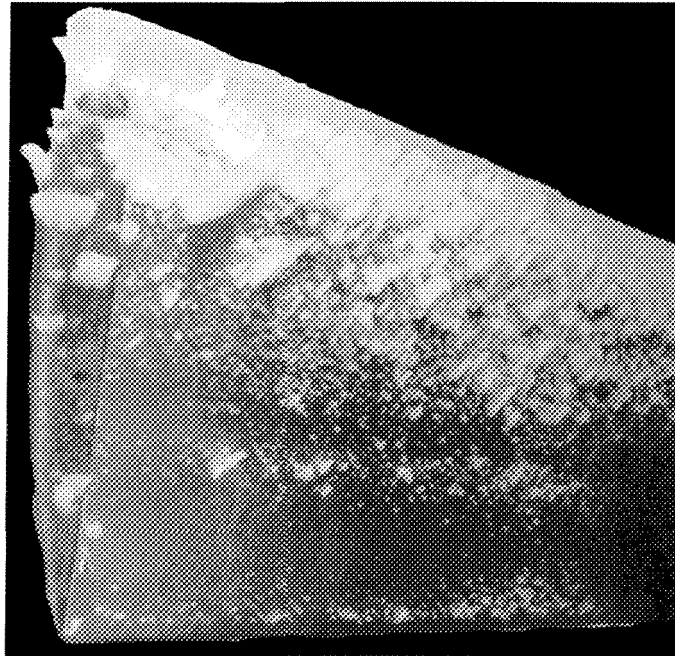


Figure 4-5: Vue du dessous d'une accréation de glace sur une pale à -15°C

À -20°C, la glace apparaît plus opaque encore même si la partie trapézoïdale accrétée depuis le bord d'attaque reste encore légèrement translucide. L'épaisseur de glace accumulée est très importante comme le montre la **Figure 4-6** tout comme la quantité des plumes de givre.

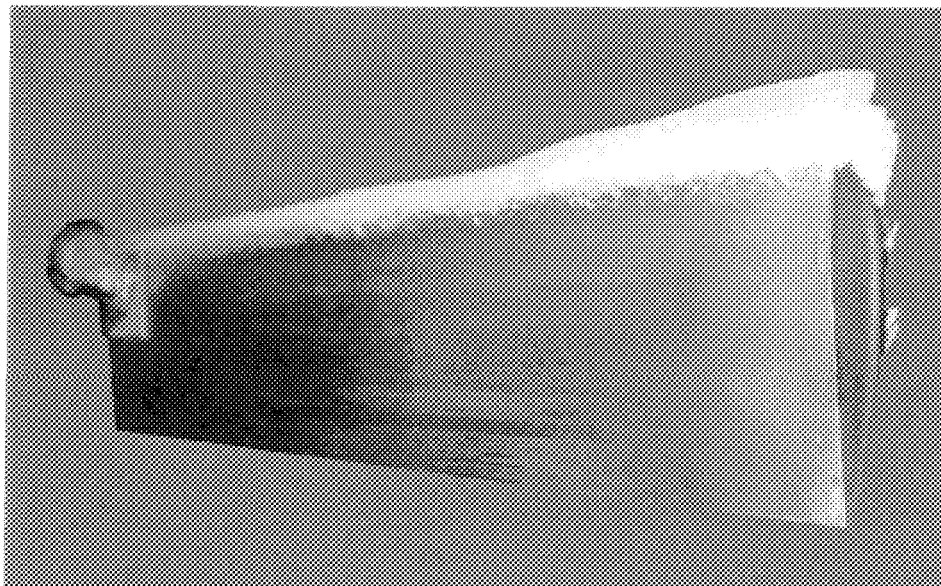


Figure 4-6 : Vue du dessus de l'accrétion de glace à -20 °C

4.2.2 Taille des grains

La taille des grains a été mesurée (paragraphe 2.3.2) afin de déterminer l'influence de la température sur ce paramètre. La taille des grains pourrait être, si la variation de température l'influence, l'une des raisons expliquant les différences observées visuellement concernant l'accrétion de glace. En effet, d'une part, en métallurgie la taille des grains joue un rôle important en modifiant les conditions de rupture du matériau, ainsi dans ce cas-ci, une taille de grain plus faible pourrait retarder l'instant de la rupture. D'autre part, lors de la formation de la glace, les grains les plus petits pourraient mieux s'ancrer dans les anfractuosités du matériau que ceux de plus grosses tailles. Les résultats consignés dans le **Tableau 4-1** sont représentés graphiquement sur la **Figure 4-7**. Les résultats obtenus pour un minimum de 20 mesures par températures, augmentent avec celle-ci entre -20 et -15 °C

de 66 à 216 μm , et semble présenter un palier entre -5 et -15 $^{\circ}\text{C}$, avec un grain moyen de 210 μm .

Tableau 4-1: Taille des grains à différentes températures

Température ($^{\circ}\text{C}$)	-5	-10	-15	-20
Nombre de mesures	20	40	30	20
Taille moyenne des grains (μm)	242	171	216	66
Écart type (μm)	53	35	117	14

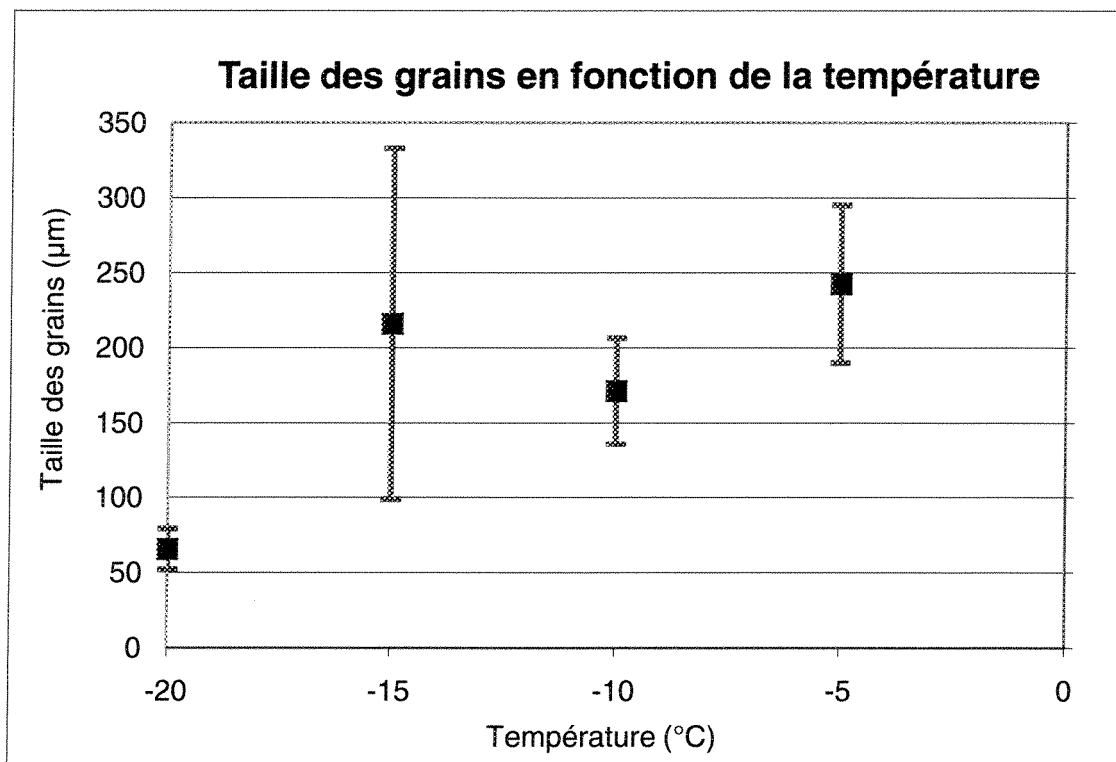


Figure 4-7 : Taille des grains en fonction de la température

4.3 PUISSANCE AU DECROCHAGE

La puissance au décrochage est l'un des paramètres mesurés important puisqu'elle indique à quelle température l'accrétion est la plus dommageable pour le vol d'un hélicoptère. Le fait que la puissance soit plus faible pour la température de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ s'explique par la forme de la glace accrétée. La forme de glace s'affine à mesure que la température baisse. Or, plus la forme de glace est large, plus elle s'oppose à l'écoulement et moins le profil est aérodynamique. La puissance consommée par le rotor augmente donc plus rapidement pour la température de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ que pour celle de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. La **Figure 4-8** représente graphiquement les puissances maximales moyennes obtenues à l'issue des différents essais et résumées dans le **Tableau 4-2**. La disposition des points s'apparente à une équation du second degré. En imposant la puissance au décrochage pour la température de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ égale à $1\,134\text{ W}$, c'est-à-dire la puissance nominale, consommée par le rotor. La courbe de tendance s'approche fortement des points obtenus et présente une corrélation élevée de 87% . Par conséquent, la température entraînant la hausse de consommation de puissance la plus élevée est $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, et celle étant la moins dommageable est à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ceci s'explique par la forme de l'accrétion qui s'éloigne moins du profil de la pale. La hausse de consommation de puissance suit une équation du second degré, pour les paramètres utilisés durant cet essai et des températures comprises entre -5 et $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tableau 4-2: Résultats de la puissance au décrochage pour les différentes températures

Température (°C)	-5	-10	-15	-20
Nombre de mesure	10	8	8	8
Puissance moyenne au décrochage (kW)	3,3	3,9	4,5	4,0
Écart type (kW)	0,6	0,3	0,6	0,5

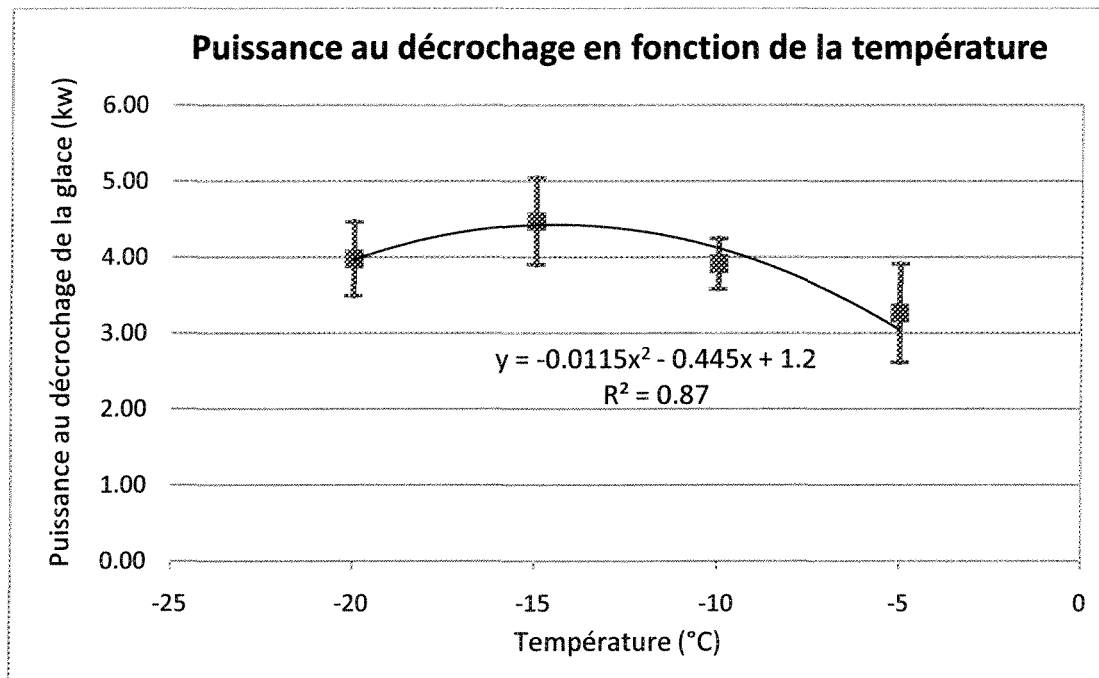


Figure 4-8 : Puissance au décrochage en fonction de la température.

4.4 ADHERENCE DE L'ACCRETION DE GLACE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

Lorsque la masse du dépôt est suffisante, le dépôt se détache de la pale. Afin de calculer l'adhérence de la glace sur la pale, deux paramètres sont importants : la masse de glace

décrochée et la longueur de glace décrochée. Les deux prochaines sections **4.4.1** et **4.4.2** présentent donc ces résultats.

4.4.1 Masse de glace décrochée

La masse de glace décrochée est mesurée avec une balance d'une précision de 0,1 g. Cette mesure n'est possible que si l'accrétion de glace ne se détache que sur une seule pale pour pouvoir faire la différence entre les masses accrétées sur chaque pale que l'on considère égale (la procédure de mesure est détaillée à la section **2.3.2**). Le **Tableau 4-3** résume les valeurs des mesures de la masse de glace décrochée. Les masses de glace décrochées sont représentées graphiquement sur la **Figure 4-9**. Deux paliers apparaissent, l'un entre -5 et -10 °C, d'une valeur d'environ 3.5 g et le suivant entre -15 et -20°C d'une valeur d'environ 4.5 g. La présence de ces paliers pourrait signifier que la masse de glace décrochée en régime humide suit une constante, puis lorsque le régime devient sec, la masse de glace décrochée suit une nouvelle constante. La masse de glace décrochée varierait seulement entre les régimes sec et humide. Cependant, des essais à des températures plus basses seraient nécessaires afin de valider cette hypothèse dans des conditions plus larges.

Tableau 4-3: Mesures des masses de glace décrochée en fonction de la température

Température (°C)	-5	-10	-15	-20
Nombre de mesure	10	6	7	7
Masse de glace décrochée (g)	3,5	3,3	4,3	4,6
Écart type (g)	0,98	0,47	1,22	1,59

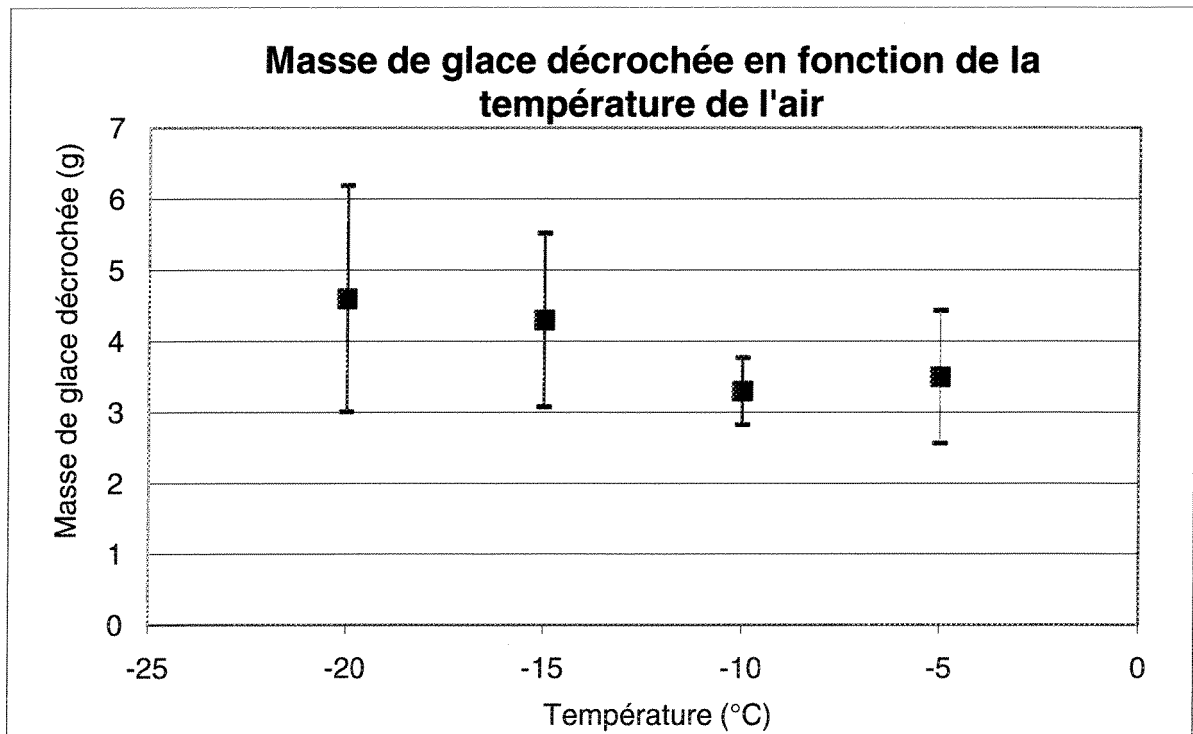


Figure 4-9: Masse de glace décrochée en fonction de la température de l'air

4.4.2 Épaisseur de glace accrétée à 76 % de la pale en fonction de la température

Le **Tableau 4-4** présente les paramètres issus de la mesure des épaisseurs de glace accrétée pour différentes températures. Ces épaisseurs moyennes de glace sont estimées grâce à l'extrapolation des épaisseurs mesurées à différents endroits sur la pale décrite à la **section 3**. La température lors du givrage affecte directement les épaisseurs de glace accrétée à 76 % de la pale. La corrélation linéaire montre que, en imposant une épaisseur nulle à l'origine, c'est-à-dire, l'absence d'accrétion pour la température de 0 °C, alors la corrélation suit très précisément les différentes valeurs mesurées et ceci avec un facteur de corrélation de 0.97 comme le montre la **Figure 4-10**. Ainsi, l'épaisseur de glace accrétée

sur le bord d'attaque d'une pale, à 76 % de son extrémité, est une fonction de la température, ceci pour l'intervalle de température étudiée entre -5 et -20 °C.

Tableau 4-4: Paramètres de la mesure de l'épaisseur de glace accrétée à 76 % de la pale à différentes températures

Température (°C)	-5	-10	-15	-20
Nombre de mesure	36	41	112	34
Épaisseur moyenne (mm)	2,3	3,6	6,3	9,1
Écart type (mm)	0,6	0,9	1,3	2,2

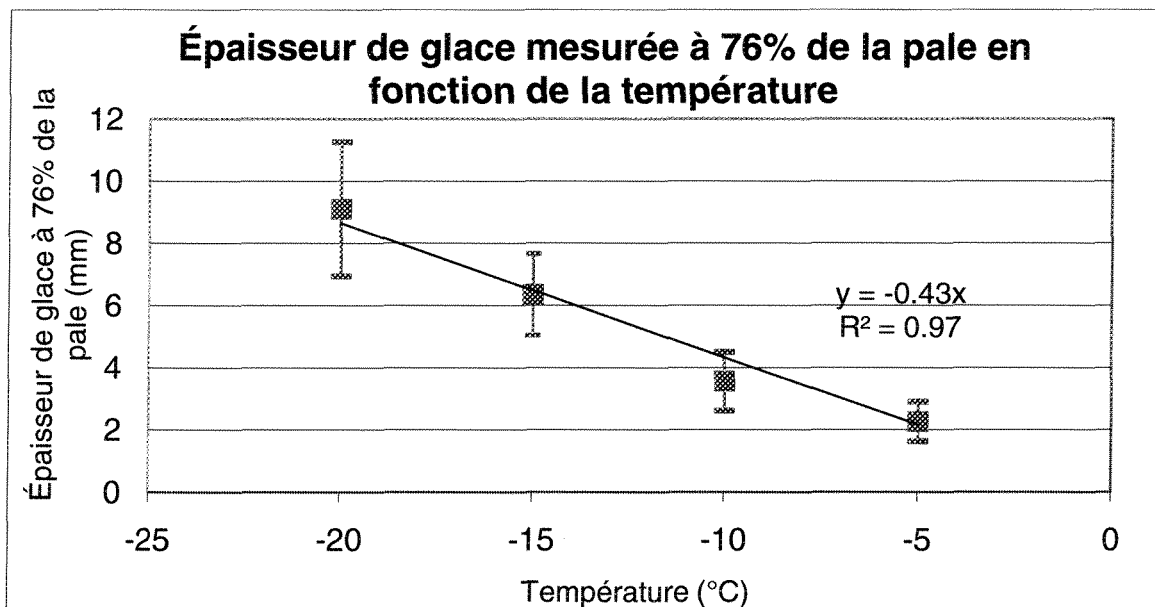


Figure 4-10 : Épaisseur de glace accrétée à 76 % de la pale fonction de la température

4.4.3 Angle d'accrétion en fonction de la température

L'angle d'accrétion de la glace est un paramètre qui a été utilisé pour obtenir des résultats d'adhérence, lorsque les deux pales se sont déglacées. L'angle d'accrétion est utilisé dans l'**Équation 3-10**. Il est obtenu en considérant que l'accrétion de glace se fait de façon symétrique, selon une surface trapézoïdale. L'**Équation 3-11**, du paragraphe 3.2 résume l'obtention de ce paramètre. Le **Tableau 4-5** résume les paramètres obtenus pour la détermination de l'angle d'accrétion moyen. La **Figure 4-11** représente graphiquement ces paramètres. La corrélation linéaire montre que l'angle d'accrétion, tel qu'il a été défini dans ce travail, est fonction de la température, selon un coefficient de corrélation de 0,99. Ainsi, plus la température s'approche de 0°C, plus l'angle d'accrétion augmente. Ces résultats concordent avec l'expérience puisque pour les températures les plus faibles la forme de glace accrétée est plus étroite. Pour les températures plus élevées, la forme de glace est moins trapézoïdale, mais l'angle d'accrétion permet d'extrapoler la masse, en utilisant une forme simple.

Tableau 4-5 : Paramètres de la mesure de l'angle d'accrétion à différentes températures

Température (°C)	-5	-10	-15	-20
Nombre de mesure	8	6	7	6
Angle d'accrétion moyen (°)	73,9	63,3	47,9	29,5
Écart type (°)	7,2	9,4	10,5	5,6

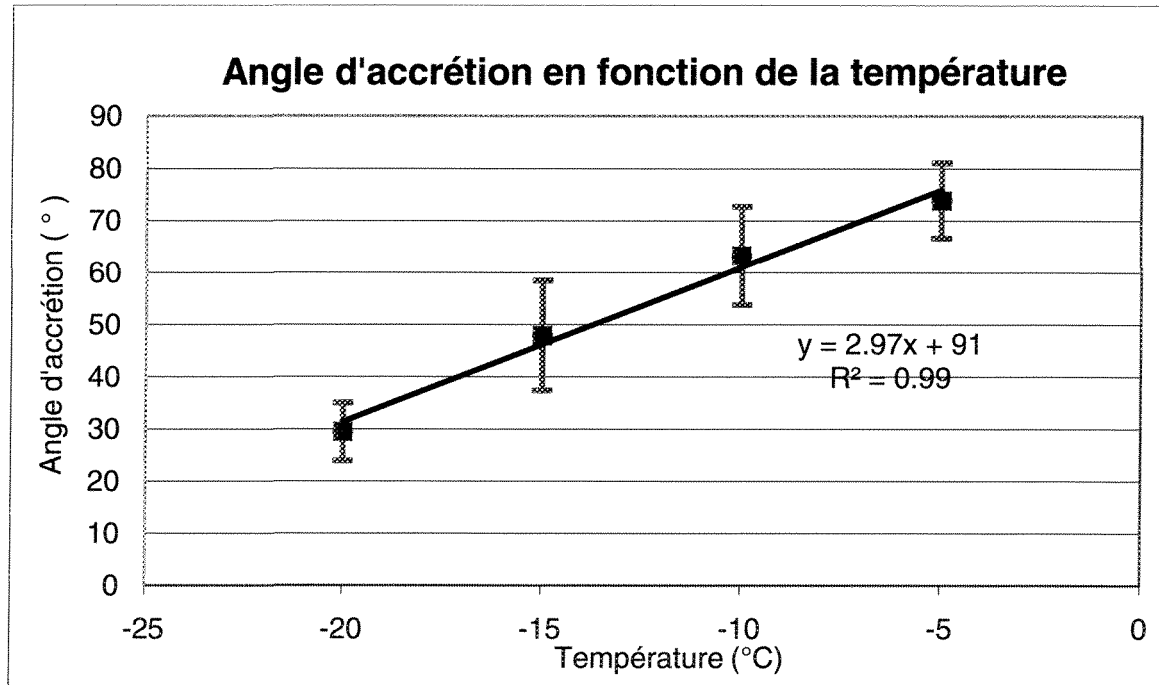


Figure 4-11 : Angle d'accrétion en fonction de la température

4.4.4 Longueur de glace décrochée en fonction de la température

Le **Tableau 4-6** donne les résultats de la longueur de glace décrochée ainsi que les écarts types correspondant pour 4 différentes températures. Il apparaît clairement par la régression linéaire de la **Figure 4-12**, que la température est un facteur important dans la distribution des longueurs. Les longueurs moyennes décrochées apparaissent comme étant une fonction quasi parfaite de la température avec un facteur de corrélation de 0,97. De plus, le **Tableau 4-5** montre que l'écart type des résultats est satisfaisant avec des valeurs comprises entre 11 et 36 %. Donc, plus le givrage se produit à faible température, plus le morceau de glace qui se détache est de faible longueur.

Tableau 4-6 : Paramètres de mesure de la longueur de glace décrochée à différentes températures de l'air

Température (°C)	-5	-10	-15	-20
Nombre de mesures	14	11	14	14
Longueur moyenne de glace décrochée (mm)	136	99	62	39
Écart type (mm)	36	12	15	14

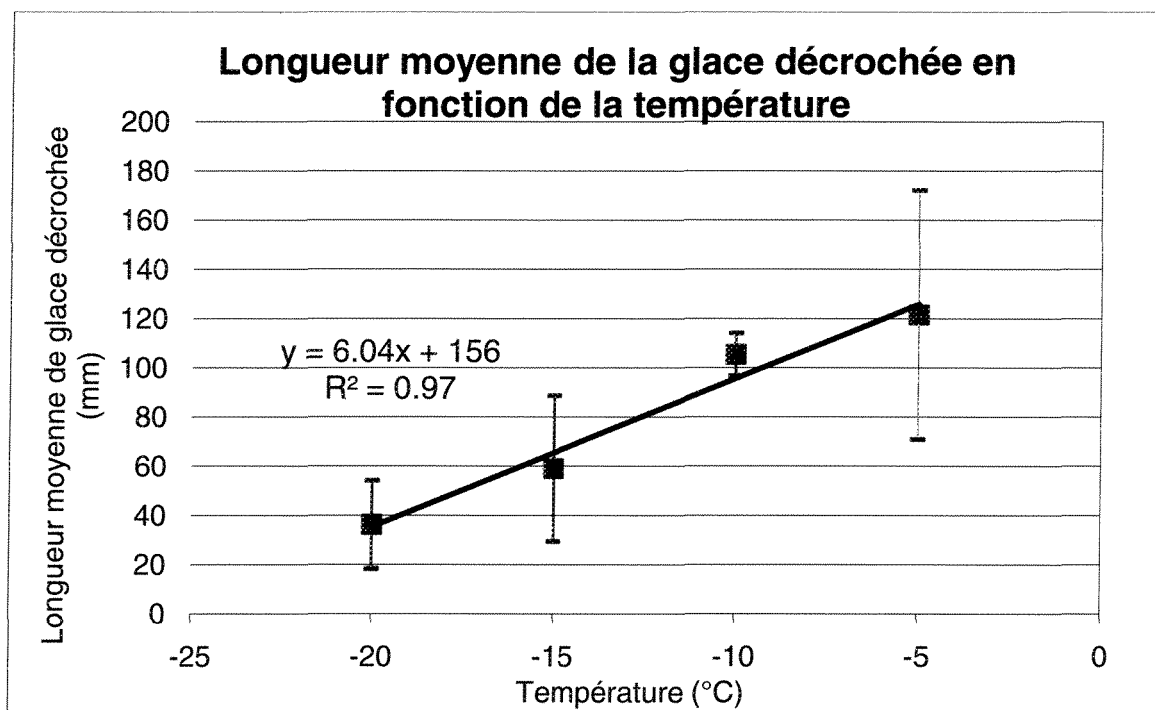


Figure 4-12: Longueur moyenne de glace décrochée pour différentes températures

Ainsi, d'après les résultats présentés dans cette section, la longueur de glace décrochée est une fonction croissante de la température.

4.4.5 Valeurs d'adhérence obtenues à différentes températures

Le but final de cette étude, comme énoncé dans le premier chapitre de ce travail, est l'obtention de la valeur de l'adhérence de la glace sur la pale du modèle réduit utilisé durant ces essais. Les différentes valeurs mesurées pour l'obtention de la contrainte de cisaillement tant par la méthode de la masse (première colonne) que par la méthode de l'épaisseur (troisième colonne) sont résumées aux **Tableau 4-7**. Ces valeurs sont représentées graphiquement dans la **Figure 4-13**. Il apparaît sur le graphique qu'à la température de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'écart type est le plus important. Cette augmentation de l'écart type est due à la faible longueur moyenne de glace décrochée à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, conséquemment, l'écart type de la longueur moyenne de glace décrochée à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ représente 35 % de la valeur moyenne d'où, un écart type plus élevé pour la contrainte de cisaillement à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les deux méthodes semblent être fonction de la température avec des coefficients de corrélation de 0,99 pour la méthode de la masse et de 0,97 pour la méthode de l'épaisseur. Il apparaît également que les résultats selon les deux méthodes sont très similaires. Par contre, la méthode de la masse semble être plus précise puisque l'écart type de celle-ci est toujours inférieur ou égal à celui de la méthode de la masse.

Tableau 4-7: Résultats de la valeur de l'adhérence pour les différentes températures mesurées selon la méthode utilisée

Température (°C)	Méthode de la masse		Méthode de l'épaisseur	
	Contrainte de cisaillement (MPa)	Écart type (MPa)	Contrainte de cisaillement (MPa)	Écart type (MPa)
-5	0,10	0,04	0,09	0,06
-10	0,13	0,03	0,14	0,03
-15	0,19	0,04	0,20	0,06
-20	0,23	0,07	0,23	0,10

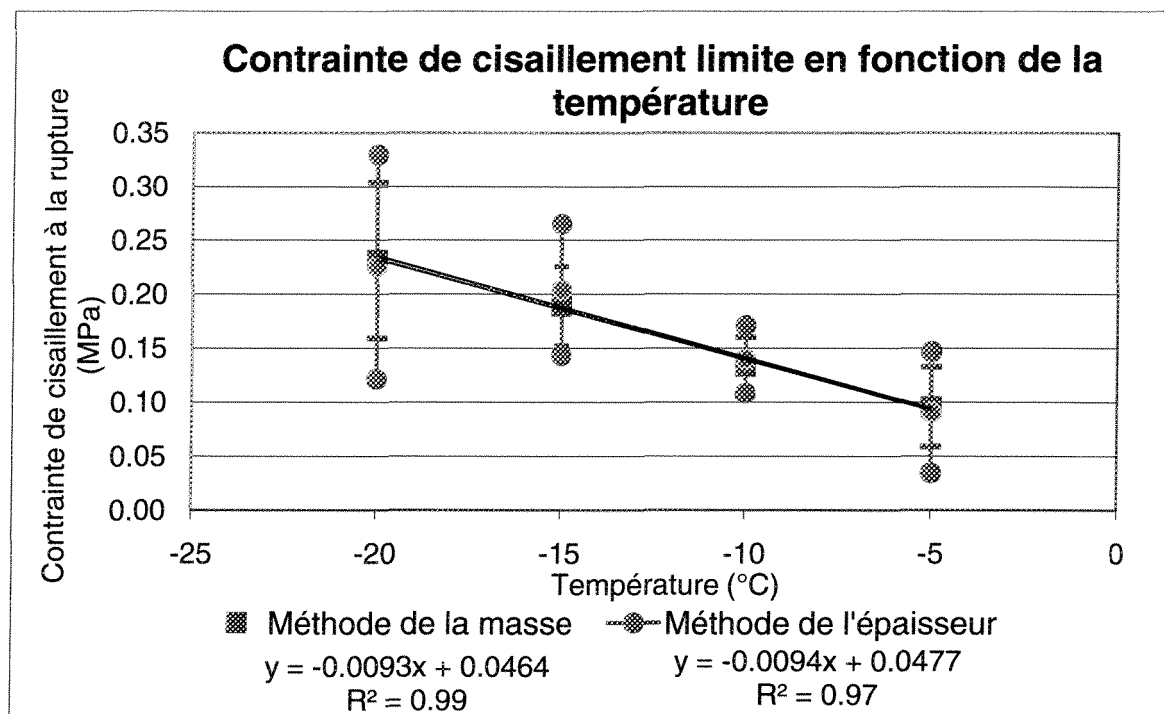


Figure 4-13 : Contrainte de cisaillement et écart type obtenus selon les différentes méthodes en fonction de la température

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5. DISCUSSION

5.1 REPRODUCTIBILITE DES PARAMETRES EXPERIMENTAUX

5.1.1 Répartition des essais

Les mesures et les résultats présentés dans ce mémoire sont issus des 147 essais réalisés dans les conditions standards précisées précédemment. Parmi ces 147 essais, 121 essais ont été réalisés pour mesurer l'adhérence, 19 l'ont été pour mesurer la taille des grains et 7 l'ont été pour observer l'efficacité de revêtements antigivre appliqués sur la pale. Le **Tableau 5-1** résume la répartition des essais pour chaque température.

Tableau 5-1 : Nombre d'essais réalisé pour les différentes mesures

Température (°C)	-5	-10	-15	-20
Nombre d'essais pour la mesure de l'adhérence	23	21	56	17
Nombre d'essais pour la mesure de la taille des grains	5	3	6	5

Le nombre de mesures effectuées à -15 °C est plus élevé qu'aux autres températures. En effet, cette température a été choisie pour observer la distribution des longueurs de glace décrochée et des épaisseurs de glace mesurées à 76 % de la pale. Ces mesures doivent permettre de vérifier si les distributions suivent une loi probabiliste.

5.1.2 Longueurs de glace décrochée à -15 °C

La répartition des longueurs de glace décrochée est résumée dans le **Tableau 5-2**. Pour les 56 essais réalisés à -15 °C, 81 mesures de longueurs de glace décrochée ont été effectuées.

La distribution des fréquences d'apparition des longueurs de glace décrochée correspond à une loi normale, de 59,2 mm moyenne et de 18,7 mm d'écart type. La distribution est représentée à la **Figure 5-1**. La loi normale comprend différentes propriétés : afin de savoir si notre distribution correspond à la loi normale, il faut vérifier si les valeurs mesurées par le SRB-II vérifient les propriétés de la loi normale. Les deux propriétés de la loi normale dont il serait judicieux de vérifier la validité sont décrites par les **Équation 5-1** et **Équation 5-2**. L'**Équation 5-1** signifie que dans le cas de la loi normale, la probabilité qu'un événement situé à plus ou moins l'écart type (σ_p) de la moyenne (μ_p), est de 68%. L'**Équation 5-2** signifie que la probabilité qu'un événement se situe à plus ou moins deux fois l'écart type de la moyenne, est de 95 %. Si les données issues des essais sur le SRB-II correspondent à ces proportions alors, les proportions seront respectées, outre la ressemblance visuelle.

$$P(\mu - \sigma_p \ll X_p \ll \mu + \sigma_p) \approx 0,68 \quad \text{Équation 5-1}$$

$$P(\mu - 2\sigma_p \ll X_p \ll \mu + 2\sigma_p) \approx 0,95 \quad \text{Équation 5-2}$$

La proportion des longueurs de glace décrochée à -15 °C, est de 65 %, selon l'**Équation 5-1** et de 99 % selon l'**Équation 5-2**. Ainsi, les différences de proportions étant faibles, la distribution des longueurs de glace décrochée à -15 °C correspond effectivement à une distribution normale.

Tableau 5-2 : Fréquence d'apparition des longueurs de glace décrochée à -15 °C comparées à la loi normale.

Longueur de glace décrochée (mm)	Fréquence d'apparition	Pourcentage (%)	Loi normale (%)
10	0	0,0	0,9
20	0	0,0	2,8
30	3	3,7	7,0
40	13	16,0	13,1
50	12	14,8	18,8
60	17	21,0	20,7
70	14	17,3	17,3
80	9	11,1	11,1
90	9	11,1	5,5
100	3	3,7	2,0
110	1	1,2	0,6
120	0	0,0	0,1
Total	81	100	100

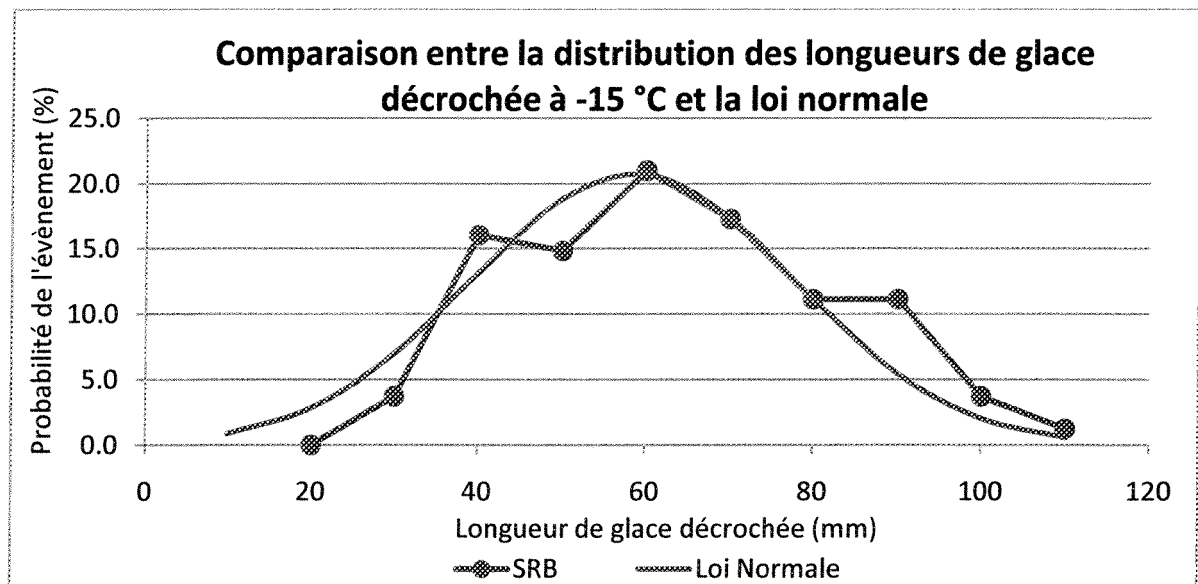


Figure 5-1 : Comparaison entre les fréquences d'apparition des longueurs de glace décrochée et la loi normale

5.1.3 Épaisseurs de glace accrétée à -15 °C, à 76 % de la pale

Systématiquement mesurées ou rapidement approximables, les épaisseurs de glace représentent l'autre donnée analysées. Ainsi, pour les 56 essais réalisés à -15 °C, la moyenne des 112 valeurs (une pour chaque pale) de l'épaisseur de glace accrétée à 76 % de la pale est de 6,3 mm avec un écart type de 1,3 mm, soit environ 21 %. La comparaison entre les valeurs mesurées et la loi normale permet de vérifier si les distributions observées sur le SRB-II correspondent à une distribution probabiliste connue. La comparaison avec la loi normale est visuellement satisfaisante et les propriétés de cette loi mentionnées précédemment, sont de 69 % pour l'**Équation 5-1** et de 96 % pour l'**Équation 5-2**.

L'observation des distributions des longueurs de glace décrochée et des épaisseurs de glace accrétée à 76 % de la pale permettent d'affirmer que les résultats du SRB-II suivent la loi normale. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'effectuer autant d'essais pour les autres températures, puisque ceux-ci sont reproductibles avec des écarts types inférieurs ou égaux à 30 %.

Tableau 5-3 : Fréquence d'apparition des épaisseurs de glace mesurées à -15 °C à 76 % de la pale comparée à la loi normale.

Épaisseur de glace accrétée à 76 % de la pale (mm)	Fréquence d'apparition	Pourcentage (%)	Loi normale (%)
3	0	0,0	0,8
3.5	0	0,0	1,9
4	0	0,0	3,7
4.5	8	7,1	6,4
5	9	8,0	9,8
5.5	19	17,0	12,9
6	15	13,4	14,9
6.5	12	10,7	15,0
7	15	13,4	13,2
7.5	10	8,9	10,1
8	10	8,9	6,7
8.5	7	6,3	3,9
9	2	1,8	2,0
9.5	3	2,7	0,9
10	2	1,8	0,3
10.5	0	0,0	0,1
Total	112	100	100

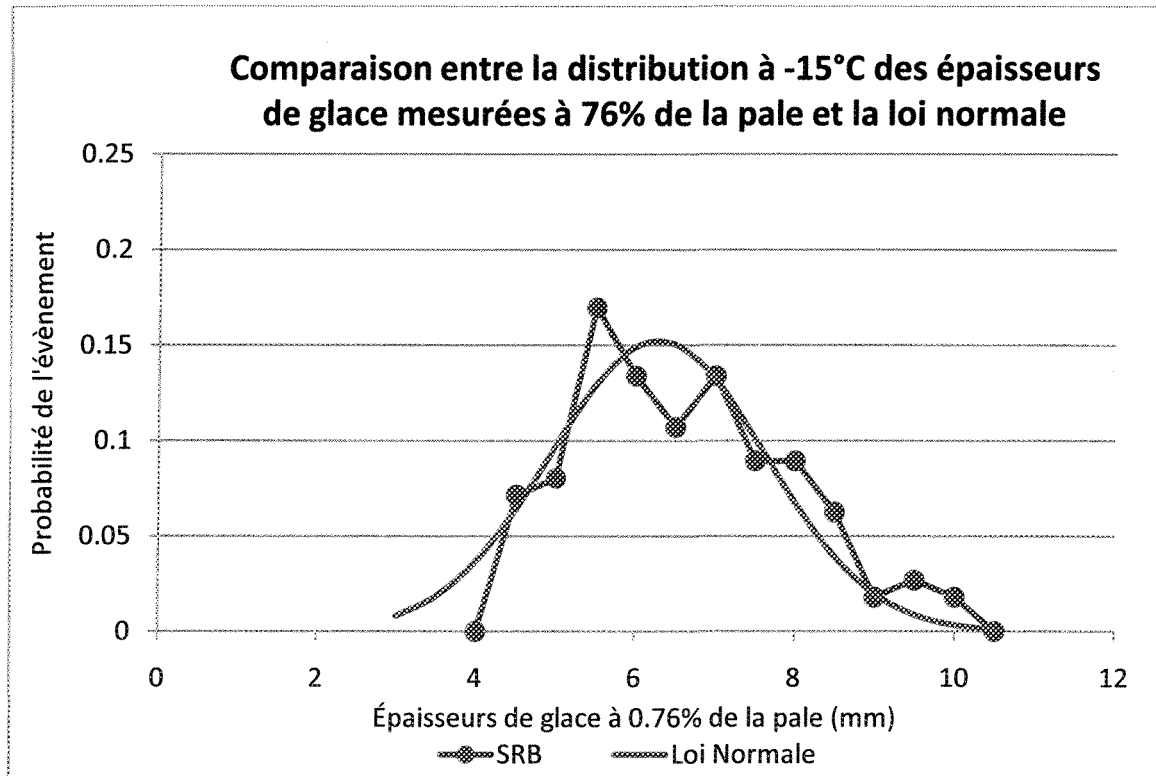


Figure 5-2 : Comparaison entre les fréquences d'apparition des épaisseurs de glace accrétée à -15 C à 76 % de la pale et la loi normale

5.2 EFFET DE LA TEMPERATURE

5.2.1 Forme et épaisseur de glace accrétée en fonction de la température

Comme vu au **chapitre 4**, la température est un facteur important de l'accrétion de glace, dans la mesure où elle modifie le régime de l'accrétion. Les températures élevées entraînent l'apparition de verglas et les températures plus froides, l'apparition de givre.

En 1986, D. P. Guffond remarque que la forme de l'accrétion de glace sur une pale en rotation n'est pas significativement différente de la forme de l'accrétion de glace sur une

pale fixe (D.P. Guffond, 1986). En 2004, D. N. Anderson a étudié, pour la NASA, l'influence des différents paramètres de l'accrétion sur pale fixe de profil NACA 0012. Cette étude a été réalisée pour la mise à l'échelle des accrétions de glace sur les pales. Les résultats qu'il a obtenus pour différentes températures peuvent être comparés aux formes de glace accrétée observées sur le SRB-II. Les conditions d'obtention des formes de glace accrétée sont résumées dans les tableaux précédents les figures. Ces figures représentent la portion de la pale affectée par l'accrétion de glace. Les unités des axes correspondent, en abscisse, à la position horizontale des points mesurés, puis divisés par la corde de la pale et, en ordonnée, à la position verticale des points mesurés, puis divisés par la corde de la pale. Cependant, la comparaison ne peut être parfaite pour plusieurs raisons. Tout d'abord, dans le cas du SRB-II, c'est le décrochage de glace qui était à l'étude. Par conséquent, les durées des essais n'ont pas été choisies en fonction de la mise à l'échelle. Ainsi, pour que les essais puissent être comparés de façon précise, il aurait fallu ajuster les durées d'essais aux dimensions de la pale. En effet, pour comparer les formes d'accrétion, Anderson compare des pales de différentes dimensions en faisant varier les durées d'essais. De plus, dans le cas du SRB-II, l'angle d'attaque de la pale est de 6° , alors que les pales utilisées par Anderson ont un angle d'attaque nul. Cette différence modifie la position où le coefficient de collection est maximal et, par conséquent, modifie les épaisseurs accrétées. Ces deux différences modifient les formes d'accrétion, mais compte tenu des variations de formes observées avec le facteur température, il est possible de dégager une tendance générale aux formes obtenues.

Le **Tableau 5-4** résume les paramètres utilisés pour obtenir les figures ci-dessous. La pale utilisée par Anderson durant cet essai est 7,7 fois plus grande que la pale du SRB-II. La température et la vitesse de l'air sont sensiblement identiques. Le temps d'exposition de la pale durant l'essai d'Anderson est 4,8 fois supérieur au temps d'exposition de la pale du SRB-II. En raison de l'angle d'attaque de 6°, une importante accréation de glace est formée sur l'intrados du SRB-II. Mis à part cette différence d'orientation, les formes accrétées sont assez semblables, avec une forme évasée et une épaisseur faible se situant dans les 2,5% autour de la pale. Se situant aux alentours de 5, les rapports entre les durées d'exposition et les épaisseurs accrétées sont quasi semblables.

Tableau 5-4 : Comparaison des conditions utilisée en soufflerie par Anderson et pour le SRB-II à – 5°C

Paramètres	Unités	Anderson (2004) (a)	SRB-A-130 (b)
Corde	mm	533,40	69,64
Température	°C	-6	-5
Vitesse de l'air par rapport à la surface	m/s	67,01	72,04
Taille des gouttelettes	µm	40	26
Teneur en eau dans l'écoulement	g/m ³	0,65	0,80
Angle d'attaque	°	0	6
Durée	s	672	139
Épaisseur	mm	10,6	2,1

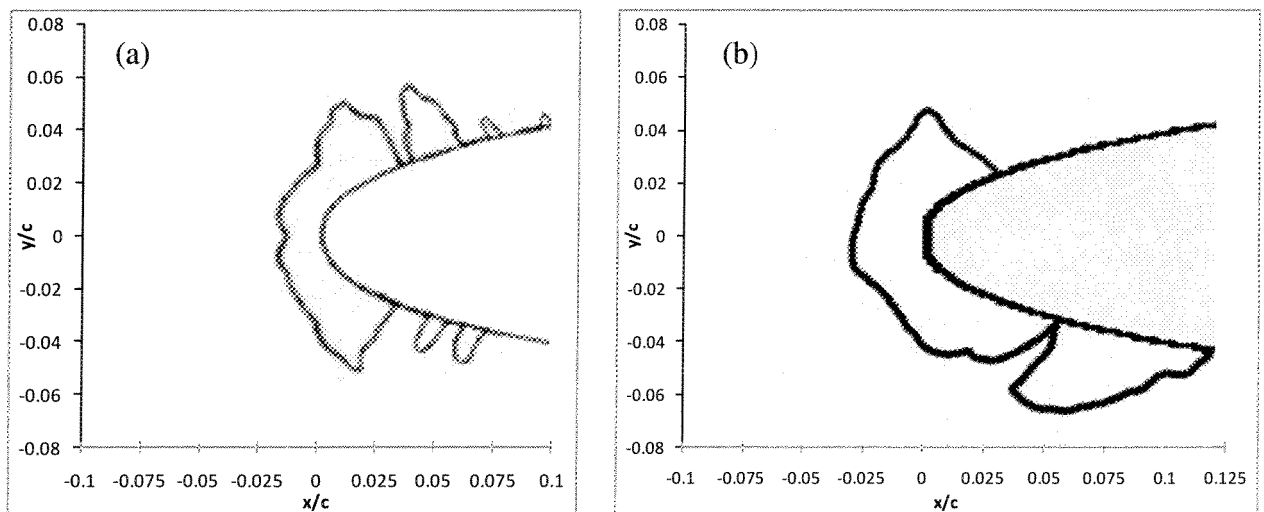


Figure 5-3 : Comparaison entre les formes d'accrétions obtenues par Anderson et pour le SRB-II à -5°C

La comparaison entre les formes suivantes, représentées sur la **Figure 5-4**, diffère un peu plus, en raison de la non-symétrie du SRB-II et de la différence de dimension entre les deux pales. Les petites dimensions de la pale du SRB-II (b), rappelées dans le **Tableau 5-5**, font que les gouttelettes d'eau surfondues ne gelant pas intégralement à l'impact vont modifier la forme de l'accrétion de façon plus significative que sur une pale près de 8 fois plus grande. La vitesse supérieure utilisée durant l'essai du SRB-II favorise la dispersion des gouttelettes sur la surface d'accrétion. De plus, la taille inférieure des gouttelettes utilisées pour l'essai du SRB-II permet de penser que celles-ci gèleront plus rapidement après l'impact. Ceci expliquerait pourquoi la forme obtenue sur la pale (b) est plus massive. Dans ce cas-ci, l'épaisseur de glace accrétée sur la pale utilisée par Anderson (a) est 5 fois supérieure à celle obtenue sur la pale (b), alors que la durée d'exposition est 3 fois supérieure pour la pale (a). La différence dans les épaisseurs s'explique par la forme

massive, dans le cas du SRB-II. Il y a donc moins de glace sur le bord d'attaque puisque l'eau s'en écoule de part et d'autre.

Tableau 5-5 : Comparaison des conditions utilisée en soufflerie par Anderson et pour le SRB-II à -10°C

Paramètres	Unités	Anderson (2004) (a)	SRB A-113 (b)
Corde	mm	533,40	69,64
Température	$^{\circ}\text{C}$	-10	-10
Vitesse de l'air	m/s	67,01	105,56
Taille des gouttelettes	μm	38	26
Teneur en eau dans l'écoulement	g/m^3	1,00	0,80
Angle d'attaque	$^{\circ}$	0	6
Durée	s	438	156
Épaisseur	mm	10,6	2,0

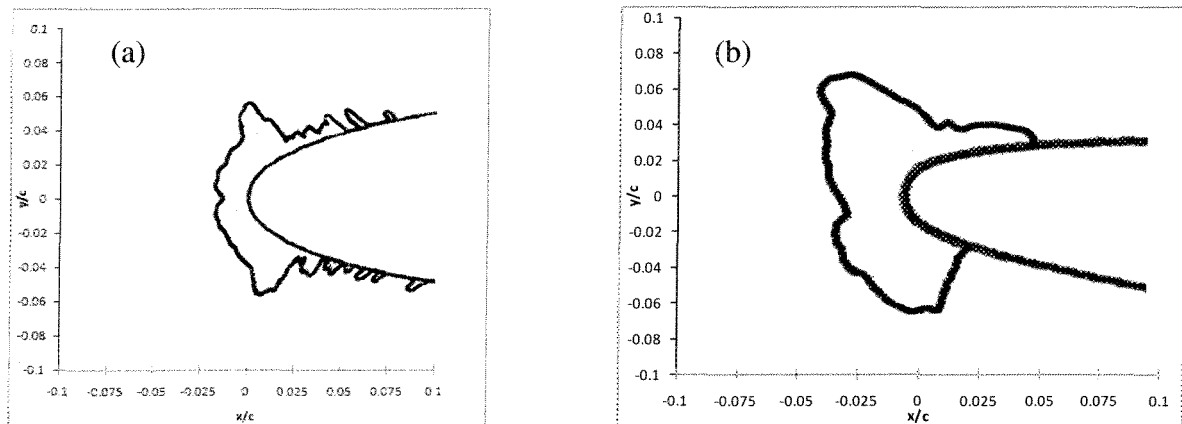


Figure 5-4 : Comparaison entre les formes d'accrétions obtenues par Anderson et pour le SRB-II à -10°C

La comparaison entre les deux accrétions suivantes présente de nombreuses similarités. En effet, les deux accrétions sont formées d'importantes cornes de part et d'autre du point de stagnation. L'accrétion sur la pale du SRB-II (b) est très importante comparativement aux dimensions de la pale. Dans ce cas-ci, les temps d'accrétion sont quasi identiques, 156 s pour la pale (a) et 180 s pour la pale (b). Malgré l'exposition plus courte de la pale (a), son épaisseur reste 1,3 fois supérieure à celle de la pale (b). Cette différence peut venir de plusieurs facteurs. D'une part, la teneur en eau liquide étant plus importante dans le cas de la pale (a), cette différence de 20 % reportée sur la pale (b) lui ferait atteindre une épaisseur de 14 mm. D'autre part, l'angle d'attaque de 6° modifie la forme de l'accrétion et, comme on peut le voir sur la **Figure 5-5**, alors que la pale (a) présente un profil symétrique avec deux cornes très nettes, la pale (b), elle, ne croît pas de façon symétrique, mais avec une prédominance sur la corne de l'intrados.

Tableau 5-6 : Comparaison des conditions utilisée en soufflerie par Anderson et pour le SRB-II à – 15°C

Paramètres	Unités	Anderson (2004) (a)	SRB-A-013 (b)
Corde	mm	304,8	69,64
Température	°C	-15	-15
Vitesse de l'air	m/s	120,71	127,34
Taille des gouttelettes	µm	26	26
Teneur en eau dans l'écoulement	g/m ³	0,96	0,80
Angle d'attaque	°	0	6
Durée	s	156	180
Épaisseur	mm	15,2	11,7

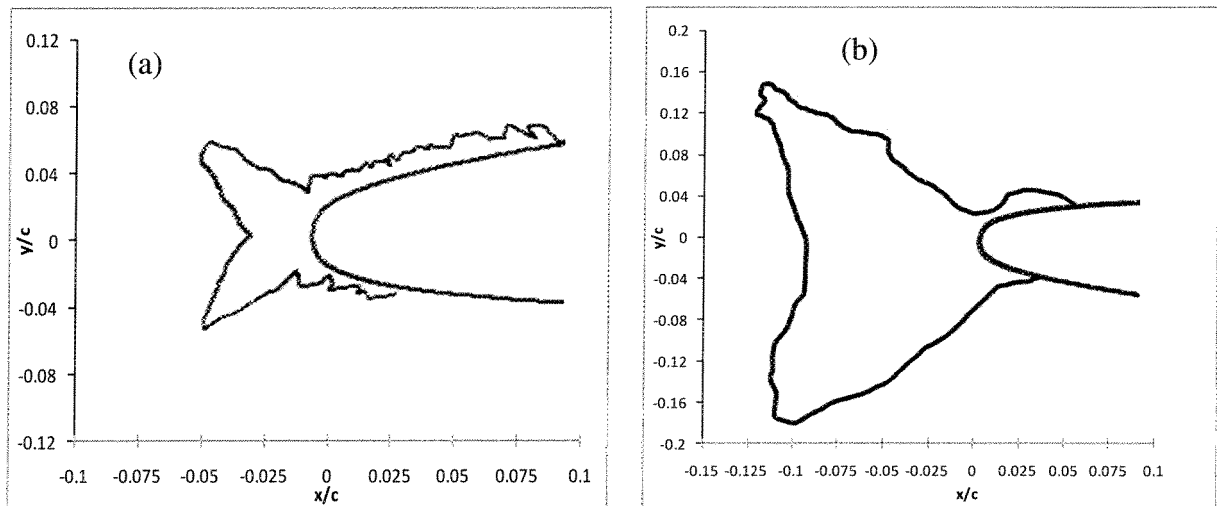


Figure 5-5 : Comparaison entre les formes d'accrétions obtenues par Anderson et pour le SRB-II à -15°C

Les deux profils obtenus à -20°C l'ont été pour des conditions quasiment similaires, excepté pour l'angle d'attaque, comme le montre le **Tableau 5-7**. Cependant, les épaisseurs obtenues varient très fortement d'un cas à l'autre, malgré les durées de précipitation assez semblables. La **Figure 5-8**, montrant les deux accrétions, explique cette différence. En effet, la glace accumulée sur la pale (a) est symétrique et augmente selon l'axe de la pale. Dans le cas du SRB-II, une grande partie de l'accrétion s'effectue sur l'intrados. Par conséquent, la glace accrétée sur l'intrados n'augmente pas l'épaisseur de la glace selon l'axe de la pale.

Il apparaît également qu'à cette température, le régime est devenu sec. L'accrétion correspond à un empilement de gouttelettes qui ont gelé instantanément les unes par-dessus les autres. Cette constatation peut être faite en considérant l'absence de corne sur les profils accrétés.

Tableau 5-7 : Comparaison des conditions utilisée en soufflerie par Anderson et pour le SRB-II à – 20 °C

Paramètres	Unités	Anderson (2004)	SRB-A-121
Corde	mm	266,70	69,64
Température	°C	-20	-20
Vitesse de l'air	m/s	76,04	72,05
Taille des gouttelettes	µm	28	26
Teneur en eau dans l'écoulement	g/m ³	0,81	0,80
Angle d'attaque	°	0	6
Durée	s	222	254
Épaisseur	mm	13,3	6,3

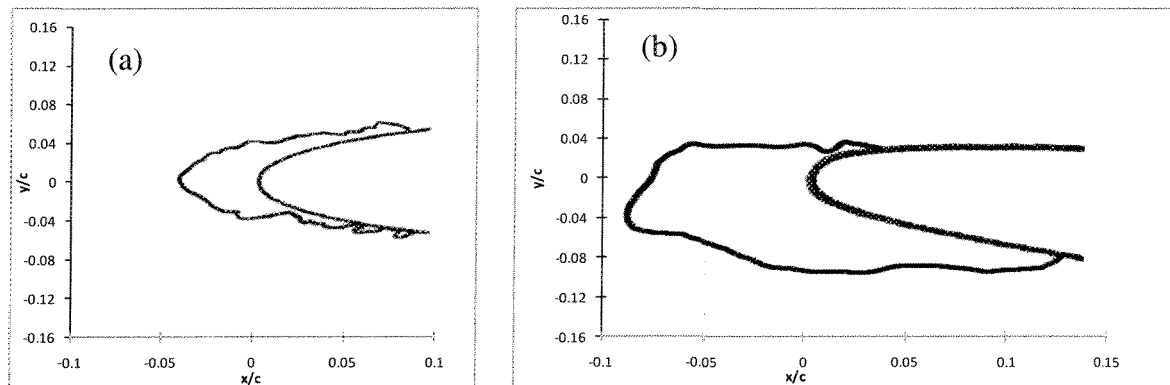


Figure 5-6 : Comparaison entre les formes d'accrétions obtenues par Anderson et pour le SRB-II à – 20 °C

Cette comparaison entre les résultats du SRB-II et ceux obtenus par Anderson montre que les formes accrétées sont semblables, en prenant en considération les différences lors de l'accrétion. En effet, Anderson (Anderson, 2003) a défini le terme d'accumulation A_c . Il est représenté par l'Équation 5-3 ou U_s correspond à la vitesse de l'air par rapport à la surface

d'accrétion, L_{wc} à la teneur en eau liquide dans l'écoulement, t à la durée d'accrétion, ρ à la densité de la glace, et c à la corde de la pale.

$$A_c = \frac{U_s \cdot L_{wc} \cdot \frac{t}{60}}{2,0,158 \cdot \frac{c}{10} \cdot \rho} \quad \text{Équation 5-3}$$

Ainsi le **Tableau 5-8** résume les termes d'accumulation définis par Anderson pour les différents essais comparés ci-dessus.

Tableau 5-8 : Comparaison des termes d'accumulation entre le SRB-II et les résultats d'Anderson

Température	Terme d'accumulation		Rapport
	Anderson	SRB-II	SRB-II/ Anderson
-5 °C	0,32	0,67	2,10
-10 °C	0,32	1,11	3,43
-15 °C	0,35	1,55	4,43
-20 °C	0,31	1,28	4,13

Il apparaît que les termes d'accumulation sont très différents. Cette différence est due aux durées d'accrétion trop élevées au regard des dimensions des pales. En effet, le SRB-II a été conçu pour étudier le déglacage d'une pale en rotation afin de mesurer la valeur de l'adhérence de la glace sur le substrat, contrairement à Anderson qui étudie la forme et la mise à l'échelle de l'accrétion. Cependant, la comparaison entre les formes de glace accrétée sur le SRB-II et celles d'Anderson permet de penser que la mise à l'échelle

réalisée par le SRB-II est satisfaisante. Afin de s'assurer de cela, il serait intéressant d'effectuer une série d'essais avec un angle d'attaque nul et une durée de givrage inférieure, proportionnelle aux dimensions du SRB-II.

5.2.2 Masse et longueur de glace décrochée en fonction de la température

La masse de glace décrochée est très peu présente dans la littérature pour différentes raisons. Tout d'abord, l'étude du décrochement de la glace ne s'intéresse pas vraiment à la masse de glace qui s'est décrochée. Ensuite, la masse de glace décrochée n'est pas une valeur pertinente pour des publications puisqu'elle est fonction des dimensions. Or, les publications tendent à montrer des résultats aussi adimensionnels que possible. Enfin, la mesure de l'adhérence en utilisant la masse du dépôt de glace détachée n'a pas été utilisée par d'autres auteurs.

De même que la masse de glace décrochée, les longueurs de glace décrochée, sont peu présentes dans la littérature, puisque cette méthode d'évaluation de la valeur de l'adhérence est nouvelle. Guffond remarque que pour des températures supérieures à -3°C , l'accrétion de glace est inexistante. À -5°C , l'accrétion est un fin film de glace et le décrochage apparaît systématiquement sur l'essentielle de la pale.

5.2.3 Taille des grains de glace en fonction de la température

Les résultats pour les températures -5°C et -10°C sont proches des résultats obtenus par Laforte et Nguyen (Laforte et Nguyen, 1985), comme le montre la **Figure 5-7**. Il est possible que la taille des grains suivent un palier tant que l'accrétion se fait en régime

humide, et que passé la température de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, le régime devient solide, conduisant à une réduction significatives de la taille des grains. En effet, la taille des grains est fonction du taux de solidification, et celui-ci reste constant tant que le régime d'accrétion est humide. Pour conclure, concernant la taille des grains, il serait nécessaire d'effectuer une autre série d'essais pour que le nombre de mesures permette d'établir s'il y a effectivement un palier. Il est également à noter que même les résultats obtenus par Laforte et al. montrent une variation importante de la taille des grains pour des températures très proches les unes des autres.

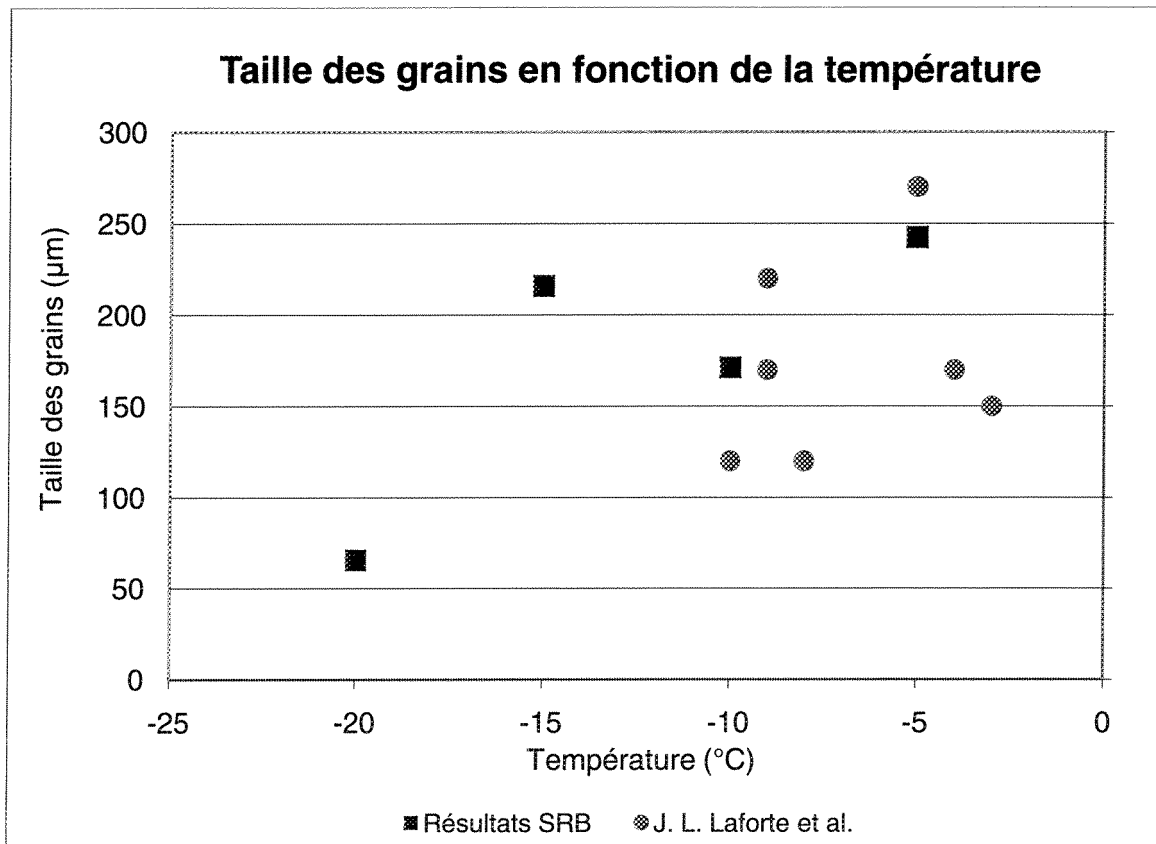


Figure 5-7 : Comparaison des tailles de grains mesurées sur le SRB-II aux résultats obtenus par Laforte et al.

5.3 ADHERENCE

5.3.1 Effet de la température sur l'adhérence de la glace sur la pale

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il semble que, l'adhérence de la glace augmente avec la diminution de la température. D'une part, les essais aux températures les plus élevées ne duraient pas aussi longtemps que ceux aux températures les plus faibles. Ainsi, l'accrétion de glace à -5 °C dure généralement moins d'une minute, alors que, pour la température de -20 °C, les essais peuvent durer 5 mn sans qu'il y ait de déglacage. De plus, les longueurs de glace décrochée à -20 °C sont en moyenne 3,5 fois plus petites que

pour -5 °C. Or, la force d'adhérence étant le produit de la surface d'adhérence par la contrainte de cisaillement (l'adhérence), il apparaît que pour des températures élevées l'adhérence soit plus faible. Donc, les résultats de la valeur de l'adhérence concordent avec les observations expérimentales.

5.3.2 Comparaison entre les deux méthodes de mesures

La **Figure 5-8** est une comparaison graphique des deux méthodes. De visu, les différences entre les deux méthodes sont faibles. Entre -5 et -15 °C, les deux courbes suivent une progression identique bien que les valeurs numériques de la méthode de la masse soient légèrement plus faibles. Ensuite, entre -15 et -20 °C les valeurs de la méthode de l'épaisseur augmentent de façon moins soutenue, alors que la méthode de la masse continue d'augmenter linéairement. Cependant, comme tendait à le montrer l'écart type important de la **Figure 4-13**, page 78, la méthode de l'épaisseur est moins précise. Ceci s'explique parce qu'elle est utilisée lorsque les deux pales se sont délestées de leur accréation, or lorsqu'une pale se déleste de l'accréation, de violentes vibrations apparaissent sur le rotor et les pales. Ces vibrations vont entraîner le déglacage de l'autre pale pour rétablir l'équilibre du rotor. Ce délestage forcé apparaît ainsi dans les écarts types de la méthode de l'épaisseur qui est toujours supérieur à celui de la méthode de la masse.

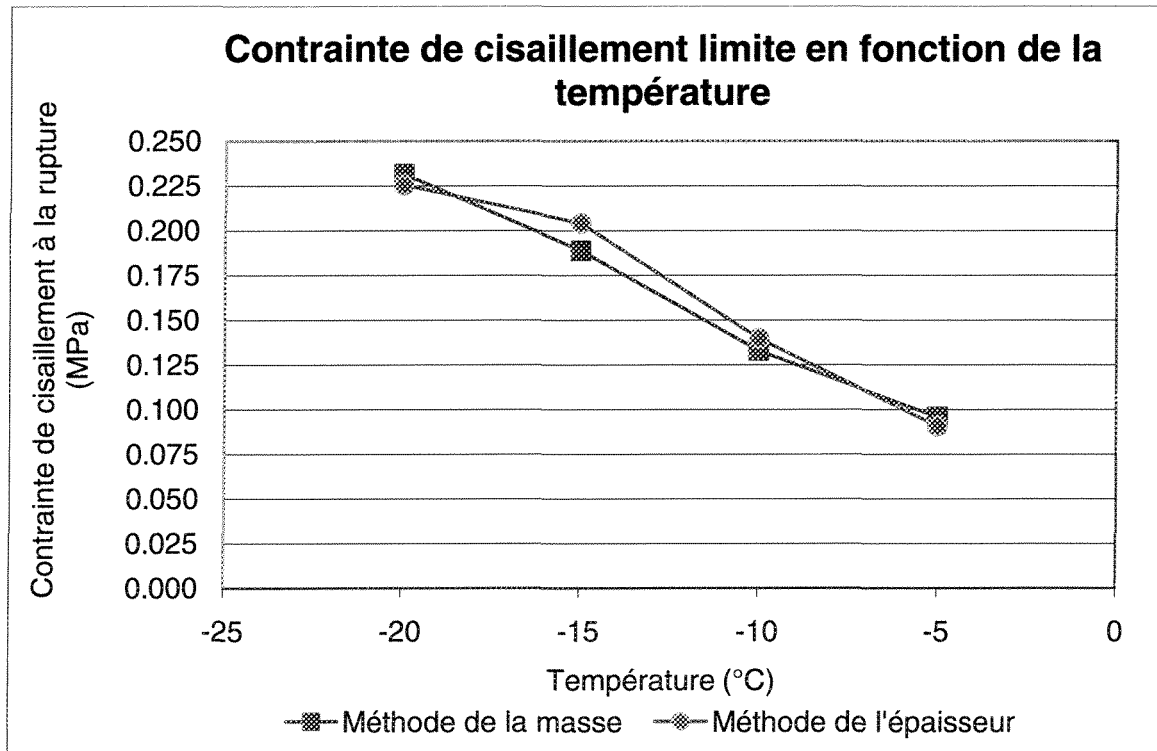


Figure 5-8 : Comparaison des résultats de la valeur de l'adhérence selon la méthode employée en fonction de la température

5.3.3 Validité des résultats

5.3.3.1 Comparaison avec la littérature

Les résultats de la littérature utilisés pour comparer les résultats de ce mémoire sont ceux issus du rapport NASA-CR-179580 par R. J. Scavuzzo et M. L. Chu (1987) et ceux de J. L. Laforte et J. Druetz (1979). Le choix de ces résultats a été fait parce que dans les deux cas le matériau employé était de l'aluminium, l'accrétion était réalisée en soufflerie et les résultats ont été mesurés pour différentes températures. Les méthodologies de Scavuzzo et Chu et celles de Laforte et Druetz sont assez similaires. Leurs essais consistent à simuler, dans une soufflerie réfrigérée, une précipitation verglaçante sur un câble d'aluminium. Le câble

tourne sur son axe et la précipitation forme un manchon de glace autour de celui-ci. Ensuite, le câble est placé dans une presse. La presse vient appuyer sur le manchon et elle mesure l'effort appliqué jusqu'à son décollement. Enfin, l'opérateur déduit la valeur de la contrainte de cisaillement en divisant l'effort appliqué par la surface d'adhérence.

La **Figure 5-9** montre les résultats des auteurs cités précédemment avec les résultats du SRB-II, selon la méthode la plus précise, celle de la masse. Les résultats de Scavuzzo et Chu sont présentés sous forme de triangle gris pale. Les triangles représentent l'ensemble des résultats pour chacune des deux températures qu'ils ont essayées. Les résultats de Laforte et Druez, sont présentés sous forme de rond reliés par des segments de la même couleur. Chaque rond représente la valeur moyenne obtenue à l'issue de leurs essais.

Le graphique montre que pour les valeurs de -5 et -10 °C, les résultats obtenus par le SRB-II sont identiques à ceux obtenus par Laforte et Druez, et le segment entre les deux températures passe presque exactement au milieu de ceux de Scavuzzo et Chu. Puis, la croissance de l'adhérence est moins importante sur le SRB-II que pour les essais de Laforte et Druez. À -15 °C, la valeur du SRB-II est comprise dans l'intervalle des valeurs obtenues pour la NASA et elle est 30 % inférieure à celle obtenue par Laforte et Druez. À -20 °C l'écart entre Laforte et Druez et le SRB augmente à 42 %. Ainsi, il apparaît que sous la température de -10 °C, les résultats du SRB-II diffèrent assez grandement de ceux de Laforte et Druez, et moindrement de ceux de Scavuzzo et Chu.

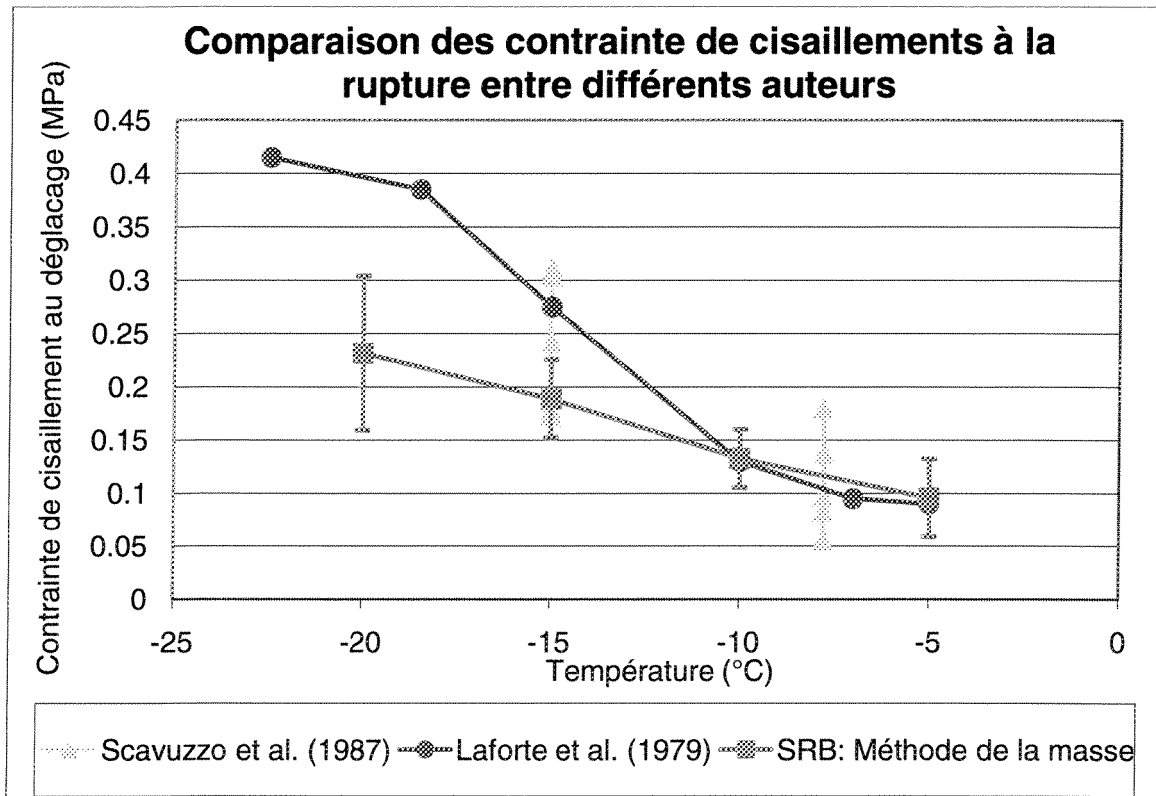


Figure 5-9 : Comparaison des résultats du SRB-II avec ceux de la littérature pour différentes températures

5.3.3.2 Origines des différences observées

L'obtention de différence entre le SRB-II et les autres auteurs est compréhensible. D'une part, les résultats de Laforte et Druetz sont présentés sans les écarts types qui auraient put permettre de comparer les variations. Mais surtout, le protocole expérimental permettant l'obtention de la valeur de l'adhérence est très différent. En effet, une pale en rotation à 3 200 RPM et un câble faisant quelques tours par minute, soumis à une précipitation verglaçante, ne réagissent pas de la même manière. L'un des facteurs qui n'est pas considéré dans ce travail est la vibration. La pale lorsqu'elle subit la précipitation vibre continuellement à une valeur d'environ 20 m/s^2 . Pour les faibles températures, la valeur de

l'adhérence étant faible, ces vibrations n'affectent pas ou peu les résultats. Mais lorsque la valeur de l'adhérence augmente, les vibrations peuvent entraîner des fissurations dans l'accrétion qui favoriseraient le déglacage. De plus, la glace étant en rotation face à l'écoulement d'air, les forces aérodynamiques fluctuent à plus ou moins la vitesse de l'écoulement d'air au carré. Ainsi, l'accrétion se charge et se décharge 3 200 fois par minute. Cette fluctuation des forces aérodynamiques pourrait entraîner un phénomène de fatigue dans l'accrétion de glace. Pour conclure, les différences induites par la dynamique du SRB-II peuvent expliquer, en partie, les différences dans les valeurs de l'adhérence mesurées sur le SRB-II par rapport à aux systèmes statiques comme celui de Laforte et Druez ou celui de Scavuzzo et Chu.

Malgré cela, ce dispositif présente de nombreux avantages. Il permet d'étudier directement l'accrétion de glace sur une pale en rotation subissant un givrage. Les mesures sont rapides et simples et l'obtention des résultats est quasi immédiat après l'arrêt de l'essai. De plus, les résultats obtenus correspondent à l'ordre de grandeur couramment admis et les écarts types sont acceptables. Par conséquent, cette méthode permet de mesurer, de comparer et d'étudier la contrainte limite de cisaillement à l'interface entre la glace et un matériau. Enfin, les différences de valeur de l'adhérence entre le SRB-II et les autres auteurs, sont bien réelles, mais elles ne représentent qu'une faible variation, lorsque l'on considère les variations existantes dans le domaine de la glace et rappelées dans le **Tableau 1-2**.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 CONCLUSION

Ce mémoire présente les résultats expérimentaux des paramètres définissant l'arrachement d'un dépôt de glace sur une pale en rotation d'un modèle réduit à l'échelle 1/18^{ème}. Voici les trois principales conclusions de l'analyse des résultats :

6.1.1 Validation du modèle réduit

La validation du modèle réduit est passée par la mise en place d'un protocole expérimental précis et rigoureux afin d'obtenir des données répétitives. Les mesures de la longueur de glace décrochée à -15 °C montrent que les résultats suivent une loi normale correspondant à un écart type de 18 mm ou 30 %, ce qui démontre que les valeurs mesurées sont répétables d'un essai à l'autre. De plus, les formes des accrétions obtenues concordent avec celles obtenues à plus grande échelle.

6.1.2 Influence de la température

La température modifie de façon très significative la majeure partie des valeurs mesurées. Premièrement, la forme de glace obtenue change selon la température. De plus, la température modifie les propriétés adhésives et cohésives de la glace. Effectivement lorsque la température augmente, l'adhérence de la glace diminue.

La température influence également la dimension des grains, en effet, à -5 °C, les grains mesurent 242 µm, quant' à -20 °C, ils ne mesurent que 66 µm. La température influence le taux de solidification et celui-ci modifie la taille des grains. Par conséquent, la taille des

grains a un impact sur la valeur de l'adhérence et sur le mécanisme de l'arrachement du dépôt de glace.

6.1.3 Adhérence de la glace sur le substrat

Les calculs développés ont permis de mesurer l'adhérence selon deux méthodes, la méthode de la masse et la méthode de l'épaisseur. Les résultats des deux méthodes concordent avec ceux obtenus dans la littérature. En effet pour la température de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ l'adhérence de la glace par la méthode de la masse est de 0,19 MPa et elle est de 0,20 MPa par la méthode de l'épaisseur. Comparativement, pour cette même température, Laforte et Druez obtinrent une valeur d'adhérence de 0,27 MPa et Scavuzzo et Chu en obtinrent une de 0,24 MPa.

6.2 RECOMMANDATIONS

Les principales recommandations découlant de l'étude sont :

- Réaliser d'autres essais pour mesurer la taille des grains et normaliser le protocole.
- Réaliser des mesures de rugosité sur la pale pour comparer l'influence de ce paramètre par rapport aux autres auteurs.
- Réaliser des essais sur d'autres matériaux pour comparer les résultats avec ceux de la littérature, notamment ceux de R.J. Scavuzzo et M.L. Chu (1987) sur de l'acier inoxydable et du cuivre.

- Ajouter de nouveaux paramètres dans la mesure de l'adhérence pour tenter d'augmenter l'intervalle de fonctionnement de la formule d'adhérence.
- Concevoir un modèle dynamique de l'accrétion de glace sur une pale en rotation, pour pouvoir prendre en considération l'influence des vibrations et des forces aérodynamiques.

CHAPITRE 7

RÉFÉRENCES

7. REFERENCES

ANDERSON, D. N., (2003), "*Acceptable tolerances for matching icing similarity parameters in scaling applications*", NASA/CR-2004-212875, Ohio Aerospace Institute.

ANDERSON, D. N., (2004), "*Manual of Scaling Methods*", NASA/CR-2003-213222, Ohio Aerospace Institute.

BAIN, M., GAYET, J. F., (1983), "*Contribution to the modeling of the ice accretion process: ice density variation with the impacted surface angle*", Proceeding of the first international workshop on atmospheric icing structures, U. S. Army CRREL Special report 83-17, pp. 13-20.

BOLUK, Y., (1996), "*Adhesion of freezing precipitates to aircraft surfaces*", Optima Specialty Chemicals and Technology Inc, pp. 44.

DRUEZ, J., PHAN, C. L., LAFORTE, J. L., NGUYEN, D. D.,(1979) "*The adhesion of glaze and rime ice on aluminum electric conductors*", Transactions CSME vol. 5, No 4, Octobre 1979, pp. 215-220.

FLEMMING, R.J.; BOND, T.H.; BRITTON, R.K., (1991)"*Results of a Sub-Scale Model Rotor Icing Test.*", AIAA Paper No. 91-0660, January 1991.

FLEMMING, R.J., BRITTON, R.K., BOND, T.H.,(1991), *"Model Rotor Icing Tests in the NASA Lewis Icing Research Tunnel"*, AGARD Conference Proceedings 496, Paper No. 9, Dec.1991.

FLEMMING, R. J., LEDNICER, D. A., (1985), *"High speed accretion on rotorcraft airfoils"*, NASA-CR-3910, 33 p.

GUFFOND, D. P., (1986), *"Icing and de-icing test on a 1/4 scale rotor in the ONERA SIMA wind tunnel"*, 24nd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 6-9 janvier 1986, Reno

ITAGAKI, I., (1983), *"Mechanical Ice Release Processes: Self-shedding of Accreted Ice From. High Speed Rotors"*, CRREL Report 83-26, Octobre 1983.

LAFORTE, C., (2008), *"Déformations à la rupture adhésive par traction flexion et torsion d'un substrat givré"* Thèse de doctorat,Département de Génie Mécanique, Université du Québec à Chicoutimi.

LAFORTE, J.L, NGUYEN, D.D., (1985), *"Microstructure of Atmospheric Ice Grown on Aluminum Conductor in Relation with Adhesive and Compressive Strengths"*, Proceedings of 10th Canadian Congress of Applied Mechanics, London (Ontario), Canada, June 2-7, Vol. 1, pp. A.343-A.344.

LAFORTE, J. L., ALLAIRE, M. A., (1992), "*Évaluation du givromètre d'Hydro-Québec à différentes intensités de Givrage Sec et Humide*", Rapport HQ-92-02.

LOZOWSKI, E. P., STALLABRASS, J. R., HEARTY, P. F., (1983), "*The icing of an unheated, nonrotating cylinder. I: A simulation model*" Journl of climate and applied meteorology, vol. 22, n°12, pp. 2053-2062.

LOZOWSKI, E. P., STALLABRASS, J. R., HEARTY, P. F., (1983), "*The icing of an unheated, nonrotating cylinder. II: Icing wind tunnel experiments*", Journal of climate and applied meteorology, vol. 22, n°12, pp. 2063-2074.

MACKLIN, W. C., (1962) "*The density of structure of ice formed by accretion*", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol 88, pp. 30-50.

MICHEL, B., (1978), "*Ice mechanics*", Les Presses de l'Université Laval, 500 p.

MILLER, D. R., POTAPCZUK, M. G., LANGHALS, T. J., (2005), "*Preliminary Investigation of Ice Shape Sensitivity to Parameter Variations*", Technical report NASA/TM-2005-213562 E-15008.

PETRENKO, V.F., PENG. S.,(2002) "*Reduction of ice adhesion to metal by using self-assembling monolayers (SAMs)*", Canadian journal of physics, vol. 81, pp. 387-393.

PHILLIPS, D, (2002), "*La pire tempête de verglas de l'histoire canadienne*", Tempête de verglas 1998, Environnement Canada.

SCAVUZZO, R. J., CHU. M. L., (1987) "*Structural properties of impact ices accreted on aircraft structure*", NASA-CR-179580, 59 p.

SCHULSON E. M., "*The structure and mechanical behavior of ice*"

STALLABRASS, J.R., (1957), "*Icing Flight of a Bell HTL-4 Helicopter*", National Aeronautical Establishment, Laboratory Report 197, National Research Council, Ottawa, Canada, pp. 14.

SVEIGNUNG, L., (1989), Présentation, Department of Civil and Transport Engineering, Marine Civil Engineering Group, NTNU, UNIS, Arctic Technology.

XIAN, X.; CHU, M. L.; SCAVUZZO, R. J.; SRIVATSAN, T. S., (1989), "*An experimental evaluation of the tensile strength of impact ice*", Journal of Materials Science Letters, vol. 8, Octobre 1989, p. 1205-1208.

ANNEXES

ANNEXE 1 : CALCUL DE LA DENSITÉ MAXIMALE THÉORIQUE DE LA GLACE.

$$v = ca^2 \sin(60^\circ)$$

$$c = 4.523 \text{ Angstrom}$$

$$a = 7.367 \text{ Angstrom}$$

D'où le volume minimal obtenu pour une molécule d'eau dans un empilement hexagonale:

$$v = 130.52 \text{ Angstrom}^3$$

La masse molaire d'une molécule d'eau est égale à :

$$M_{H_2O} = M_O + 2M_H$$

$$M_{H_2O} = 15.999 + 2 * 1.0079 = 18.0148 \text{ g / mol}$$

Je détermine maintenant le volume d'une mole de glace, le volume calculé ci-dessus correspond au volume d'une cellule comprenant 4 molécules d'eau, il faut donc ne considérer qu'une seule molécule puis la multiplier par la constante d'Avogadro.

$$v_{IceMole} = \frac{1}{4} \cdot N_A \cdot v = 19.659 \cdot 10^{-6}$$

Ainsi, la masse volumique maximale de la glace est de :

$$\rho_{IceMax} = \frac{M_{H_2O}}{v_{IceMole}}$$

Soit la valeur numérique de 916.343 kg/m^3 .

**ANNEXE 2 : FICHE DE MESURE POUR L'ENSEMBLE DES ESSAIS
SRB-II**

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration			
Test Number	SRB-	A001	A002	A003	A004	
Date	A-M-D	2008-02-18	2008-02-19	2008-02-19	2008-02-19	
Time	H-M		11h15	12h45	13h45	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.70	69.70	69.70	69.70	
Thickness	mm	6.90	6.90	6.90	6.90	
Blade number	---	2	2	2	2	
Profile type	NACA	0014	0014	0014	0014	
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Wearlon	
Rotor Solidity	---					
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	±	3237±3	3226±3	3227±2
	Icing	RPM	3219±3	3221±3	3222±3	3223±2
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70
	Power	W	±	1195±1	1203±0	1136±2
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	1.95±0.05	1.93±0.05	2.49±0.05	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	±	209±2	184±1	226±1
	Speed	m/s	±	15.00±0.06	15.13±0.12	14.71±0.09
	Temperature	°C	±	-15.50±0.07	-14.67±0.11	-14.88±0.07
Median volumetric diameter	µm					
Liquid Water content	g/m ³			0.8	0.8	0.8
Time	min:s			12:20	12:10	11:00
Photo and/or Video						
Photo	---			X	X	X
Video (T: Top & S: Side)	T-S			No	No	No
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm					123 58
Ice thickness Leading edge	Radius 0.29-10	mm		69.76	69.7	69.64 69.62 70.20 70.34
	Radius 0.44-8	mm		75.28	75.40	74.70 74.50 69.98 72.84
	Radius 0.60-6	mm		73.62	73.50	73.00 72.74 69.94 72.10
	Radius 0.76-4	mm		72.50	73.32	72.84 72.80 72.24 71.56
	Radius 0.92-2	mm		71.30	71.62	71.08 71.40 71.08 70.80
Ice growth	Slope 1	W/s		24.9		26.1 34.9
	Slope 2	W/s		24.6		21.3 24.1
	Slope 3	W/s		22.9		20.0
	Slope 4	W/s		17.5		19.7
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W		4060		3964 2847
	Shed 2	W				
	Shed 3	W				
	Shed 4	W				

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration					
Test Number	SRB-	A005	A006	A007	A008			
Date	A-M-D	2008-02-19	2008-02-20	2008-02-20	2008-02-20			
Time	H-M	14h50	10h10	11h10	13h00			
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782			
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150			
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314			
Chord	mm	51.14	51.14	51.14	51.14			
Thickness	mm	6.90	6.90	6.90	6.90			
Blade number	---	2	2	2	2			
Profile type	NACA	0014	0014	0014	0014			
Profile material	---	Wearlon	Dow Corling	Wearlon	Dow Corling			
Rotor Solidity	---							
Attack of angle	°	6	6	6	6			
Twist	°	0	0	0	0			
Spinning Rotor Blade								
Angular speed	Stabilization	RPM	3226±2	3226±3	3228±2	3228±2		
	Icing	RPM	3224±2	3223±2	3222±3	3225±2		
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70		
	Power	W	1140±8	1307±5	1240±8	1297±2		
Torque (Power/angular speed)	N m							
Trust	N							
Vibration	g	1.64±0.05	1.96±0.05	3.26±0.04	1.98±0.05			
Icing Wind Tunnel Conditions								
Flow	Flow rate	ml/min	209±1	195±0	222±1	212±1		
	Speed	m/s	15.10±0.11	15.06±0.11	15.14±0.17	14.76±0.16		
	Temperature	°C	-14.91±0.07	-14.92±0.08	-14.99±0.08	-14.89±0.07		
Median volumetric diameter	µm							
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8			
Time	min:s	11:05	13:00	11:25	13:00			
Photo and/or Video								
Photo	---	X	X	X	X			
Video (T: Top & S: Side)	T-S							
Ice Blade Rotor								
Length shed	mm	52.20	46.54			56.00	50.00	
Ice thickness Leading edge	Radius 0.29-10	mm	69.70	69.74		69.7	69.7	
	Radius 0.44-8	mm	73.04	73.02		73.84	73.84	
	Radius 0.60-6	mm	72.12	72.00		72.98	72.98	
	Radius 0.76-4	mm	71.91	72.00		73.22	72.80	
	Radius 0.92-2	mm	71.22	70.82		73.00	71.34	
Ice growth	Slope 1	W/s	31.4		25.7	32.9		25.4
	Slope 2	W/s	29		24.5			11
	Slope 3	W/s						
	Slope 4	W/s						
	Slope 5	W/s						
Shed	Shed 1	W	3214		2463	3691		2052
	Shed 2	W						2911
	Shed 3	W						

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A009	A010	A011	A012	
Date	A-M-D	2008-02-20	2008-02-21	2008-02-21	2008-02-21	
Time	H-M	14h07	10h30		14h50	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	51.14	51.14	51.14	51.14	
Thickness	mm	6.90	6.90	6.90	6.90	
Blade number	---	2	2	2	2	
Profile type	NACA	0014	0014	0014	0014	
Profile material	---	Dow Corling	Wearlon	Aluminium	Aluminium	
Rotor Solidity	---					
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3228±2	3230±5	3238±2	3228±2
	Icing	RPM	3224±3	3223±3	3224±2	3223±2
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70
	Power	W	1189±1	1182±1	1205±1	1267±3
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	1.88±0.05	210±0.04	2.12±0.05	1.78±0.05	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	226±1	202±0	166±0	218±2
	Speed	m/s	14.88±0.65	15.25±0.14	14.81±0.20	15.25±0.19
	Temperature	°C	-14.93±0.08	-15.01±0.10	-14.77±0.08	-14.91±0.07
Median volumetric diameter	µm					
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	16:40	11:40	13:00	12:15	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	X	X	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm					36 30 54
Ice thickness Leading edge	Radius 0.29-10	mm	76.90	78.80	70.20	70.20 78.31 70.78 70.50 70.86
	Radius 0.44-8	mm	74.30	74.78	73.80	73.70 76.10 76.16 74.98 75.30
	Radius 0.60-6	mm	73.30	73.90	72.82	72.84 74.00 73.96 73.68 73.50
	Radius 0.76-4	mm	72.68	73.16	73.00	73.04 72.92 73.10 73.80 73.70
	Radius 0.92-2	mm	71.06	72.18	71.54	71.50 72.06 72.00 71.60 71.70
Ice growth	Slope 1	W/s	31.2		28.5	
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	2719		3296	
	Shed 2	W	3652			
	Shed 3	W				
	Shed 4	W				

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A-013	A-014	A-015	A-016	
Date	A-M-D	2008-02-21	2008-02-21	2008-02-21	2008-02-21	
Time	H-M	15h45	14h30	16h20	17h20	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	51.14	51.14	51.14	51.14	
Mass	g					
Thickness	mm	6.90	6.90	6.90	6.90	
Profile type	NACA	0014	0014	0014	0014	
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium	
Rotor Solidity	---					
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3239±2	3228±2	3228±3	3239±2
	Icing	RPM	3233±2	3223±2	3222±7	3225±2
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70
	Power	W	1220±3	1237±2	1240±27	1204±7
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	1.92±0.06	1.79±0.07	2.56±0.07	2.19±0.06	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	202.1	198±1	208±1	212±1
	Speed	m/s	15.18±0.28	15.19±0.19	15.15±0.30	13.07±0.17
	Temperature	°C	-14.72±0.08	-14.81±0.06	-14.84±0.30	-15.67±0.08
Median volumetric diameter	µm					
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	13:00	12:40	13:20	12:10	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	X	X	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm		52	56	38	29
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	78.30	69.62	70.40	77.96
	Radius 0.76-4	mm	73.20	76.40	76.06	76.16
	Radius 0.60-6	mm	74.14	74.16	74.52	74.46
	Radius 0.44-8	mm	73.38	74.24	74.36	74.24
	Radius 0.29-10	mm	71.96	72.10	72.00	72.14
Ice growth	Slope 1	W/s	25.4		27.8	
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	4606	4415	5580	4269
	Shed 2	W				
	Shed 3	W				
	Shed 4	W				

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A017	A018	A019	A020	
Date	A-M-D	2008-02-25	2008-02-25	2008-02-25	2008-02-25	
Time	H-M	10h10	11h10	12h40	13h50	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	51.14	51.14	51.14	51.14	
Mass	g					
Thickness	mm	6.90	6.90	6.90	6.90	
Profile type	NACA	0014	0014	0014	0014	
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium	
Rotor Solidity	---					
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3227±2	3228±2	3227±0	3227±3
	Icing	RPM	3224±2	3225±2	3225±3	3224±3
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70
	Power	W	1244±1	1277±1	1218±14	1194±10
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	1.71±0.06	1.93±0.04	1.74±0.06	1.50±0.04	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	199±1	207±1	209±1	207±1
	Speed	m/s	14.98±0.11	15.07±0.31	15.05±16	15.00±0.06
	Temperature	°C	-14.81±0.06	-14.93±0.08	-14.90±0.07	-14.81±0.07
Median volumetric diameter	µm					
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	13:20	13:00	13:00	12:10	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	X	X	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	@50	(J)44		(j)75.00	62 36 41 61
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.62	69.62	80.00	69.62 69.70 69.70 69.70
	Radius 0.76-4	mm	77.20	77.46	76.92	76.70 76.20 76.30 74.74
	Radius 0.60-6	mm	75.00	75.14	75.30	75.10 74.22 74.00 73.26
	Radius 0.44-8	mm	74.00	74.10	74.76	74.90 73.20 72.90 72.58
	Radius 0.29-10	mm	72.40	72.80	72.40	72.60 72.20 71.60 71.34
Ice growth	Slope 1	W/s	21.1		21.7	22.8 22.7
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	5411		5501	4889 4258
	Shed 2	W				
	Shed 3	W				
	Shed 4	W				

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration							
Test Number	SRB-	A021	A022	A023	A024				
Date	A-M-D	2008-02-25	2008-02-26	2008-02-26	2008-02-26				
Time	H-M	14h45	10h20	11h30	12h30				
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782				
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150				
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314				
Chord	mm	51.14	51.14	51.14	51.14				
Mass	g								
Thickness	mm	6.90	6.90	6.90	6.90				
Profile type	NACA	0014	0014	0014	0014				
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium				
Hub combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-RR/JJ				
Attack of angle	°	6	6	6	Aluminium				
Twist	°	0	0	0	0				
Spinning Rotor Blade									
Angular speed	Stabilization	RPM	3238±5	3231±6	3238±3	3238±2			
	Icing	RPM	3235±2	3225±2	3234±3	3235±2			
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70			
	Power	W	1187±1	1251±1	1295±10	1227±1			
Torque (Power/angular speed)	N m								
Trust	N								
Vibration	g	2.28±0.04	2.18±0.05	2.06±0.05	1.88±0.08				
Icing Wind Tunnel Conditions									
Flow	Flow rate	ml/min	172±1	203.5±	204±0	180±1			
	Speed	m/s	15.14±0.20	15.20±0.21	15.12±0.27	14.99±0.20			
	Temperature	°C	-14.70±0.07	-15.87±0.22	-14.70±0.08	-14.64±0.07			
Median volumetric diameter	µm								
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8				
Time	min:s	13:00	12:30	12:30	13:35				
Photo and/or Video									
Photo	---	X	X	X	X				
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No				
Ice Blade Rotor									
Length shed	mm	60	51	44	51	74	68	57	
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	69.64	69.64	80.50
	Radius 0.76-4	mm	75.30	75.62	75.90	76.10	75.26	75.60	77.80
	Radius 0.60-6	mm	73.40	73.32	74.00	74.10	73.68	73.74	75.00
	Radius 0.44-8	mm	73.20	73.26	72.92	73.04	73.66	73.64	74.24
	Radius 0.29-10	mm	71.50	72.26	71.80	71.90	72.00	72.30	72.66
Ice growth	Slope1(1 st 30s)	W/s	16.1		25.1		25.5		24.3
	Slope2(1 st shed)	W/s			19.0		21.4		18.4
	Slope 3	W/s							
	Slope 4	W/s							
	Slope 5	W/s							
Shed	Shed 1	W	4060		4111		4570		4284
	Color	W					X	X	
	Shed 3	W							
Mass	g	154.8	154.6	156.1	154.9	155.1	154.6		

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration						
Test Number	SRB-	A025	A026	A027	A028				
Date	A-M-D	2008-02-26	2008-02-26	2008-02-26	2008-02-27				
Time	H-M		14h40	15h40	11h30				
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782				
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150				
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314				
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64				
Mass	g								
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36				
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012				
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium				
Hub/ Blade combination	---	1-RJ/JR	1-RJ/JR	1-RJ/JR	1-RJ/JR				
Attack of angle	°	6	6	6	6				
Twist	°	0	0	0	0				
Spinning Rotor Blade									
Angular speed	Stabilization	RPM	3228±3	3238±2	3231±6	3237±3			
	Icing	RPM	3224±3	3235±2	3222±1	3236±2			
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70			
	Power	W	1199±2	1202±3	1168±2	1235±1			
Torque (Power/angular speed)	N m								
Trust	N								
Vibration	g	1.84±0.05	1.66±0.05	1.78±0.05	1.66±0.07				
Icing Wind Tunnel Conditions									
Flow	Flow rate	ml/min	207±1	205±1	208±1	205±1			
	Speed	m/s	14.79±0.36	14.31±0.25	15.02±0.15	15.20±0.18			
	Temperature	°C	-15.10±0.07	-15.45±0.06	-14.91±0.12	-14.76±0.07			
Median volumetric diameter	µm								
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8				
Time	min:s	14:10	13:10	13:00	11:30				
Photo and/or Video									
Photo	---	X	X	X	X				
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No				
Ice Blade Rotor									
Length shed	mm	40	31	41	40	72		79	
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.64	69.64	79.80	69.64	69.64	76.00	69.64
	Radius 0.76-4	mm	77.90	78.20	77.80	76.70	76.34	76.30	73.92
	Radius 0.60-6	mm	76.06	75.90	75.00	74.86	74.40	74.40	72.34
	Radius 0.44-8	mm	75.80	75.50	74.60	74.50	74.50	74.26	72.60
	Radius 0.29-10	mm	73.36	73.18	72.42	72.42	72.40	72.30	70.94
Ice growth	Slope 1	W/s	26.4		25.3		28.6		27.5
	Slope 2	W/s	21.7		20.7		20.6		24.0
	Slope 3	W/s							
	Slope 4	W/s							
	Slope 5	W/s							
Shed	Shed 1	W	5872		5074		4759		3796
	Color	W	X			X	X	X	X
	Shed 3	W							
Mass	g							156.7	152.7

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A-029	A-030	A-031	A-032	
Date	A-M-D	2008-02-27	2008-02-27	2008-02-27	2008-02-28	
Time	H-M	12h40	13h40	14h30	12h40	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium	
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-RR/JJ	
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3228±3	3238±2	3228±2	3239±2
	Icing	RPM	3223±2	3231±6	3225±2	3234±1
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70
	Power	W	1211±2	1210±1	1201±1	1266±1
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	1.90±0.04	1.49±0.05	1.88±0.04	2.04±0.08	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	207±0	207±1	209±1	205±5
	Speed	m/s	15.00±0.12	14.97±0.06	14.97±0.17	15.04±0.14
	Temperature	°C	-14.90±0.09	-14.74±0.13	-14.91±0.08	-14.89±0.11
Median volumetric diameter	µm					
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	11:40	11:40	12:10	12:50	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	No	X	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	35	44	42	53	58
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.64	69.64	75.54	69.64
	Radius 0.76-4	mm	74.14	74.10	74.28	74.46
	Radius 0.60-6	mm	72.60	72.60	72.62	72.52
	Radius 0.44-8	mm	72.66	72.66	72.68	72.54
	Radius 0.29-10	mm	71.28	71.32	71.14	71.04
Ice growth	Slope 1 (1 st 30s)	W/s	28.5		30.1	28.7
	Slope2(1 st shed)	W/s	24.8		24.8	25.2
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	3968	3911.2	4379	5087
	Color	W	X	X	X	X
	Shed 3	W				
Mass	g	155.0	154.1	157.0	154.3	158.5

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration								
Test Number	SRB-	A033	A034	A-035	A-036					
Date	A-M-D	2008-02-28	2008-02-28	2008-03-10	2008-03-10					
Time	H-M	13h40	14h30	11h40	13h40					
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782					
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150					
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314					
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64					
Mass	g									
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36					
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012					
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium					
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-RJ/JR					
Attack of angle	°	6	6	6	6					
Twist	°	0	0	0	0					
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3239±2	3236±4	3227±6	3228±6				
	Icing	RPM	3235±3	3224±3	3214±6	3224±4				
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70				
	Power	W	1248±3	1228±1	1225±24	1205±2				
Torque (Power/angular speed)	N m									
Trust	N									
Vibration	g	2.11±0.07	1.94±0.09	±	±					
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	208± 1	198±1	210±2	213±1				
	Speed	m/s	14.86 ±0.09	15.08±0.14	14.93±0.20	15.05±0.24				
	Temperature	°C	-14.72±0.07	-15.11±0.11	-14.92±0.27	-14.81±0.23				
Median volumetric diameter	µm									
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8					
Time	min:s									
Photo and/or Video										
Photo	---	X	X	No	No					
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No					
Ice Blade Rotor										
Length shed	mm	44	36	7	70	58	63	35	38	
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.64	69.64	77.38	69.64	69.80	69.90	69.64	69.64
	Radius 0.76-4	mm	76.96	77.02	75.12	75.10	77.78	77.12	79.30	79.36
	Radius 0.60-6	mm	74.98	75.26	73.24	73.46	74.08	74.10	74.44	74.40
	Radius 0.44-8	mm	74.06	74.08	72.92	73.14	73.60	73.58	73.46	74.00
	Radius 0.29-10	mm	72.12	72.36	71.56	71.68	71.58	71.80	71.88	72.12
Ice growth	Slope 1	W/s	30.5		28.0		55.7		42.8	
	Slope 2	W/s	28.0		24.3		53.7		32.3	
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	5525		4287		7214		6658	
	Color	W		X						
	Shed 3	W								
Mass after accretion	g	158.1	157.8	157.3	153.7	159.8	158.9	162.9	163.4	

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration					
Test Number	SRB-	A037	A-038	A039	A040		
Date	A-M-D	2008-03-10	2008-03-10	2008-03-11	2008-03-11		
Time	H-M	14h40	15h30	9h30	10h30		
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782		
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150		
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314		
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64		
Mass	g						
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36		
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012		
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Échantillon Alu	Aluminium		
Hub/ Blade combination	---	1-RJ/JR	1-JJ/RR	1	1-JJ/JR		
Attack of angle	°	6	6	6	6		
Twist	°	0	0	0	0		
Spinning Rotor Blade							
Angular speed	Stabilization	RPM	3227±6	3228±7	3223±8	3230±9	
	Icing	RPM	3220±4	3220±4	3217±3	3225±4	
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70	
	Power	W	1208±4	1211±1	2864±2	1224±18	
Torque (Power/angular speed)	N m						
Trust	N						
Vibration	g	±	±	±	±		
Icing Wind Tunnel Conditions							
Flow	Flow rate	ml/min	210±5	210±1	202±1	207±2	
	Speed	m/s	15.06±0.25	14.87±0.31	15.23±0.30	15.30±0.40	
	Temperature	°C	-14.97±0.30	-14.69±0.29	-14.79±0.25	-14.74±0.24	
Median volumetric diameter	µm						
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8		
Time	min:s			0:40	1:50		
Photo and/or Video							
Photo	---	X	X	X	X		
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No		
Ice Blade Rotor							
Length shed	mm	0	0	98	92		0
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	79.90	80.08	69.64	69.64	76.42
	Radius 0.76-4	mm	78.70	78.94	69.64	69.64	75.10
	Radius 0.60-6	mm	73.80	74.00	74.42	74.38	72.64
	Radius 0.44-8	mm	73.40	73.70	73.92	73.58	72.40
	Radius 0.29-10	mm	71.58	71.82	71.90	71.92	71.00
Ice growth	Slope 1	W/s	36.6		39.3	32.3	40.4
	Slope 2	W/s	30.0		30.7		32.1
	Slope 3	W/s					
	Slope 4	W/s					
	Slope 5	W/s					
Shed	Shed 1	W		7300			
	Color	W					
	Shed 3	W					
Mass after accretion	g	167.9	167.6	157.8	158.8		160.7

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration			
Test Number	SRB-	A-041	A-042	A-043	A-044	
Date	A-M-D	2008-03-11	2008-03-13	2008-03-13	2008-03-13	
Time	H-M		10h20		11h20	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Ech Alu	Ech Alu	Aluminium	
Hub/ Blade combination	---				1-RJ/JR	
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3238±4	3208±4	3208±3	3215±4
	Icing	RPM	3226±7	2720±4	2740±4	3212±4
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70
	Power	W	1213±6	2939±1	2908±10	1197±1
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	217±1	219±3	207±1	214±1
	Speed	m/s	15.06±0.16	15.01±0.20	15.10±0.11	13.99±0.15
	Temperature	°C	-14.75±0.30	15.29±0.36	-14.70±0.36	-15.41±0.21
Median volumetric diameter	µm					
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	2:20	0:50	0:26	1:20	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	X	X	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	84	56			35 40
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.64	69.64		69.64 69.64
	Radius 0.76-4	mm	69.64	76.70		73.76 73.92
	Radius 0.60-6	mm	72.86	73.44		71.90 72.12
	Radius 0.44-8	mm	72.62	73.00		71.40 71.70
	Radius 0.29-10	mm	71.28	71.60		70.58 70.76
Ice growth	Slope 1	W/s	40.8	37.2	32.6	38.0
	Slope 2	W/s	32.8			33.4
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	5602	3672		3643
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	156.5	158.8			156.7 157.4

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration								
Test Number	SRB-	A-045	A-046	A-047	A-048					
Date	A-M-D	2008-03-13	2008-03-13	2008-03-14	2008-03-14					
Time	H-M	14h00	15h00	13h00	14h00					
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782					
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150					
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314					
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64					
Mass	g									
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36					
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012					
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium					
Hub/ Blade combination	---				1-RJ/JR					
Attack of angle	°	6	6	6	6					
Twist	°	0	0	0	0					
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3215±4	3217±9	3217±9	3238±4				
	Icing	RPM	3211±4	3209±5	3211±12	3210±3				
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70				
	Power	W	1195±46	1204±3	1231±1	1228±1				
Torque (Power/angular speed)	N m									
Trust	N									
Vibration	g	±	±	±	±					
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	205±1	212±1	201±1	214±1				
	Speed	m/s	14.99±0.10	15.10±0.42	15.40±0.44	15.29±0.20				
	Temperature	°C	-14.49±0.20	-15.13±0.24	-15.16±0.29	-14.83±0.39				
Median volumetric diameter	µm									
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8					
Time	min:s									
Photo and/or Video										
Photo	---	X	X	X	X					
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No					
Ice Blade Rotor										
Length shed	mm		57	62	84	50	57	57		
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	75.04	69.64	69.64	69.64	76.32	69.64	69.64	69.64
	Radius 0.76-4	mm	74.54	74.72	74.90	69.64	74.92	75.32	74.90	74.91
	Radius 0.60-6	mm	72.56	72.62	72.60	72.50	72.58	72.62	72.52	72.64
	Radius 0.44-8	mm	72.28	72.04	72.36	72.20	72.50	72.54	72.04	72.40
	Radius 0.29-10	mm	71.04	71.12	71.04	70.88	70.98	71.04	70.74	70.92
Ice growth	Slope 1	W/s	36.4		36.8		37.8		39.6	
	Slope 2	W/s	30.0		32.0		30.7		32.8	
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	4352		4859		4742		4736	
	Color	W		X				X		
	Shed 3	W							156.8	157.5
Mass after accretion	g	160.9	156.6	157.2	160.8	160.8	156.9			

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration								
Test Number	SRB-	A-049	A-050	A-051	A-052					
Date	A-M-D	2008-03-14	2008-03-14	2008-03-14	2008-03-17					
Time	H-M	15h00	16h00	17h00	10h40					
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782					
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150					
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314					
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64					
Mass	g									
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36					
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012					
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium					
Hub/ Blade combination	---	1-RJ/JR	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-JR/RJ					
Attack of angle	°	6	6	6	6					
Twist	°	0	0	0	0					
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3216±8	3218±12	3215±4	3214±5				
	Icing	RPM	3208±4	3211±14	3214±4	3213±4				
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70				
	Power	W	1179±0.25	1198±5	1197±1	1230±1				
Torque (Power/angular speed)	N m									
Trust	N									
Vibration	g	±	±	±	±					
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	208±1	209±1	206±1	209±1				
	Speed	m/s	15.03±0.31	15.01±0.30	15.01±0.17	15.17±0.29				
	Temperature	°C	-15.32±0.25	-14.83±0.23	-14.92±0.28	14.89±0.33				
Median volumetric diameter	µm									
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8					
Time	min:s	1:40	1:55	2:00	2:55					
Photo and/or Video										
Photo	---	X	X	X	X					
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No					
Ice Blade Rotor										
Length shed	mm	81	62	70	75	42	82	0	0	
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	69.64	79.70	80.14	
	Radius 0.76-4	mm	69.64	74.24	74.94	75.18	75.00	69.64	77.56	78.68
	Radius 0.60-6	mm	72.10	72.24	72.70	72.78	72.56	72.84	74.42	74.30
	Radius 0.44-8	mm	71.40	71.90	72.30	72.60	72.34	72.60	73.88	73.60
	Radius 0.29-10	mm	70.64	70.80	71.10	71.00	70.90	71.00	72.12	72.00
Ice growth	Slope 1	W/s	38.6		37.9		37.4		38.3	
	Slope 2	W/s	32.6		33.6		32.3		33.8	
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	4286		4752		4854		6873	Arête
	Color	W	X	X	X		X			
	Shed 3	W								
Mass after accretion	g	154.8	156.5	156.7	156.5	158.6	156.1	167.7	167.2	

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration						
Test Number	SRB-	A-053	A-054	A-055	A-056				
Date	A-M-D	2008-03-17	2008-03-17	2008-03-18	2008-03-18				
Time	H-M	14h50	15h50	10h20	11h10				
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782				
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150				
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314				
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64				
Mass	g								
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36				
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012				
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium				
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-JR/RJ	1-RR/JJ	1-JR/RJ				
Attack of angle	°	6	6	6	6				
Twist	°	0	0	0	0				
Spinning Rotor Blade									
Angular speed	Stabilization	RPM	3226±12	3238±4	3239±4	3238±4			
	Icing	RPM	3210±4	3238±4	3241±4	3231±6			
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70			
	Power	W	1172±1	1203±1	1217±1	1241±7			
Torque (Power/angular speed)	N m								
Trust	N								
Vibration	g	±	±	±	±				
Icing Wind Tunnel Conditions									
Flow	Flow rate	ml/min	209±1	206±1	210±1	204±1			
	Speed	m/s	14.08±0.13	15.09±0.16	15.18±0.13	15.01±0.18			
	Temperature	°C	-15.46±0.65	-14.56±0.33	-14.66±0.31	-14.50±0.27			
Median volumetric diameter	µm								
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8				
Time	min:s			2:10	1:50				
Photo and/or Video									
Photo	---	X	X	X	X				
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No				
Ice Blade Rotor									
Length shed	mm	38	90	80	57	87	46	70	105
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	69.64	69.64	69.64
	Radius 0.76-4	mm	75.50	69.64	69.64	76.52	69.64	75.84	74.14
	Radius 0.60-6	mm	73.08	73.42	73.58	73.58	73.10	73.08	72.38
	Radius 0.44-8	mm	72.70	72.82	73.10	72.68	72.60	73.10	72.72
	Radius 0.29-10	mm	71.30	71.44	71.70	71.50	71.48	71.20	70.98
Ice growth	Slope 1	W/s	34.6		38.7		33.0		32.5
	Slope 2	W/s	31.8		33.0		28.0		26.7
	Slope 3	W/s							
	Slope 4	W/s							
	Slope 5	W/s							
Shed	Shed 1	W	5226		5778		4972		4196
	Color	W							
	Shed 3	W							
Mass after accretion	g	159.4	156.8	158.2	158.9		158.9	156.4	154.6

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration							
Test Number	SRB-	A-057	A-058	A-059	A-060				
Date	A-M-D	2008-03-18	2008-03-18	2008-03-19	2008-03-19				
Time	H-M	13h10	14h10	13h00	14h00				
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782				
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150				
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314				
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64				
Mass	g								
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36				
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012				
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Ech-Aluminium				
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-JR/RJ	1-RR/JJ				
Attack of angle	°	6	6	6	6				
Twist	°	0	0	0	0				
Spinning Rotor Blade									
Angular speed	Stabilization	RPM	3222±18	3217±9	3218±13	3217±20			
	Icing	RPM	3220±10	3213±14	3212±19	3213±15			
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70			
	Power	W	1182±1	1164±2	1203±3	2846±13			
Torque (Power/angular speed)	N m								
Trust	N								
Vibration	g	±	±	±	±				
Icing Wind Tunnel Conditions									
Flow	Flow rate	ml/min	192±1	203±1	210±1	208±1			
	Speed	m/s	15.03±0.42	14.98±0.57	15.38±0.49	15.43±0.60			
	Temperature	°C	-15.12±0.29	15.38±0.27	-15.12±0.31	-15.07±0.31			
Median volumetric diameter	µm								
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8				
Time	min:s	2:40	2:48	3:00	0:35				
Photo and/or Video									
Photo	---	X	X	X	No				
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No				
Ice Blade Rotor									
Length shed	mm			90	61	88	77		
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	78.20	78.30	69.64	69.64	69.64	69.64	
	Radius 0.76-4	mm	75.50	75.84	69.64	76.62	69.64	76.76	
	Radius 0.60-6	mm	74.04	73.92	73.70	73.90	74.58	74.42	
	Radius 0.44-8	mm	73.26	73.00	73.60	73.54	73.76	73.50	
	Radius 0.29-10	mm	71.82	71.80	71.90	71.84	72.44	72.14	
Ice growth	Slope 1	W/s	30.8		31.1		34.5		
	Slope 2	W/s	23.9		24.7		30.8		
	Slope 3	W/s							
	Slope 4	W/s							
	Slope 5	W/s							
Shed	Shed 1	W			5348.8		6228		
	Color	W							
	Shed 3	W							
Mass after accretion	g	163.7		157.7	158.8	158.3	158.1		

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A-061	A-062	A-063	A-064	
Date	A-M-D	2008-03-19	2008-03-20	2008-03-20	2008-03-20	
Time	H-M	15h00	13h00	14h00	15h00	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Ech-Alu	Aluminium	
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1	1-JR/RJ	
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3215±7	3215±8	3210±11	3217±12
	Icing	RPM	3212±4	3214±4	3204±12	3213±4
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70
	Power	W	1185±2	1154±1	2813±1	1128±1
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
0.57	Flow rate	ml/min	206±1	204±1	205±1	207±1
	Speed	m/s	15.20±0.24	14.86±0.40	15.26±0.40	15.52±0.57
	Temperature	°C	-15.12±0.28	-10.21±0.13	-10.28±0.14	-10.16±0.10
Metric diameter	µm					
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	2:20		0:30	1:54	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	X	No	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	0	57	0	100	120 103
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	77.22	69.64	74.26	69.64 69.64
	Radius 0.76-4	mm	75.72	75.82	73.78	69.64 69.64
	Radius 0.60-6	mm	73.00	73.10	73.10	72.98 72.50
	Radius 0.44-8	mm	72.70	72.68	72.50	72.84 72.26 72.14
	Radius 0.29-10	mm	71.40	71.30	71.40	71.40 71.20 71.08
Ice growth	Slope 1	W/s	32.0		43.8	31.6 41.6
	Slope 2	W/s	27.7		36.8	36.4
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	4635	5343		4909
	Color	W	27.7			
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	162.5	157.8	161.6	155.4	155.2 155.1

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A-065	A-066	A-067	A-068	
Date	A-M-D	2008-03-20	2008-03-20	2008-03-25	2008-03-25	
Time	H-M	15h45	16h30	12h00	13h30	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Ech Alu	Alu	
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ		1-RR/JJ	
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3221±19	3228±29	3212±13	3218±13
	Icing	RPM	3218±15	3218±31	3195±6	3215±11
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70
	Power	W	1137±1	1131±1	2947±13	1202±1
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	204±1	208±1	208±2	206±1
	Speed	m/s	16.22±0.45	15.22±0.43	15.49±0.42	15.78±0.51
	Temperature	°C	-10.33±0.12	-10.42±0.12	-20.54±0.08	-19.90±0.34
Median volumetric diameter	µm					
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	1:53	1:25	0:30	3:10	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	X	X	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	0	106	0	98	33 72
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	73.68	69.64	72.68	69.64
	Radius 0.76-4	mm	73.30	69.64	72.30	69.64
	Radius 0.60-6	mm	72.62	72.50	71.74	71.92
	Radius 0.44-8	mm	72.46	72.14	71.22	71.42
	Radius 0.29-10	mm	71.24	71.10	70.48	70.60
Ice growth	Slope 1	W/s	42.0		43.5	
	Slope 2	W/s	36.7		36.4	
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	4568		4058	
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	159.7	155.2	157.9	154.9	162.9 159.9

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration								
Test Number		SRB-	A-069	A-070	A-071	A-072				
Date		A-M-D	2008-03-25	2008-03-25	2008-03-25	2008-03-25				
Time		H-M	14h30	15h10	16h10	17h20				
Diameter		m	0.782	0.782	0.782	0.782				
Hub diameter		m	0.150	0.150	0.150	0.150				
Length (insert to tip)		m	0.314	0.314	0.314	0.314				
Chord		mm	69.64	69.64	69.64	69.64				
Mass		g								
Thickness		mm	8.36	8.36	8.36	8.36				
Profile type		NACA	0012	0012	0012	0012				
Profile material		---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium				
Hub/ Blade combination		---	1-RR/JJ	1-JR/RJ	1-JR/RJ	1-RR/JJ				
Attack of angle		°	6	6	6	6				
Twist		°	0	0	0	0				
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3219±16	3217±14	3225±23	3223±27				
	Icing	RPM	3217±16	3216±12	3224±33	3226±34				
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70				
	Power	W	1204±1	1211±2	1191±1	1206±2				
Torque (Power/angular speed)		N m								
Trust		N								
Vibration		g	±	±	±	±				
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	206±1	208±1	207±1	203±1				
	Speed	m/s	15.90±0.60	15.96±0.47	15.56±0.45	15.72±0.47				
	Temperature	°C	-20.40±0.09	-20.31±0.09	-20.35±0.10	-20.13±0.10				
Median volumetric diameter		µm								
Liquid Water content		g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8				
Time		min:s	2:36	2:30	3:20	2:23				
Photo and/or Video										
Photo		---	X	X	X	X				
Video (T: Top & S: Side)		T-S	No	No	No	No				
Ice Blade Rotor										
Length shed		mm	41	0	35	25	48	18	0	18
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.64	81.64	69.64	81.24	69.64	85.42	80.28	80.46
	Radius 0.76-4	mm	77.84	77.94	78.16	77.62	78.70	78.20	77.66	77.28
	Radius 0.60-6	mm	73.54	73.70	73.82	73.66	74.86	74.72	73.32	73.44
	Radius 0.44-8	mm	73.12	72.88	73.68	73.48	74.24	73.12	72.86	72.80
	Radius 0.29-10	mm	71.68	71.58	71.80	71.46	72.24	71.80	71.44	71.44
Ice growth	Slope 1	W/s	28.7		28.1		26.8		27.1	
	Slope 2	W/s	17.7		17.2		17.1		17.0	
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	3869		3879		4499		3628	
	Color	W								
	Shed 3	W								
Mass after accretion		g	160.9	165.0	161.7	162.8	163.0	165.5	164.5	162.6

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration								
Test Number	SRB-	A-073	A-074	A-075	A-076					
Date	A-M-D	2008-03-26	2008-03-26	2008-03-26	2008-03-26					
Time	H-M	10h00	10h45	11h30	13h20					
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782					
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150					
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314					
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64					
Mass	g									
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36					
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012					
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium					
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ		1-JR/RJ					
Attack of angle	°	6	6	6	6					
Twist	°	0	0	0	0					
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3241±38	3235±36	3226±27	3224±25				
	Icing	RPM	3254±48	3239±37	3225±25	3225±27				
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70				
	Power	W	1155±2	1177±1	1149±1	1262±1				
Torque (Power/angular speed)		N m								
Trust		N								
Vibration		g	±	±	±	±				
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	201±14	214±1	205±1	212±1				
	Speed	m/s	16.93±0.27	16.48±0.30	16.24±0.32	16.15±0.35				
	Temperature	°C	-5.19±0.27	-5.04±0.24	-4.96±0.28	-5.19±0.34				
Median volumetric diameter		µm								
Liquid Water content		g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8				
Time		min:s	1:12	1:32	2:45	3:25				
Photo and/or Video										
Photo		---	X	X	X	X				
Video (T: Top & S: Side)		T-S	No	No	No	No				
Ice Blade Rotor										
Length shed		mm	60	128	0	180	80	101	0	105
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.64	69.64	70.70	69.64	69.64	69.64	72.52	69.64
	Radius 0.76-4	mm	71.10	69.64	71.00	69.64	69.64	69.64	73.08	69.64
	Radius 0.60-6	mm	71.00	70.90	70.92	69.64	72.26	72.30	72.80	72.84
	Radius 0.44-8	mm	71.00	71.00	70.80	69.64	72.06	72.08	72.60	72.62
	Radius 0.29-10	mm	70.50	70.50	70.34	70.50	71.74	71.58	72.10	72.06
Ice growth	Slope 1	W/s	22.5		23.3		17.0		18.2	
	Slope 2	W/s	13.2		18.4		15.0		16.3	
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	2200		2612		3700		4618	
	Color	W								
	Shed 3	W								
Mass after accretion		g	153.9	152.7	155.5	152.2	155.5	151.5	161.5	157.1

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration			
Test Number	SRB-	A-077	A-078	A-079	A-080	
Date	A-M-D	2008-03-26	2008-03-26	2008-03-27	2008-03-27	
Time	H-M	14h20	15h10	9h00	15h00	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Ech Alu	Aluminium	Ech Alu	Ech Alu	
Hub/ Blade combination	---		1-JR/RJ			
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3223±27	3233±33	3221±23	3224±26
	Icing	RPM	3234±39	3232±31	3215±25	3235±46
Power	Frequency	Hz	53.70	53.70	53.70	53.70
	Power	W	2870±1	1130±3	2798±3	3250±1
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	208±1	207±1	208±1	207±3
	Speed	m/s	16.26±0.41	16.34±0.37	15.63±0.39	16.51±0.43
	Temperature	°C	-4.88±0.28	-5.16±0.31	-5.01±0.36	-20.17±0.07
Median volumetric diameter	µm					
Liquid Water content	g/m ³					
Time	min:s	1:00	2:04	1:24	0:45	
Photo and/or Video						
Photo	---	No	X	No	No	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm		180	180		
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	69.64	69.64		
	Radius 0.76-4	mm	69.64	69.64		
	Radius 0.60-6	mm	69.64	69.64		
	Radius 0.44-8	mm	69.64	69.64		
	Radius 0.29-10	mm	71.20	70.98		
Ice growth	Slope 1	W/s	14.0	19.4	17.1	16.1
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	2542			
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g		152.8	152.4		

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration								
Test Number	SRB-	A-081	A-082	A-083	A-084					
Date	A-M-D	2008-04-15	2008-04-15	2008-04-15	2008-04-16					
Time	H-M	10h40	13h00	15h30	10h30					
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782					
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150					
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314					
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64					
Mass	g									
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36					
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012					
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium					
Hub/ Blade combination	---	I-RR/JJ	I-RR/JJ	I-JR/RJ	I-JR/RJ					
Attack of angle	°	6	6	6	6					
Twist	°	0	0	0	0					
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3232±17	3232±16	3224±30	3177±13				
	Icing	RPM	3229±23	3230±17	3220±39	3179±16				
Power	Frequency	Hz								
	Power	W	1180±1	1210±3	1205±1	1153±7				
Torque (Power/angular speed)	N m									
Trust	N									
Vibration	g	±	±	±	±					
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	203±1	205±1	208±6	206±1				
	Speed	m/s	14.92±0.31	14.88±0.33	14.97±0.29	14.87±0.28				
	Temperature	°C	-14.88±0.23	-14.68±0.28	-15.31±0.32	-15.38±0.34				
Median volumetric diameter	µm	26	26	26	26					
Liquid Water content	g/m³	0.8	0.8	0.8	0.8					
Time	min:s	2:50	3:15	2:32	1:50					
Photo and/or Video										
Photo	---	X	X	X	X					
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No					
Ice Blade Rotor										
Length shed	mm	0	0	94	88	65	76	0	75	
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	Po	3.118	3.124				3.006		
	Radius 0.76-4	Po	2.996	2.998			2.973	2.945	2.938	2.935
	Radius 0.60-6	Po	2.902	2.905	2.931	2.930	2.900	2.893	2.853	2.856
	Radius 0.44-8	Po	2.872	2.860	2.893	2.900	2.860	2.842	2.840	2.830
	Radius 0.29-10	Po	2.816	2.818	2.841	2.844	2.827	2.814	2.800	2.792
Ice growth	Slope 1	W/s	34.5		33.7		29.7		31.1	
	Slope 2	W/s	27.2		27.0		25.8		25.3	
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	No	No	6700		5372		4175.7	
	Color	W								
	Shed 3	W								
Mass after accretion	g	(164.7)	164.5	157.1	157.00	157.2	155.8	160.2	155.2	

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration			
Test Number	SRB-	A-081				
Date	A-M-D	2008-04-15				
Time	H-M	10h40				
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	0.782
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	0.314
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	69.64
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	0012
Profile material	---	Aluminium				
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ				
Attack of angle	°	6				
Twist	°	0	0	0	0	0
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3232±17	±	±	±
	Icing	RPM	3229±23	±	±	±
Power	Frequency	Hz				
	Power	W	1180±1	±	±	±
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	±
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	203±1	±	±	±
	Speed	m/s	14.92±0.31	±	±	±
	Temperature	°C	-14.88±0.23	±	±	±
Median volumetric diameter	µm	26				
Liquid Water content	g/m ³	0.8				
Time	min:s	2:50				
Photo and/or Video						
Photo	---	X				
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No				
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	0	0			
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	Po	3.118	3.124		
	Radius 0.76-4	Po	2.996	2.998		
	Radius 0.60-6	Po	2.902	2.905		
	Radius 0.44-8	Po	2.872	2.860		
	Radius 0.29-10	Po	2.816	2.818		
Ice growth	Slope 1	W/s	34.5			
	Slope 2	W/s	27.2			
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	No	No		
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	(164.7)	164.5			

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration							
Test Number	SRB-	A-088	A-089	A-090	A-091					
Date	A-M-D	2008-04-23	2008-04-23	2008-04-23	2008-04-23					
Time	H-M	10h00	11h00	13h20	14h20					
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782					
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150					
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314					
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64					
Mass	g									
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36					
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012					
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium					
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-JR/RJ	1-JR/RJ					
Attack of angle	°	6	6	6	6					
Twist	°	0	0	0	0					
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3195±27	3196±34	3196±39	3196±28				
	Icing	RPM	3189±37	3193±47	3189±47	3200±35				
Power	Frequency	Hz								
	Power	W	1271±1	1156±1	1164±1	1129±1				
Torque (Power/angular speed)	N m									
Trust	N									
Vibration	g	±	±	±	±					
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	207±1	207±1	210±1	210±3				
	Speed	m/s	14.95±0.32	14.97±0.27	14.98±0.24	14.97±0.30				
	Temperature	°C	-6.00±0.20	-5.28±0.09	-5.38±0.12	-5.59±0.11				
Median volumetric diameter	µm	26	26	26	26					
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8					
Time	min:s	2:00	2:03	1:57	2:18					
Photo and/or Video										
Photo	---	X	X	X	X					
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No					
Ice Blade Rotor										
Length shed	mm	124	100	0	116	0	81	0	83	
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	Po			2.820		2.810		2.840	
	Radius 0.76-4	Po			2.832		2.826		2.847	
	Radius 0.60-6	Po	2.830	2.831	2.825	2.825	2.820	2.820	2.842	2.837
	Radius 0.44-8	Po	2.812	2.822	2.815	2.813	2.816	2.810	2.834	2.820
	Radius 0.29-10	Po	2.792	2.800	2.803	2.802	2.808	2.793	2.815	2.806
Ice growth	Slope 1	W/s	27.8		23.2		26.9		22.9	
	Slope 2	W/s	20.9		15.7		18.1		18.7	
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	3493		3207		3267		3635	
	Color	W								
	Shed 3	W								
Mass after accretion	g	153.6	153.6	157.2	153.8	157.7	154.3	158.5	154.5	

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration							
Test Number	SRB-	A-092	A-093	A-094	A-095					
Date	A-M-D	2008-04-24	2008-04-24	2008-04-24	2008-04-24					
Time	H-M	10h00	11h00	13h00	14h00					
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782					
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150					
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314					
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64					
Mass	g									
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36					
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012					
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium					
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-JR/RJ	1-JR/RJ					
Attack of angle	°	6	6	6	6					
Twist	°	0	0	0	0					
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3196±29	3200±6	3199±31	3197±27				
	Icing	RPM	3195±48	3200±7	3193±32	3193±21				
Power	Frequency	Hz								
	Power	W	1161±1	1196±1	1171±30	1175±11				
Torque (Power/angular speed)		N m								
Trust		N								
Vibration		g	±	±	±	±				
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	207±1	206±1	204±1	205±1				
	Speed	m/s	14.98±0.32	14.99±0.11	14.95±0.29	14.95±0.34				
	Temperature	°C	-10.93±0.21	-9.56±0.21	-9.88±0.14	-10.01±0.16				
Median volumetric diameter		µm	26	26	26	26				
Liquid Water content		g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8				
Time		min:s	1:50	1:46	2:37	2:00				
Photo and/or Video										
Photo		---	X	X	X	X				
Video (T: Top & S: Side)		T-S	No	No	No	No				
Ice Blade Rotor										
Length shed		mm	0	85	0	110	78	96	0	90
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	2.930		2.875				2.895	
	Radius 0.76-4	mm	2.892		2.870		2.916		2.880	
	Radius 0.60-6	mm	2.862	2.870	2.835	2.839	2.900	2.895	2.853	2.850
	Radius 0.44-8	mm	2.825	2.829	2.820	2.820	2.857	2.851	2.829	2.820
	Radius 0.29-10	mm	2.795	2.792	2.780	2.775	2.824	2.819	2.792	2.786
Ice growth	Slope 1	W/s	43.2		38.8		40.8		37.5	
	Slope 2	W/s	30.7		31.7		30.4		31.0	
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	4759				5697		4688	
	Color	W								
	Shed 3	W								
Mass after accretion		g	159.2	154.5	158.8	154.1	156.0	155.0	159.6	154.5

Blade Rotor			A. Adhesion, C. Clean, I. Iced & V. Vibration			
Test Number	SRB-	A-096				
Date	A-M-D	2008-04-24				
Time	H-M	15h00				
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	0.782
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	0.314
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	69.64
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	0012
Profile material	---	aluminium				
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ				
Attack of angle	°	6				
Twist	°	0	0	0	0	0
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3198±21	±	±	±
	Icing	RPM	3197±38	±	±	±
Power	Frequency	Hz				
	Power	W	1137±1	±	±	±
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	±
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	204±1	±	±	±
	Speed	m/s	14.98±0.34	±	±	±
	Temperature	°C	-10.32±0.19	±	±	±
Median volumetric diameter	µm	26				
Liquid Water content	g/m ³	0.8				
Time	min:s	1:47				
Photo and/or Video						
Photo	---	X				
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No				
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	0	80			
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	2.917			
	Radius 0.76-4	mm	2.890			
	Radius 0.60-6	mm	2.860	2.855		
	Radius 0.44-8	mm	2.820	2.820		
	Radius 0.29-10	mm	2.795	2.795		
Ice growth	Slope 1	W/s	41.5			
	Slope 2	W/s	31.9			
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	4663			
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	158.5	154.5			

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration							
Test Number	SRB-	A-100-I	A-101-I	A-102-I					
Date	A-M-D	2008-08-20	2008-08-20	2008-08-20					
Time	H-M	14h20	15h00	15h40					
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782				
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150				
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314				
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64				
Mass	g								
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36				
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012				
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium					
Hub/ Blade combination	---	1-JR/RJ	1-RR/JJ	1-JR/RJ					
Attack of angle	°	6	6	6					
Twist	°	0	0	0	0				
Spinning Rotor Blade									
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±4	3200±3	3200±3	±			
	Icing	RPM	3200±4	3200±3	3200±3	±			
Power	Frequency	Hz	53	53	53				
	Power	W	1141±1	1151±1	1141±1	±			
Torque (Power/angular speed)	N m								
Trust	N								
Vibration	g	±	±	±	±				
Icing Wind Tunnel Conditions									
Flow	Flow rate	ml/min	206±1	207±1	203±1	±			
	Speed	m/s	14.99±0.18	15.01±0.18	15±00	±			
	Temperature	°C	-5.21±0.31	-5.36±0.33	-5.01±0.38	±			
Median volumetric diameter	µm	26	26	26					
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8					
Time	min:s	1:45	1:20	3:30					
Photo and/or Video									
Photo	---	X	X	X					
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No					
Ice Blade Rotor									
Length shed	mm	0	128	0	153	175	195		
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	2.810		2.790				
	Radius 0.76-4	mm	2.814		2.786				
	Radius 0.60-6	mm	2.800	2.800	2.780				
	Radius 0.44-8	mm	2.810	2.810	2.790	2.790	2.863	2.848	
	Radius 0.29-10	mm	2.790	2.785	2.765	2.767	2.833	2.837	
Ice growth	Slope 1	W/s	19.8				18.1		
	Slope 2	W/s							
	Slope 3	W/s							
	Slope 4	W/s							
	Slope 5	W/s							
Shed	Shed 1	W	3170		2413		4367		
	Color	W							
	Shed 3	W							
Mass after accretion	g	155.8	152.8	154.1	152.0	153.5	152.7		

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration								
Test Number	SRB-	A-104-I	A-105-I	A-106-I	A-107-I					
Date	A-M-D	2008-08-21	2008-08-21	2008-08-21						
Time	H-M	15h	16h	17h						
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782					
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150					
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314					
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64					
Mass	g									
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36					
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012					
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium					
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-JR/RJ	1-RR/JJ					
Attack of angle	°	6	6	6	6					
Twist	°	0	0	0	0					
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±4	3200±2	3200±2	3200±2				
	Icing	RPM	3200±4	3200±3	3200±2	3200±3				
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3				
	Power	W	1164±1	1182±1	1145±1	1215±1				
Torque (Power/angular speed)		N m								
Trust		N								
Vibration		g	±	±	±	±				
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	207±3	208±1	206±1	224±13				
	Speed	m/s	15.00±0.17	14.99±0.16	14.99±0.16	15.00±0.18				
	Temperature	°C	-10.29±0.41	-10.00±0.39	-9.79±0.36	-10.01±0.41				
Median volumetric diameter		µm	26	26	26	26				
Liquid Water content		g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8				
Time		min:s	2:05	1:51	1:45	1:55				
Photo and/or Video										
Photo		---	No	X	X	X				
Video (T: Top & S: Side)		T-S	No	No	No	No				
Ice Blade Rotor										
Length shed		mm	67	104	97	120	0	90	30	0
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm					2.873			2.880
	Radius 0.76-4	mm	2.920				2.864		2.880	2.869
	Radius 0.60-6	mm	2.850	2.855	2.818	2.821	2.819	2.820	2.826	2.820
	Radius 0.44-8	mm	2.852	2.850	2.816	2.820	2.819	2.811	2.830	2.815
	Radius 0.29-10	mm	2.800	2.802	2.780	2.778	2.780	2.775	2.789	2.787
Ice growth	Slope 1	W/s	29.0		33.3		32.9		30.0	
	Slope 2	W/s								
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	4407		4364		4144		3989	
	Color	W								
	Shed 3	W								
Mass after accretion		g	155.7	154.2	154.2	153.2	157.6	153.7	155.4	156.3

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, F: Iced & V: Vibration								
Test Number		SRB-	A-108-I	A-109-I	A-110-I	A-111-I				
Date		A-M-D	2008-08-25	2008-08-25	2008-08-25	2008-08-25				
Time		H-M	11h	13h	14h	15h				
Diameter		m	0.782	0.782	0.782	0.782				
Hub diameter		m	0.150	0.150	0.150	0.150				
Length (insert to tip)		m	0.314	0.314	0.314	0.314				
Chord		mm	69.64	69.64	69.64	69.64				
Mass		g								
Thickness		mm	8.36	8.36	8.36	8.36				
Profile type		NACA	0012	0012	0012	0012				
Profile material		---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium				
Hub/ Blade combination		---								
Attack of angle		°	6	6	6	6				
Twist		°	0	0	0	0				
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±2	3200±4	3200±4	3200±2				
	Icing	RPM	3200±2	3200±4	3200±4	3200±2				
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3				
	Power	W	1219±1	1143±1	1201±1	1140±1				
Torque (Power/angular speed)		N m								
Trust		N								
Vibration		g	±	±	±	±				
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	204±1	193±1	209±1	206±1				
	Speed	m/s	14.99±0.17	14.99±0.17	15.00±0.18	15.00±0.18				
	Temperature	°C	-10.02±0.41	-10.20±0.43	-9.69±0.40	-9.93±0.34				
Median volumetric diameter		µm	26	26	26	26				
Liquid Water content		g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8				
Time		min:s	1:57	1:57	2:07	2:28				
Photo and/or Video										
Photo		---	X	X	X	X				
Video (T: Top & S: Side)		T-S	No	No	No	No				
Ice Blade Rotor										
Length shed		mm	0	97	0	104	0	75	109	109
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	2.865		2.871		2.880			
	Radius 0.76-4	mm	2.860		2.856		2.878			
	Radius 0.60-6	mm	2.815	2.820	2.815	2.816	2.835	2.826	2.835	2.849
	Radius 0.44-8	mm	2.824	2.812	2.798	2.802	2.835	2.818	2.847	2.836
	Radius 0.29-10	mm	2.788	2.774	2.770	2.763	2.785	2.784	2.800	2.790
Ice growth	Slope 1	W/s	28.6		26.7		30.1			
	Slope 2	W/s								
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	3958		3768		4282		4725	
	Color	W								
	Shed 3	W								
Mass after accretion		g	156.8		156.3	153.0	157.6	154.6	154.5	153.9

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration			
Test Number	SRB-	A-112-I	A-113-I	A-114-I	A-115-I	
Date	A-M-D	2008-08-26	2008-08-26	2008-08-26	13h00	
Time	H-M	13h00	16h	17h		
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Microstructure	
Hub/ Blade combination	---	-	1-JR/RJ	1-RR/JJ	-	
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±4	±	3200±2	3200±4
	Icing	RPM	3200±3	±	3200±3	3179±4
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3
	Power	W	2869±1	±	1147±1	2847±1
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	201±4	±	210±1	213±5
	Speed	m/s	14.97±0.29	±	14.44±0.20	14.99±0.34
	Temperature	°C	-9.89±0.32	±	-9.10±0.37	-10.29±0.30
Median volumetric diameter	µm	26	26	26	26	
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	0:30			1:26	0:32
Photo and/or Video						
Photo	---	No	X	X	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm		0	0	0	0
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	2.865	2.874	2.840	2.841
	Radius 0.76-4	mm	2.858	2.858	2.830	2.837
	Radius 0.60-6	mm	2.823	2.815	2.800	2.805
	Radius 0.44-8	mm	2.822	2.821	2.805	2.805
	Radius 0.29-10	mm	2.795	2.783	2.775	2.774
Ice growth	Slope 1	W/s	23.1		33.9	
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W				
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g					

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A-116-I	A-117-I	A-118-I	A-119-I	
Date	A-M-D	2008-08-27	2008-08-27	2008-08-27	2008-08-27	
Time	H-M	14h	15h	16h		
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Alu- Micro	Aluminium	
Hub/ Blade combination	---	1-JR/RJ	1-RR/JJ		1-RR/JJ	
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±4	3200±5	3200±3	3200±3
	Icing	RPM	3200±4	3200±4	3200±3	3200±3
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3
	Power	W	1283±1	1201±1	2920±1	1240±1
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	207±1	207±1	200±1	199±51
	Speed	m/s	15.00±0.17	14.97±0.24	14.99±0.17	15.00±0.16
	Temperature	°C	-9.78±0.39	-10.96±0.34	-9.61±0.33	-19.16±0.22
Median volumetric diameter	µm	26	26	26	26	
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	1:40	2:07	0:32	3:14	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	X	No	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	0	0	59	93	-
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	2.862	2.880		2.796
	Radius 0.76-4	mm	2.861	2.863	2.890	
	Radius 0.60-6	mm	2.820	2.820	2.848	2.857
	Radius 0.44-8	mm	2.825	2.818	2.830	2.850
	Radius 0.29-10	mm	2.800	2.788	2.800	2.794
Ice growth	Slope 1	W/s	31.0		33.3	
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W				4914
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	Surface	155.5	153.8		169.4

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration								
Test Number	SRB-	A-120-I	A-121-I	A-122-I	A-123-I					
Date	A-M-D	2008-08-28	2008-08-28	2008-08-28	2008-08-29					
Time	H-M	14h00	15h00	16h00	13h00					
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782					
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150					
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314					
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64					
Mass	g									
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36					
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012					
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium					
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-JR/RJ	1-JR/RJ					
Attack of angle	°	6	6	6	6					
Twist	°	0	0	0	0					
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±2	3200±3	3200±3	3200±4				
	Icing	RPM	3199±3	3200±2	3200±2	3200±4				
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3				
	Power	W	1261±11	1202±16	1248±1	1159±1				
Torque (Power/angular speed)	N m									
Trust	N									
Vibration	g	±	±	±	±					
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	213±2	205±5	215±15	212±2				
	Speed	m/s	15.01±0.17	15.01±0.17	14.99±0.17	14.99±0.18				
	Temperature	°C	-18.72±0.18	-18.79±0.19	-18.30±0.19	-4.73±0.22				
Median volumetric diameter	µm	26	26	26	26					
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8					
Time	min:s	2:23	4:14	2:46	2:10					
Photo and/or Video										
Photo	---	X	No	X	X					
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No					
Ice Blade Rotor										
Length shed	mm	0	49	0	0	81	71	0	180	
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	3.232		3.275	3.286		2.832		
	Radius 0.76-4	mm	3.224	3.223	3.145	3.140	(3.005)	3.011	2.830	
	Radius 0.60-6	mm	2.879	2.895	2.905	2.926	2.863	2.862	2.822	
	Radius 0.44-8	mm	2.904	2.905	2.930	2.9354	2.885	2.886	2.815	2.815
	Radius 0.29-10	mm	2.859	2.843	2.850	2.850	2.828	2.811	2.800	2.802
Ice growth	Slope 1	W/s	26.4		18.9		19.5			
	Slope 2	W/s								
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	3798				3365		3612	
	Color	W								
	Shed 3	W								
Mass after accretion	g	168.7	162.7	Surface	157.1	156.7	157.4	152.3		

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration							
Test Number		SRB-	A-124-I	A-125-I	A-126-I	A-127-I				
Date		A-M-D	2008-08-29	2008-08-29	2008-08-29	2008-08-29				
Time		H-M	14h	15h	15h45	16h30				
Diameter		m	0.782	0.782	0.782	0.782				
Hub diameter		m	0.150	0.150	0.150	0.150				
Length (insert to tip)		m	0.314	0.314	0.314	0.314				
Chord		mm	69.64	69.64	69.64	69.64				
Mass		g								
Thickness		mm	8.36	8.36	8.36	8.36				
Profile type		NACA	0012	0012	0012	0012				
Profile material		---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium				
Hub/ Blade combination		---	1-RR/JJ	1-JR/RJ	1-JR/RJ	1-RR/JJ				
Attack of angle		°	6	6	6	6				
Twist		°	0	0	0	0				
Spinning Rotor Blade										
Angular speed	Stabilization	RPM	3199±4	3200±4	3200±2	3200±4				
	Icing	RPM	3199±4	3199±4	3200±2	3200±4				
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3				
	Power	W	1146±1	1147±1	1139±2	1149±1				
Torque (Power/angular speed)		N m								
Trust		N								
Vibration		g	±	±	±	±				
Icing Wind Tunnel Conditions										
Flow	Flow rate	ml/min	204±2	205±4	208±3	202±3				
	Speed	m/s	15.00±0.20	14.97±0.33	15.00±0.19	15.00±0.18				
	Temperature	°C	-5.18±0.36	-6.14±0.26	-4.69±0.29	-5.07±0.29				
Median volumetric diameter		µm	26	26	26	26				
Liquid Water content		g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8				
Time		min:s	1:43	1:52	2:41	3:11				
Photo and/or Video										
Photo		---	X	X	No	X				
Video (T: Top & S: Side)		T-S	No	No	No	No				
Ice Blade Rotor										
Length shed		mm	0	140	0	139	0	148	203	Rem.
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	2.816		2.818		2.833			2.840
	Radius 0.76-4	mm	2.816		2.810		2.855			2.867
	Radius 0.60-6	mm	2.812		2.805		2.830			
	Radius 0.44-8	mm	2.815	2.815	2.795	2.797	2.830	2.832		2.843
	Radius 0.29-10	mm	2.792	2.791	2.788	2.789	2.810	2.825		2.848
Ice growth	Slope 1	W/s	24.8		25.9		20.8		21.9	
	Slope 2	W/s								
	Slope 3	W/s								
	Slope 4	W/s								
	Slope 5	W/s								
Shed	Shed 1	W	3000		3385		3562		4510	
	Color	W								
	Shed 3	W								
Mass after accretion		g	155.2	152.5	156.1	152.5	256.9	153.4	153.1	157.8

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A-128-I	A-129-I	A-130-I	A-131-I	
Date	A-M-D	2008-08-29	2008-09-01	2008-09-01	2008-09-01	
Time	H-M	17h15	14h00	15h00	16h00	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Microstructure	Aluminium		
Hub/ Blade combination	---	1-JR/RJ	-	1-JR/RJ	-	
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±4	3200±3	3200±2	3199±3
	Icing	RPM	3200±4	3200±3	3200±2	3200±3
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3
	Power	W	1137±1	2889±2	1212±1	2881±1
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	211±7	210.3±	206±2	197±3
	Speed	m/s	15.00±0.17	14.99±0.18	15.01±0.17	15.00±0.18
	Temperature	°C	-4.96±0.34	-4.57±0.34	-4.72±0.29	-4.75±0.31
Median volumetric diameter	µm	26	26	26	26	
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	2:15	0:31	2:19	0:49	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	No	X	No	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	0	130		0	214
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	2.805		2.828	
	Radius 0.76-4	mm	2.822		2.830	
	Radius 0.60-6	mm	2.816	2.819	2.816	
	Radius 0.44-8	mm	2.811	2.816	2.821	
	Radius 0.29-10	mm	2.801	2.821	2.797	2.795
Ice growth	Slope 1	W/s	20.8	18.5	21.7	13.9
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	2990		3495	
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	Surface			Surface	

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A-132-I	A-133-I	A-134-I	A-135-I	
Date	A-M-D	2008-09-02	2008-09-02	2008-09-02	2008-09-02	
Time	H-M	11h30	12h30	15h30	16h30	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Microstructure	Aluminium	Aluminium	
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	-	1-RR/JJ	1-JR/RJ	
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±2	3200±3	3200±4	3200±4
	Icing	RPM	3200±3	3200±2	3200±4	3199±4
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3
	Power	W	1146±6	2844±1	1196±3	1173±3
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	202±3	203±3	207±3	209±11
	Speed	m/s	14.99±0.18	15.01±0.17	15.00±0.26	15.00±0.21
	Temperature	°C	-4.47±0.29	-4.74±0.37	-20.60±0.21	-18.33±0.21
Median volumetric diameter	µm	26	26	26	26	
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	2:07	0:50	5:00	4:15	
Photo and/or Video						
Photo	---	No	No	X	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	135	0	-	0	45
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	2.801		3.467	
	Radius 0.76-4	mm	2.826		3.147	3.187
	Radius 0.60-6	mm	(2.805)	2.805	3.005	3.008
	Radius 0.44-8	mm	2.805	2.807	2.938	2.945
	Radius 0.29-10	Mm	2.790	2.795	2.880	2.887
Ice growth	Slope 1	W/s	19.0	15.6	19.2	20.2
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	3155		4087	4160
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	Surface			170.4	163.1
					161.5	162.2

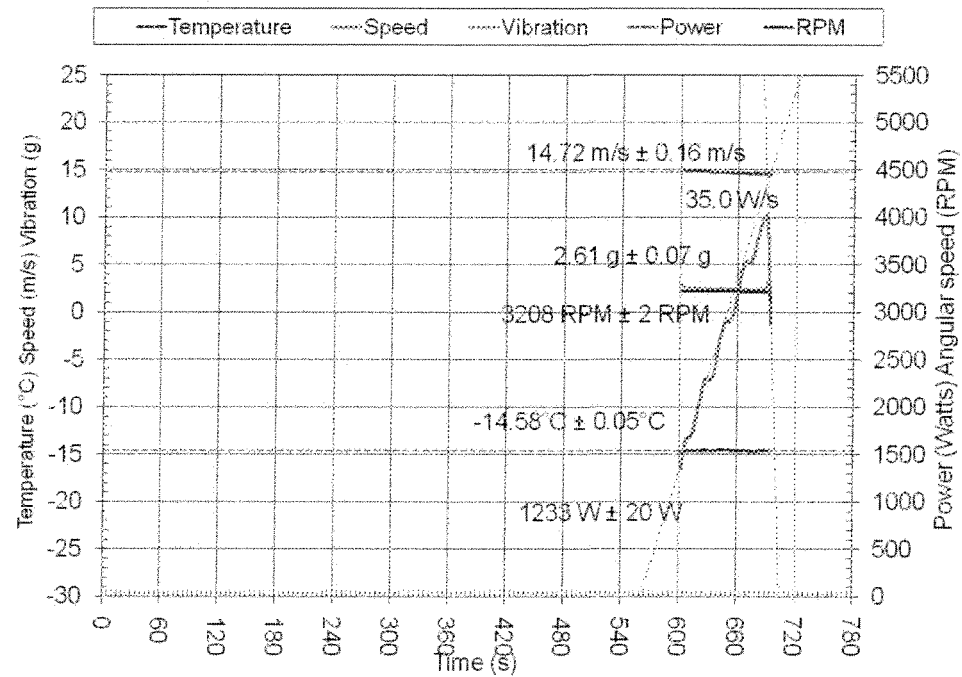
Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A-136-I	A-137-I	A-138-I	A-139-I	
Date	A-M-D	2008-09-02	2008-09-03	2008-09-05	2008-09-05	
Time	H-M	17h30	11h00	13h00	14h00	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Microstructure	
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	1-RR/JJ	1-JR/RJ	-	
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±4	3200±4	3200±3	3200±3
	Icing	RPM	3199±4	3200±3	3200±3	3200±2
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3
	Power	W	1182±3	1183±4	1162±3	3001±1
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	203±3	197±3	207±4	204±4
	Speed	m/s	14.99±0.18	10.00±0.30	15.01±0.21	15.01±0.16
	Temperature	°C	-18.35±0.20	-19.93±0.20	-19.09±0.29	-18.47±0.22
Median volumetric diameter	µm	26	26	26	26	
Liquid Water content	g/m ³	0.8		0.8	0.8	
Time	min:s	3:20	4:21	5:00	1:00	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	X	No	No	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	27	0	77	67	-
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	(3.146)	3.151		3.125
	Radius 0.76-4	mm	3.053	3.065	(3.060)	3.090
	Radius 0.60-6	mm	2.883	2.885	3.086	3.058
	Radius 0.44-8	mm	2.888	2.886	2.952	2.945
	Radius 0.29-10	mm	2.828	2.818	2.930	2.930
Ice growth	Slope 1	W/s	20.8		20.9	15.4
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	3646		3775	No
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	160.6	163.5	161.7	161.6	Surface

Blade Rotor			A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration			
Test Number	SRB-	A-140-I	A-141-I	A-142-I	A-143-I	
Date	A-M-D	2008-09-08	2008-09-08	2008-09-08	2008-09-08	
Time	H-M	13h50	14h40	15h35	16h10	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Microstructure	Aluminium	Aluminium	
Hub/ Blade combination	---	1-RR/JJ	-	1-JR/RJ	1-RR/JJ	
Attack of angle	°	6	6	6	6	
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±4	3200±3	3200±2	3200±2
	Icing	RPM	3200±4	3200±2	3200±3	3200±3
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3
	Power	W	1243±1	2884±1	1296±1	1207±5
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	203±2	202±2	204±1	201±2
	Speed	m/s	14.98±0.31	14.99±0.18	15.00±0.18	15.00±0.17
	Temperature	°C	-19.63±0.20	-18.21±0.21	-18.68±0.23	-18.50±0.19
Median volumetric diameter	µm	26	26	26	26	
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	3:41	0:40	3:02	2:27	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	No	X	X	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	0	46	-	-	35
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm	3.296			3.137
	Radius 0.76-4	mm	3.135	3.165		3.056
	Radius 0.60-6	mm	2.937	2.935		3.035
	Radius 0.44-8	mm	2.909	2.907		2.880
	Radius 0.29-10	mm	2.845	2.845		2.868
Ice growth	Slope 1	W/s	20.1		14.3	20.0
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	4133			3385
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	166.8	161.7			160.5
						162.3
						Surface

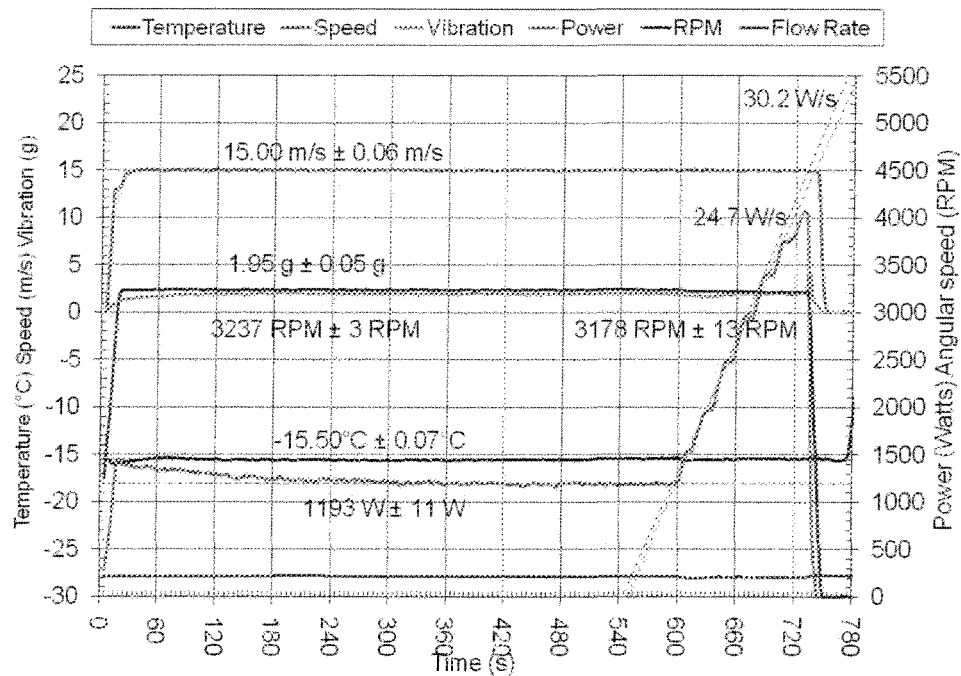
Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A-144-I	A-145-I	A-146-I	A-147-I	
Date	A-M-D	2008-09-08	2008-09-08	2008-09-09	2008-09-09	
Time	H-M	17h15	18h00	11h50	12h50	
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Microstructure	Microstructure	Aluminium	
Hub/ Blade combination	---		-	-	1-RR/JJ	
Attack of angle	°	6	6	6		
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3200±2	3200±3	3200±3	3200±4
	Icing	RPM	3199±3	3200±3	3200±3	3199±4
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	53.3
	Power	W	1168±1	3289±1	2941±1	1255±1
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	205±2	199±3	202±3	198±2
	Speed	m/s	15.00±0.17	15.02±0.19	15.00±0.18	15.00±0.18
	Temperature	°C	-18.68±0.21	-18.10±0.22	-13.97±0.20	-15.16±0.21
Median volumetric diameter	µm	26	26	26	26	
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8	0.8	
Time	min:s	3:09	0:33	0:33	2:00	
Photo and/or Video						
Photo	---	X	No	No	No	
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No	No	
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm	38	38			
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm				
	Radius 0.76-4	mm	3.010	3.026		
	Radius 0.60-6	mm	2.845	2.858		
	Radius 0.44-8	mm	2.868	2.855		
	Radius 0.29-10	mm	2.810	2.820		
Ice growth	Slope 1	W/s	20.0	9.8	22.8	23.2
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W	3399			
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	158.9	159.3			

Blade Rotor		A: Adhesion, C: Clean, I: Iced & V: Vibration				
Test Number	SRB-	A-148-I	A-149-I	A-150-I		
Date	A-M-D	2008-09-09	2008-09-09	2008-09-09		
Time	H-M	14h00	14h45	15h45		
Diameter	m	0.782	0.782	0.782	0.782	
Hub diameter	m	0.150	0.150	0.150	0.150	
Length (insert to tip)	m	0.314	0.314	0.314	0.314	
Chord	mm	69.64	69.64	69.64	69.64	
Mass	g					
Thickness	mm	8.36	8.36	8.36	8.36	
Profile type	NACA	0012	0012	0012	0012	
Profile material	---	Aluminium	Aluminium	Microstructure		
Hub/ Blade combination	---	1-JR/RJ	1-JR/RJ	-		
Attack of angle	°	6	6	6		
Twist	°	0	0	0	0	
Spinning Rotor Blade						
Angular speed	Stabilization	RPM	3199±4	3200±3	3200±3	±
	Icing	RPM	3199±4	3201±2	3200±3	±
Power	Frequency	Hz	53.3	53.3	53.3	
	Power	W	1128±3	1140±1	2862±1	±
Torque (Power/angular speed)	N m					
Trust	N					
Vibration	g	±	±	±	±	
Icing Wind Tunnel Conditions						
Flow	Flow rate	ml/min	212±15	204±10	207±2	±
	Speed	m/s	15.01±0.20	15.01±0.19	14.99±0.17	±
	Temperature	°C	-14.94±0.20	-14.40±0.21	-13.89±0.24	±
Median volumetric diameter	µm	26	26	26		
Liquid Water content	g/m ³	0.8	0.8	0.8		
Time	min:s	2:02	2:10	0:34		
Photo and/or Video						
Photo	---	No	No	No		
Video (T: Top & S: Side)	T-S	No	No	No		
Ice Blade Rotor						
Length shed	mm		0	88		
Ice thickness Leading edge	Radius 0.92-2	mm		3.000		
	Radius 0.76-4	mm		2.942		
	Radius 0.60-6	mm		2.841	2.845	
	Radius 0.44-8	mm		2.839	2.840	
	Radius 0.29-10	mm		2.805	2.800	
Ice growth	Slope 1	W/s	21.5	24.1		
	Slope 2	W/s				
	Slope 3	W/s				
	Slope 4	W/s				
	Slope 5	W/s				
Shed	Shed 1	W				
	Color	W				
	Shed 3	W				
Mass after accretion	g	Surface	Surface			

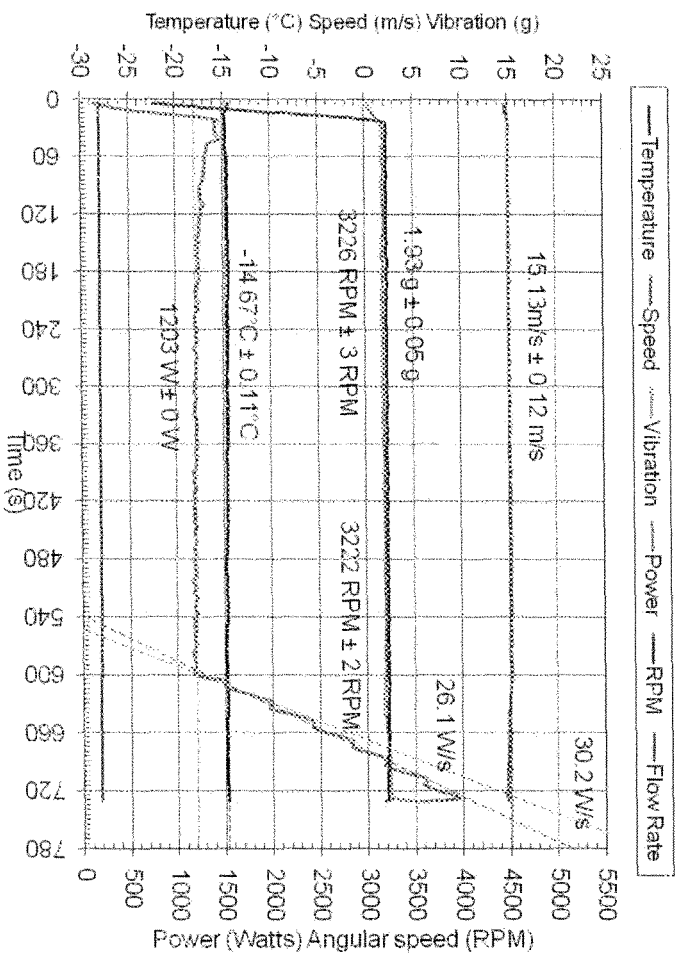
**ANNEXE 3 : GRAPHIQUE DE RÉSULTATS POUR L'ENSEMBLE
DES ESSAIS SRB-II**



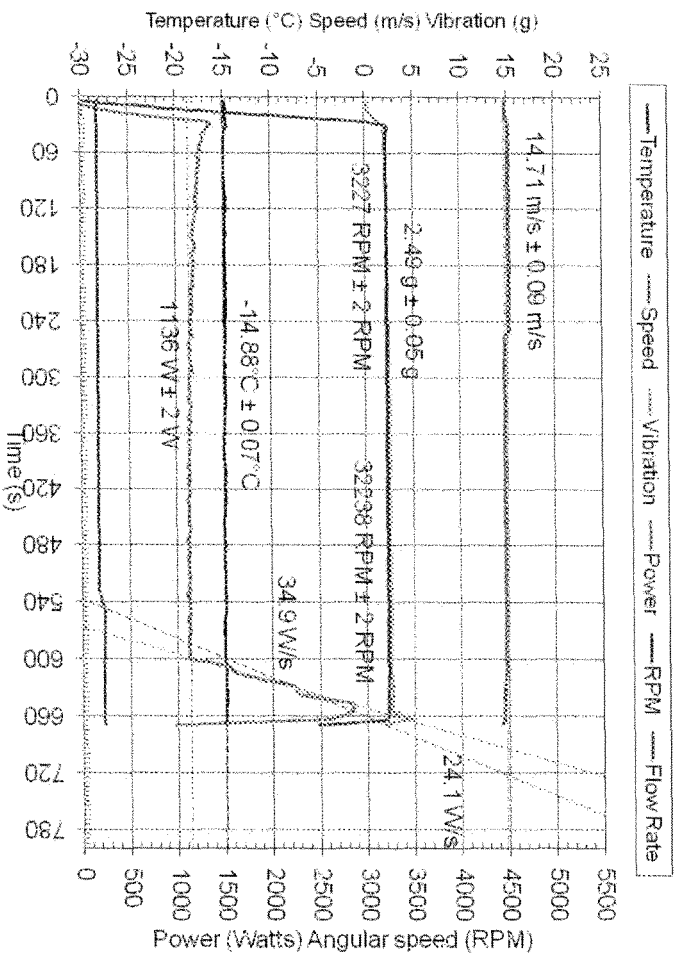
SRB-II 001



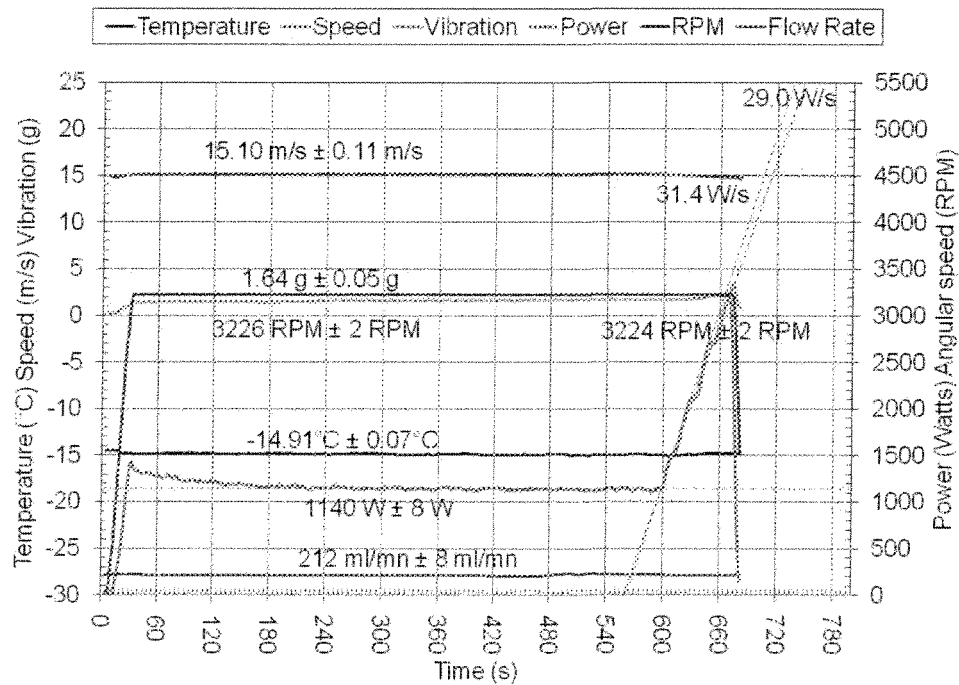
SRB-II 002



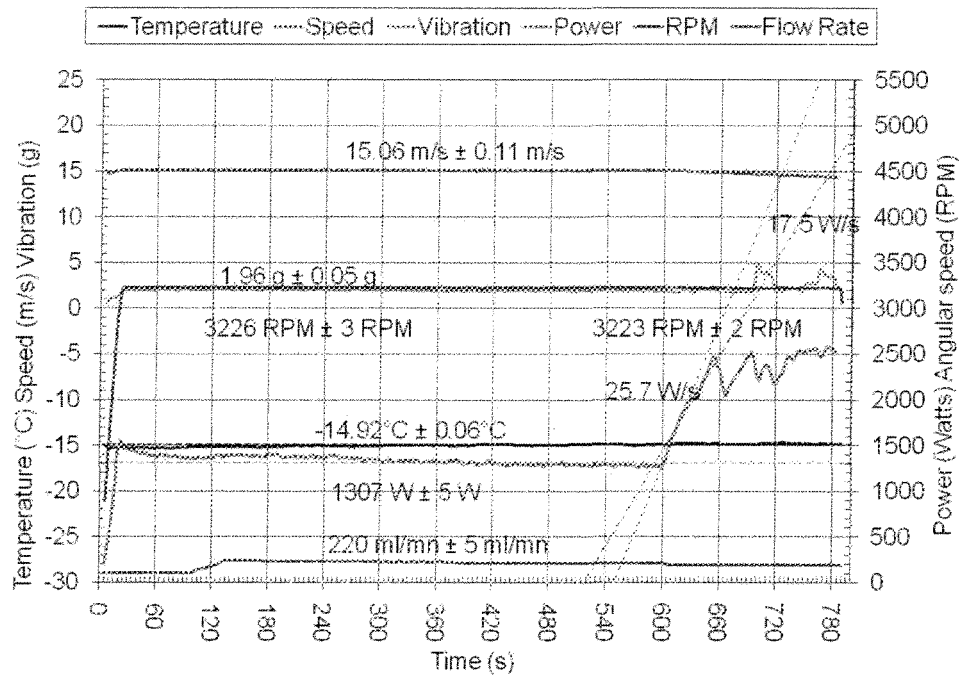
SRB-II 003



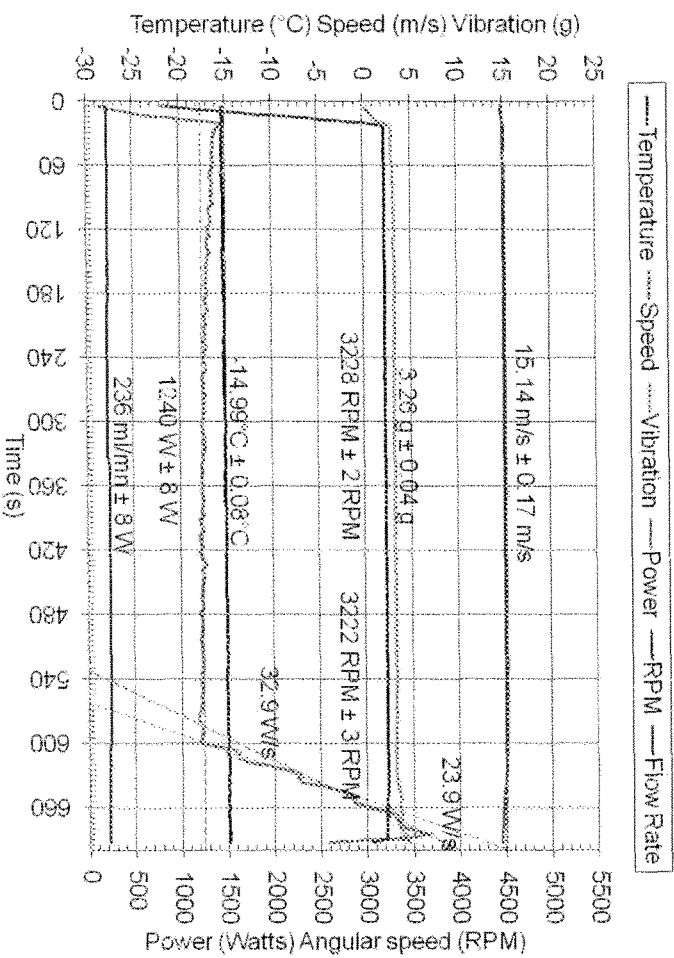
SRB-II 004



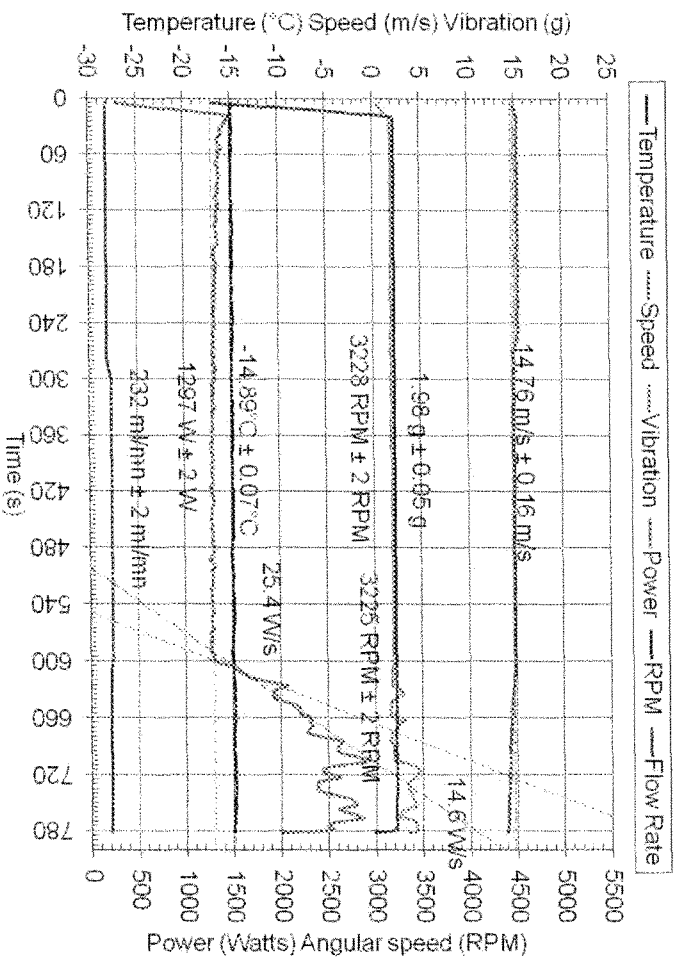
SRB-II 005



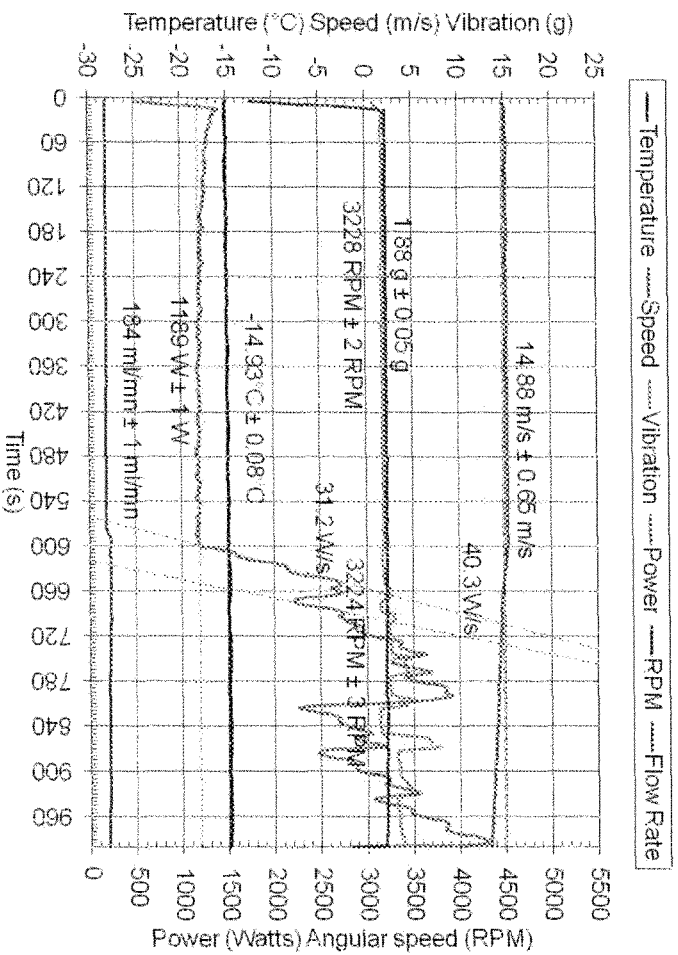
SRB-II 006



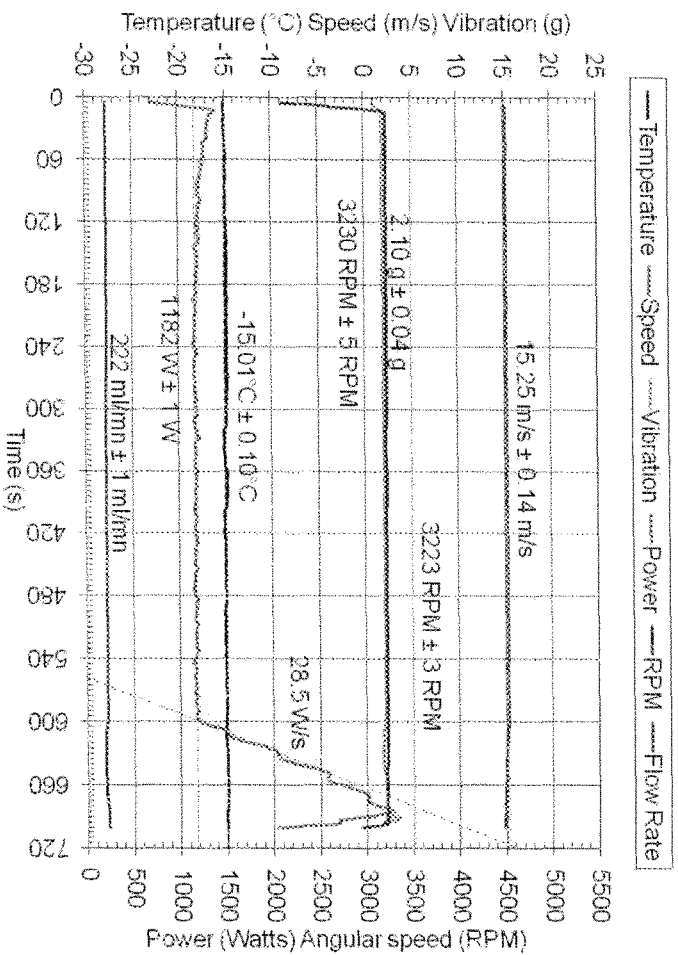
SRB-II 007



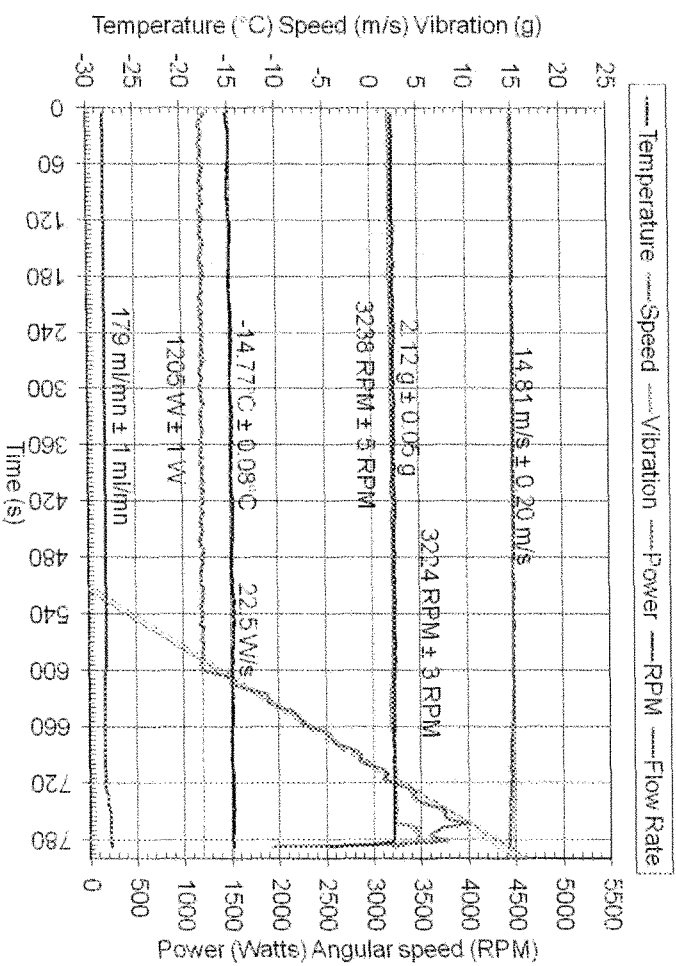
SRB-II 008



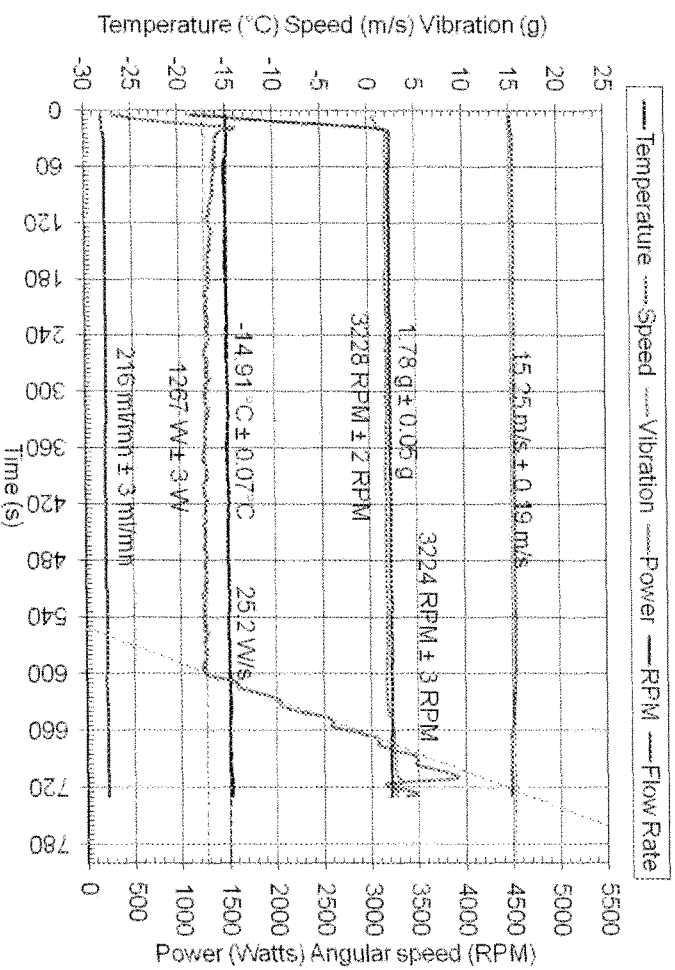
SRB-II 009



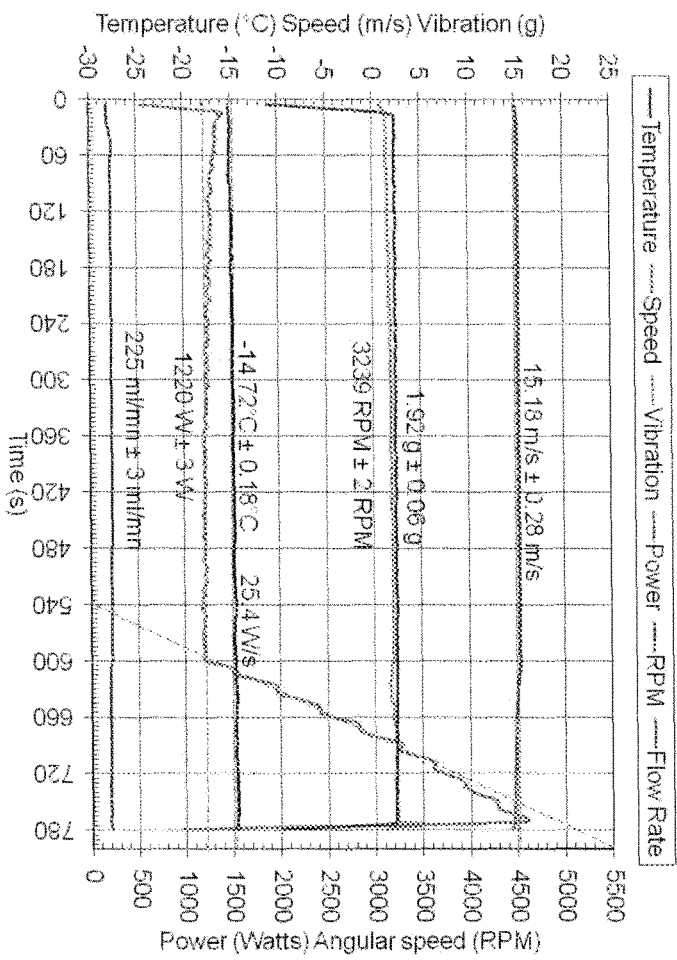
SRB-II 010



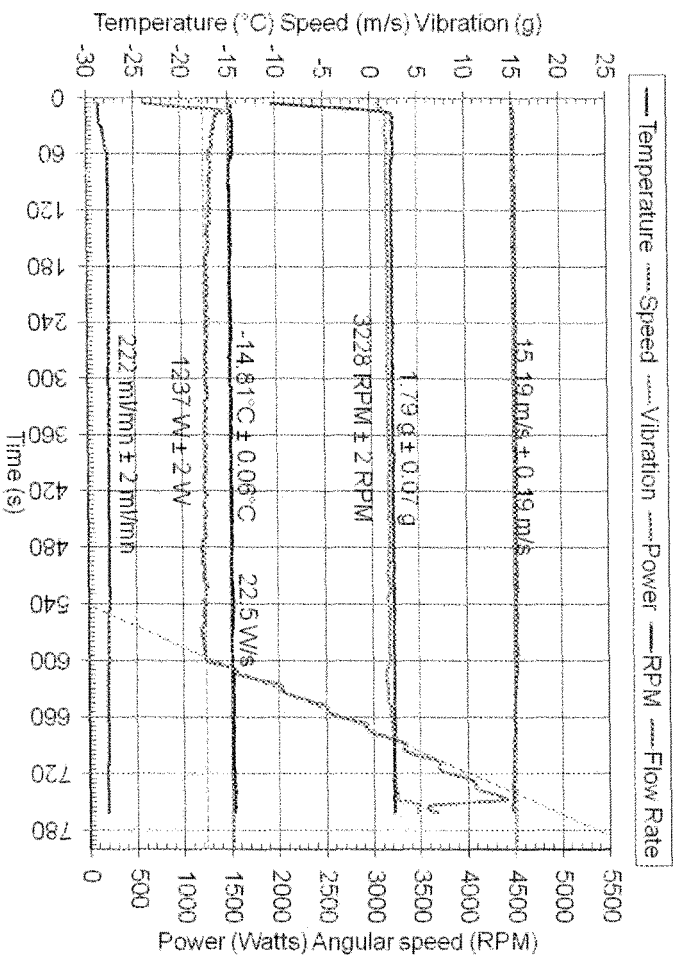
SRB-II 011



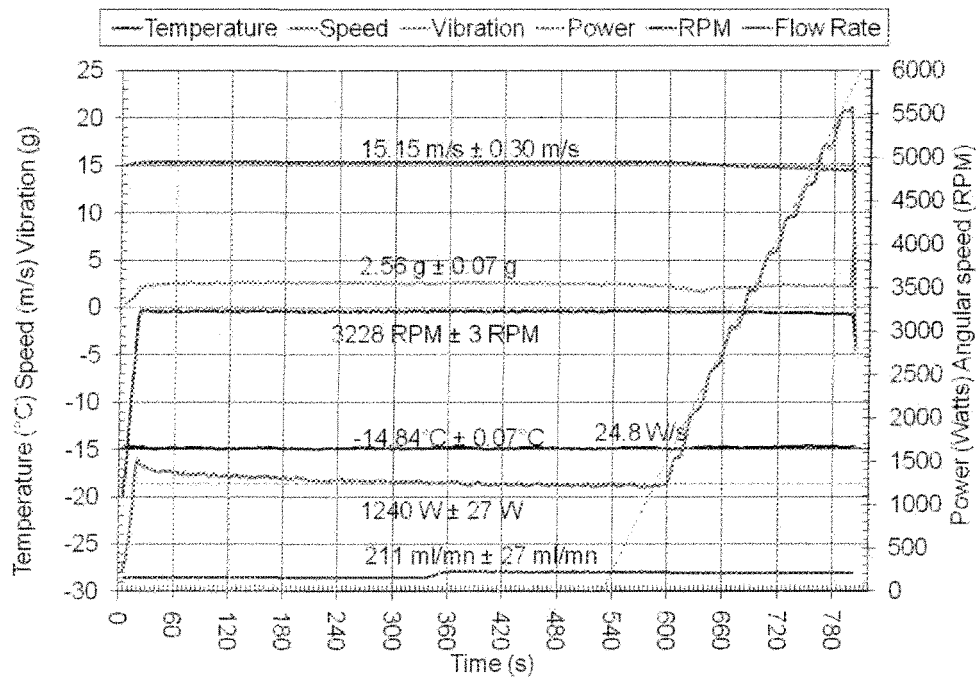
SRB-II 012



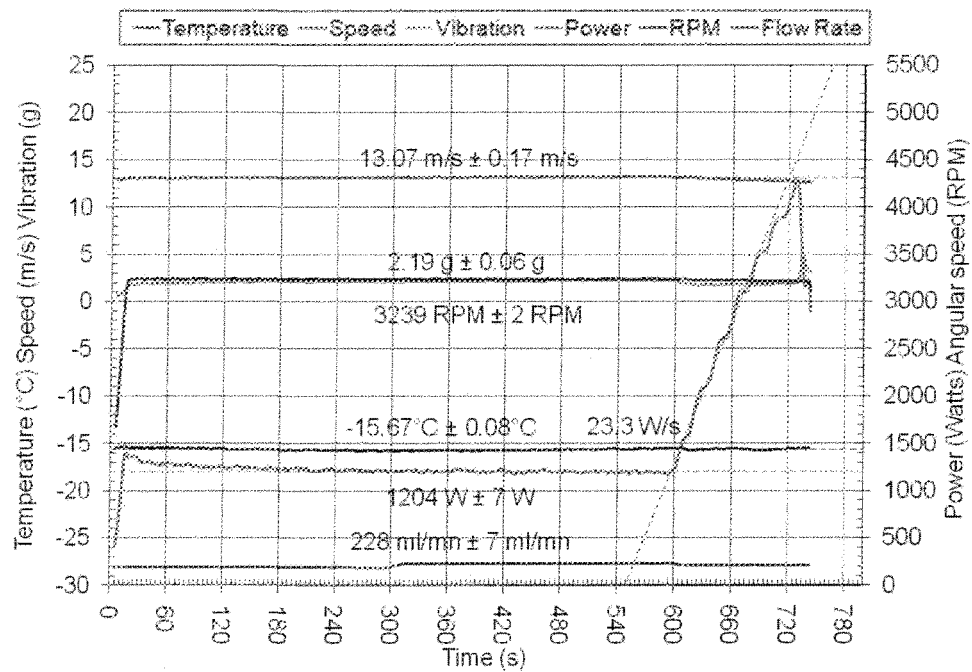
SRB-II 013



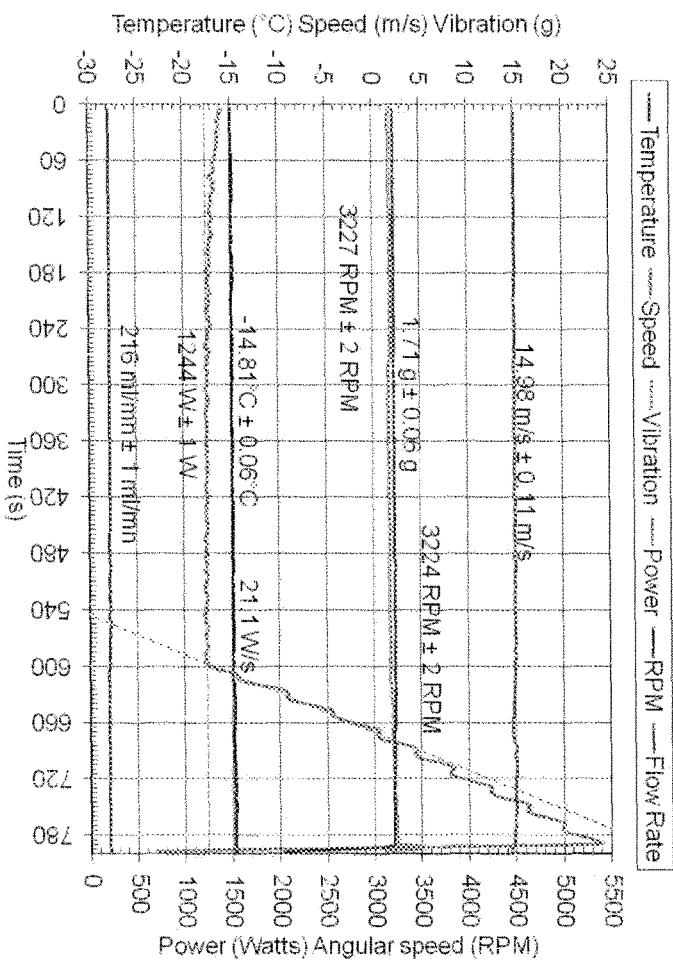
SRB-II 014



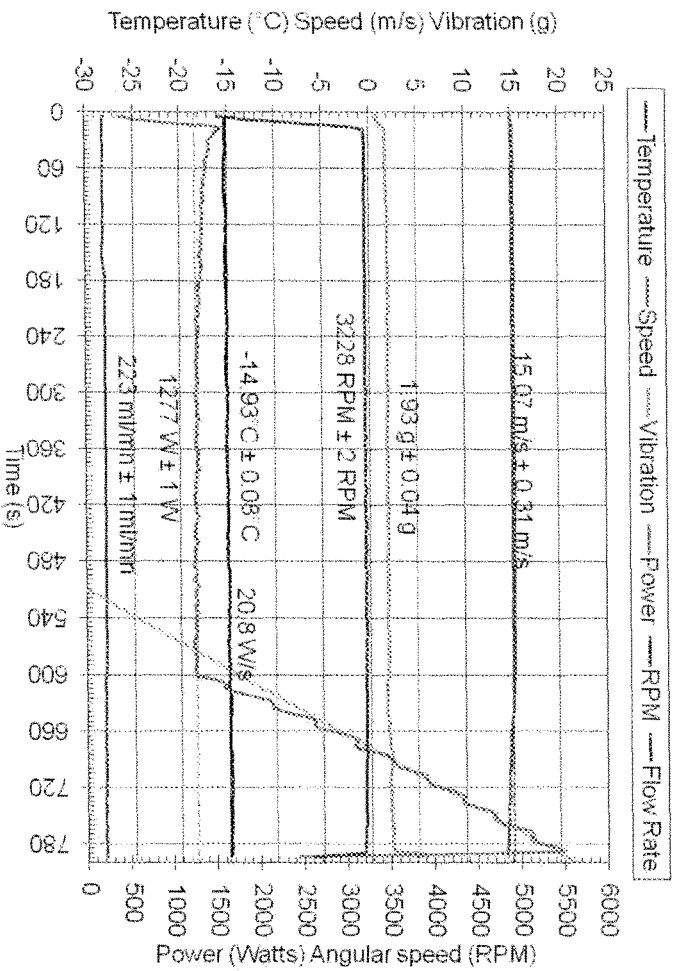
SRB-II 015



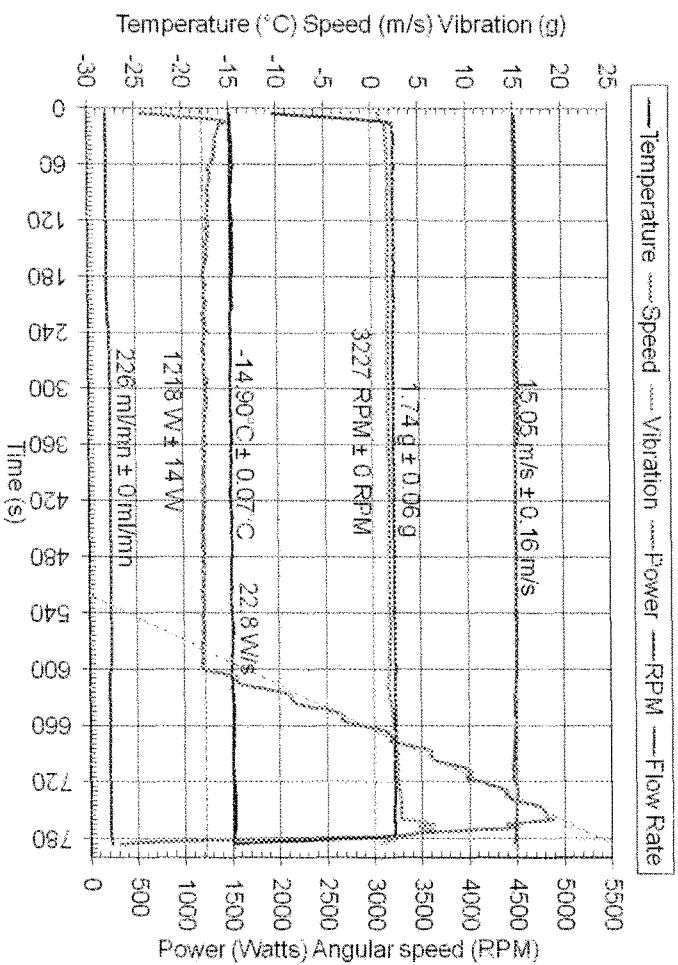
SRB-II 016



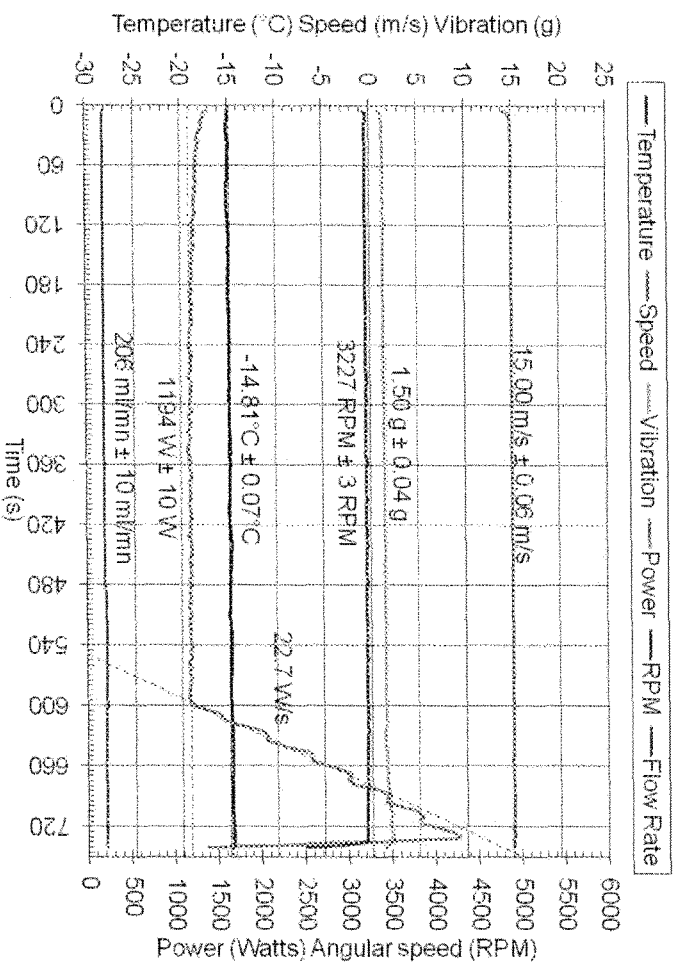
SRB-II 017



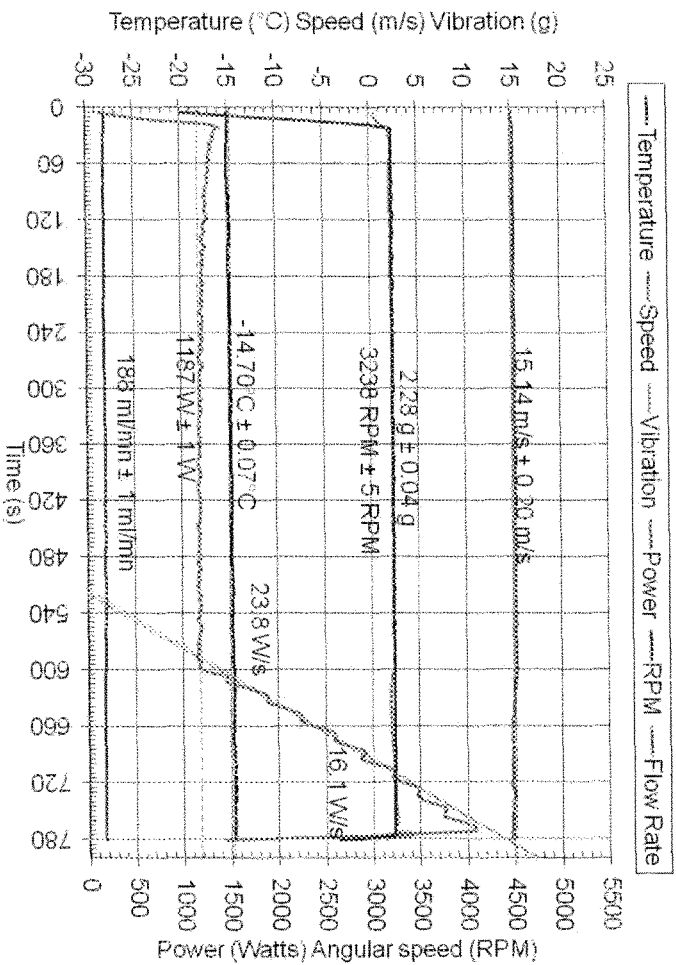
SRB-II 018



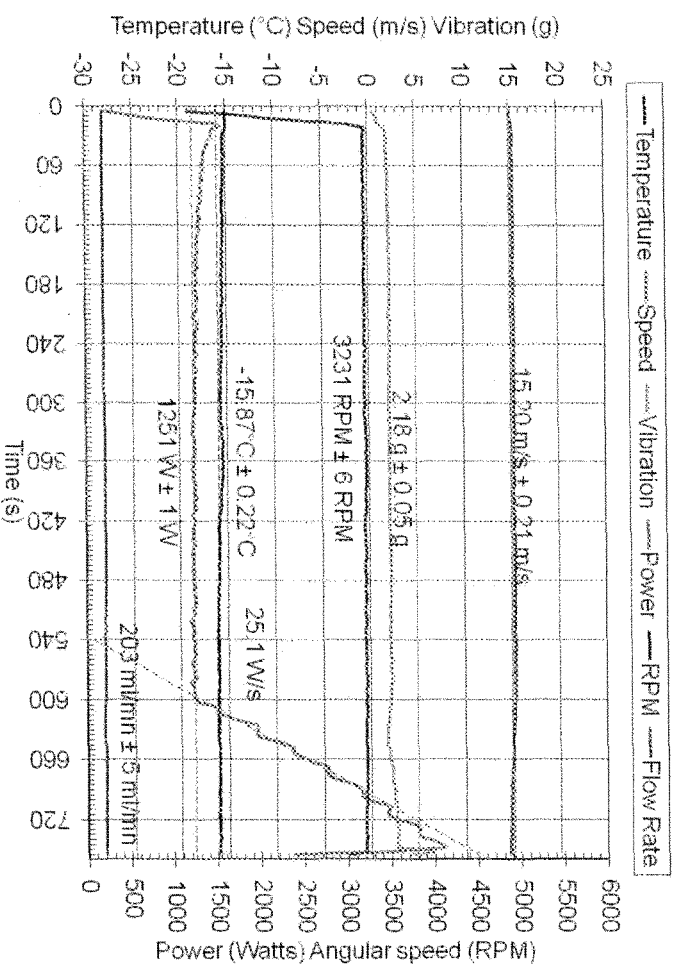
SRB-II 019



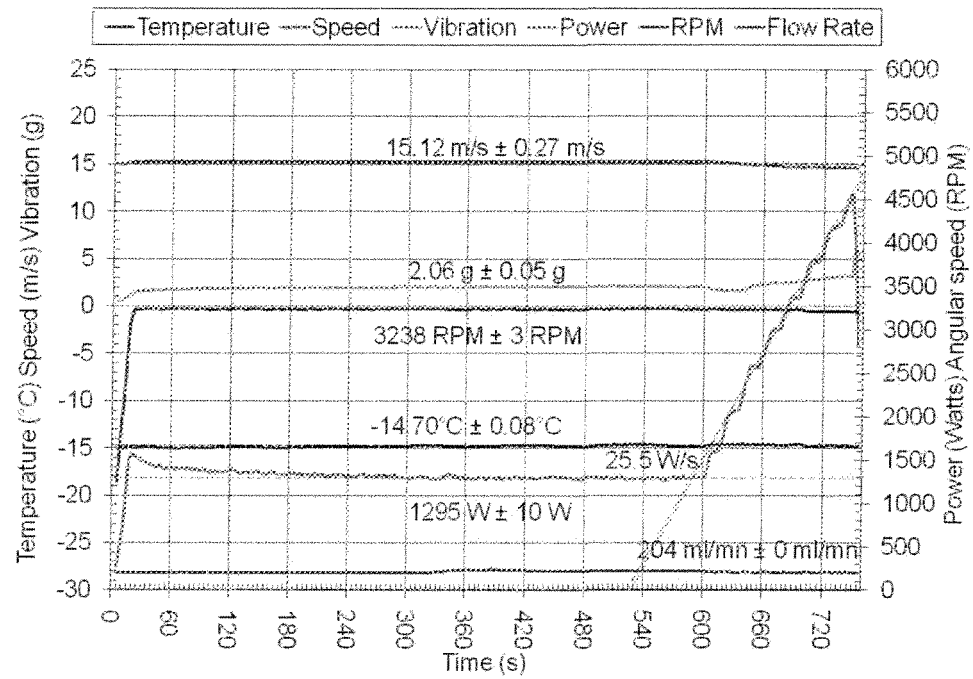
SRB-II 020



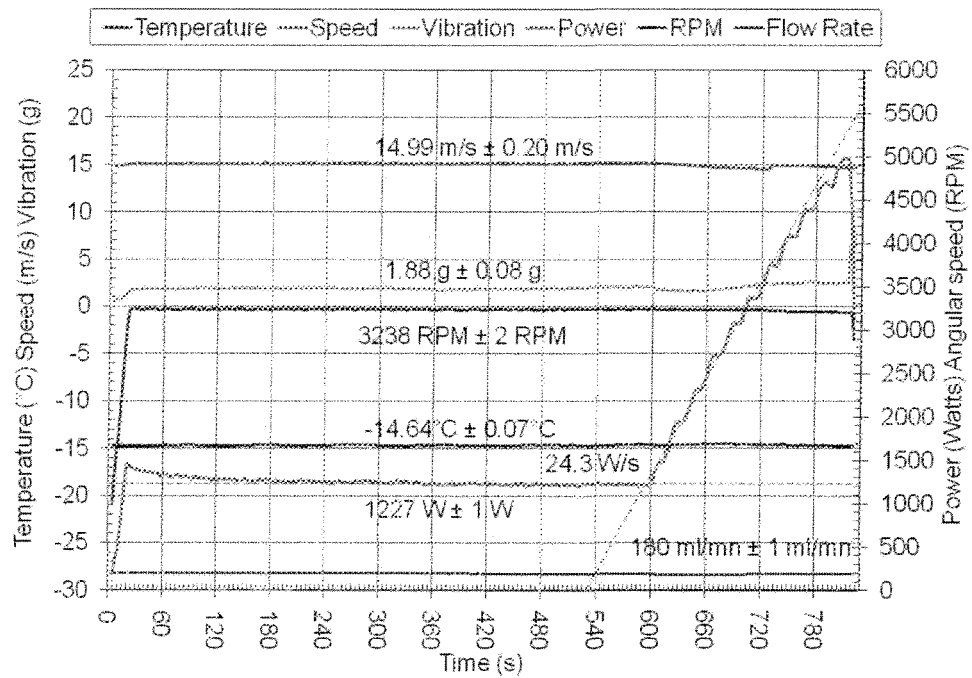
SRB-II 021



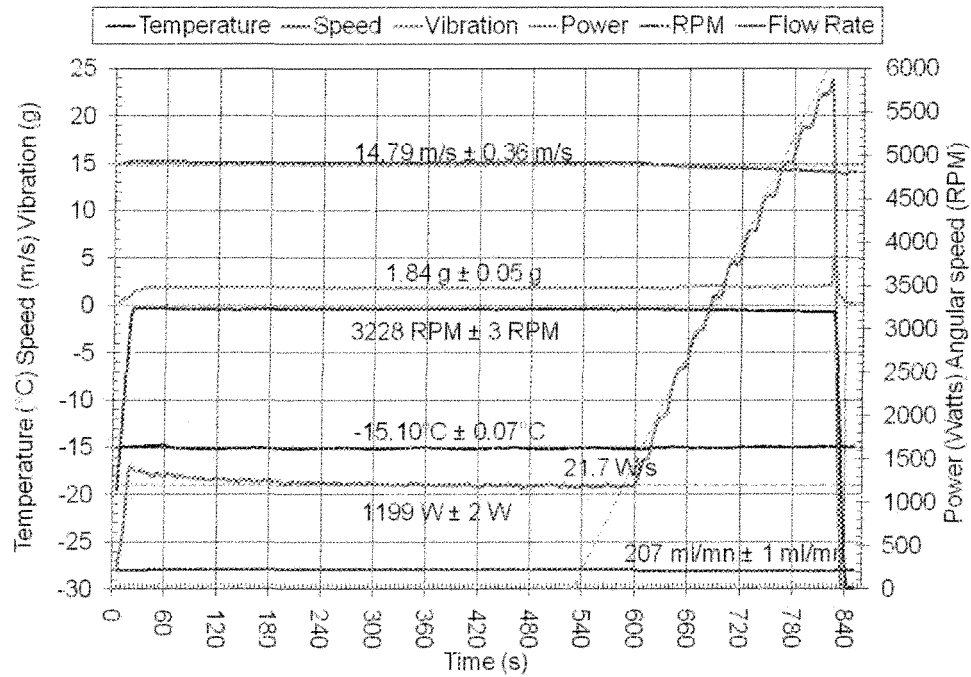
SRB-II 022



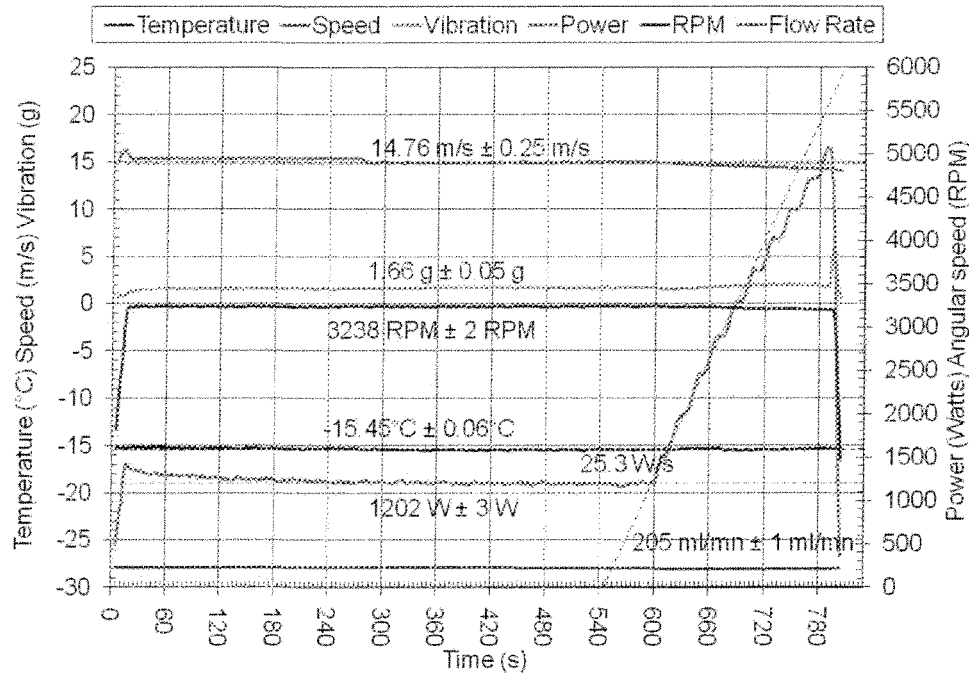
SRB-II 023



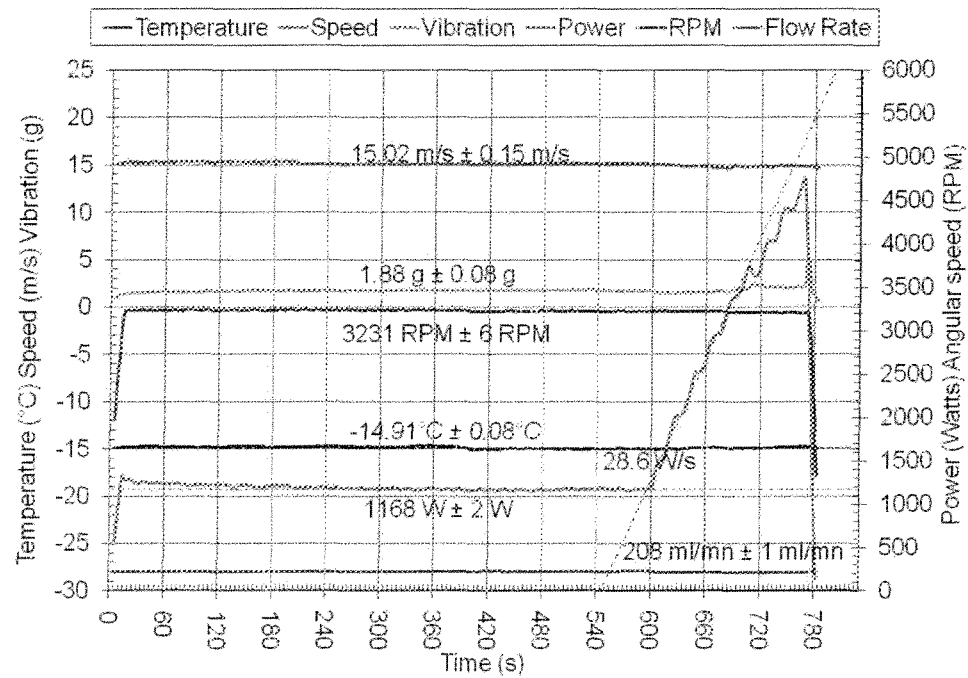
SRB-II 024



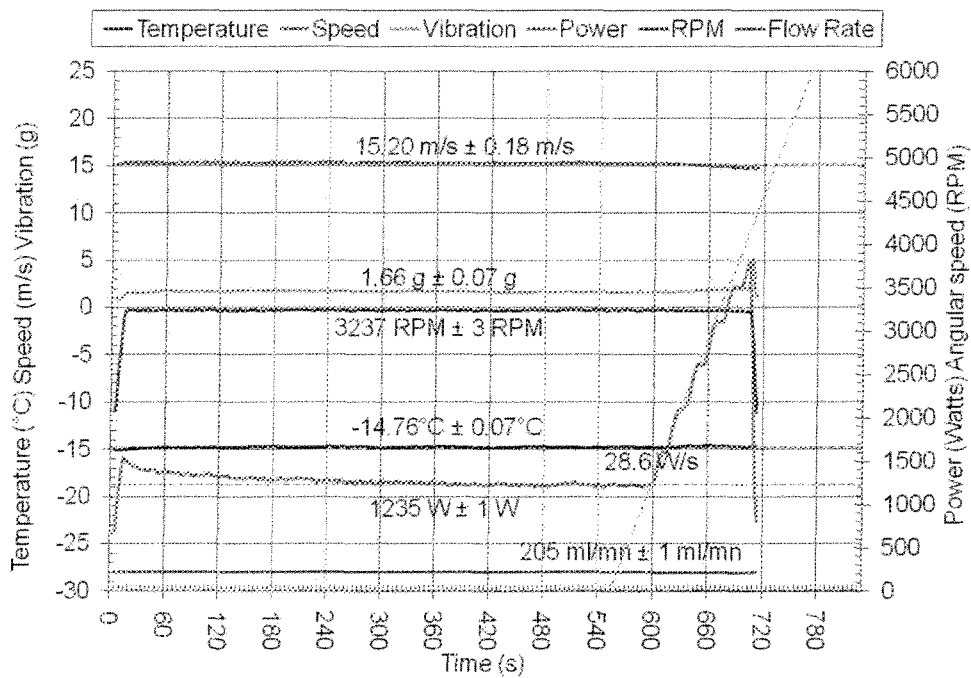
SRB-II 025



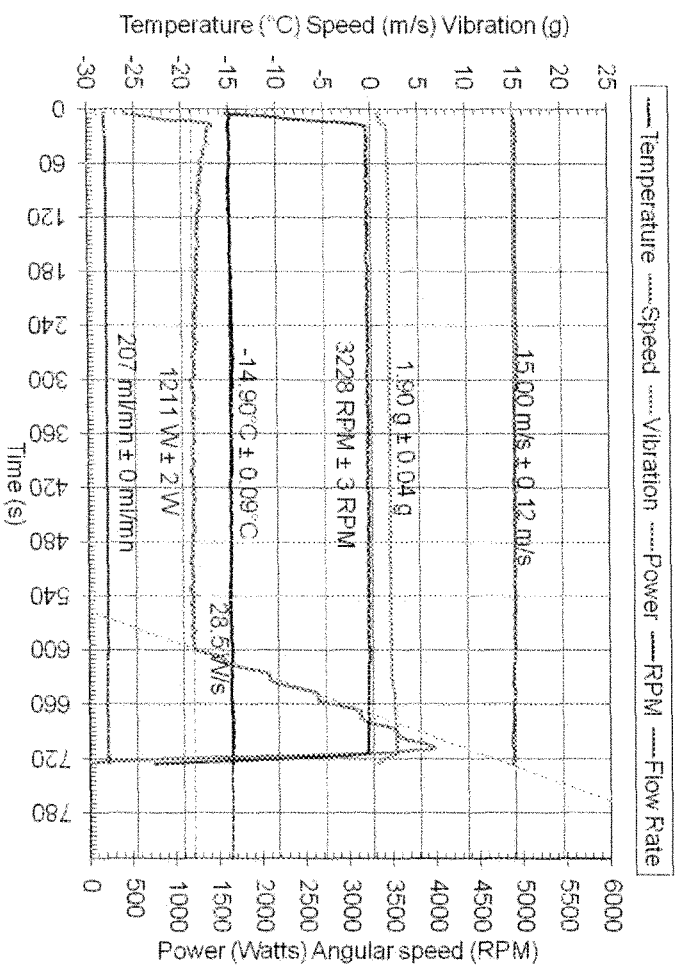
SRB-II 026



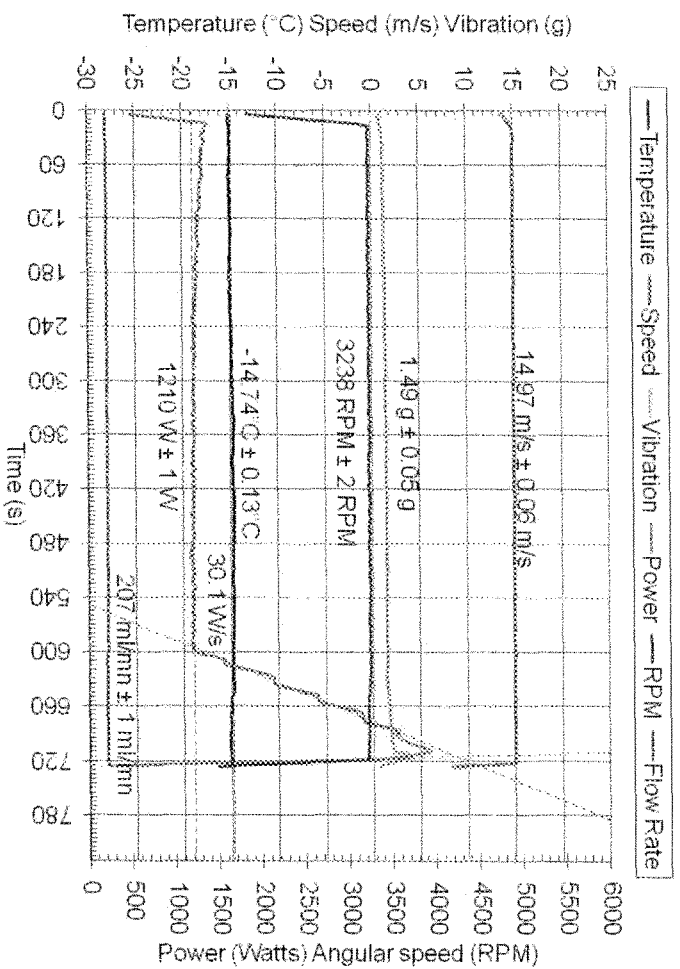
SRB-II 027

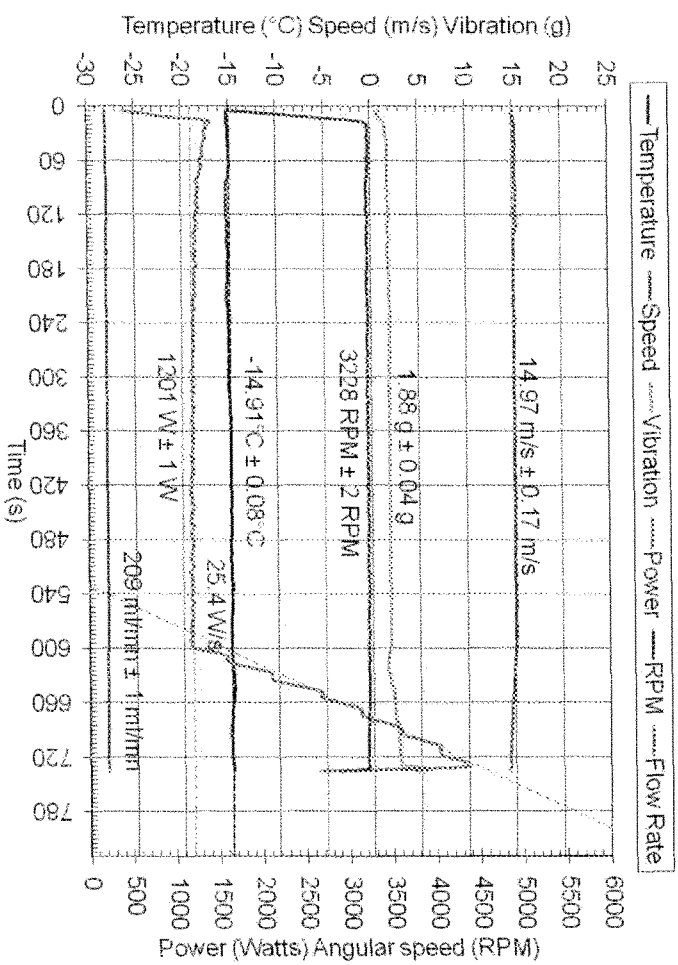


SRB-II 028

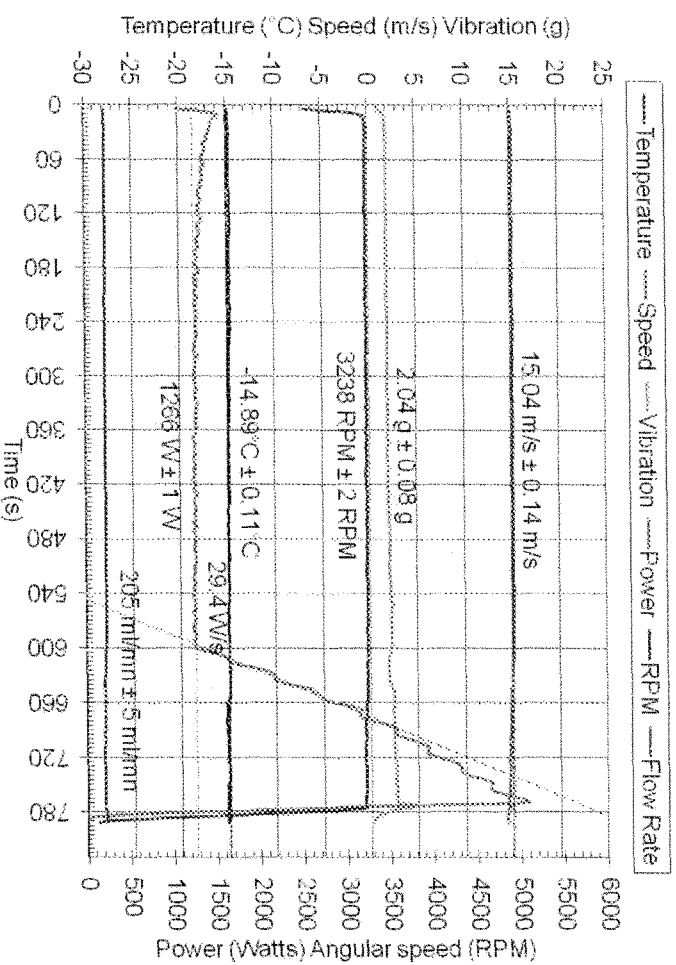


SRB-II 029

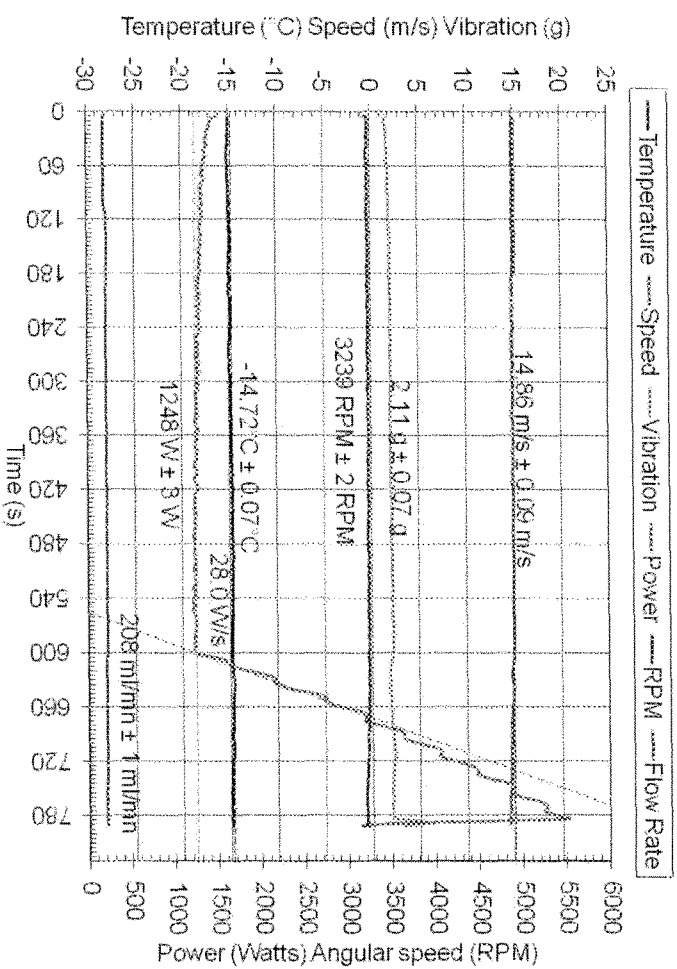




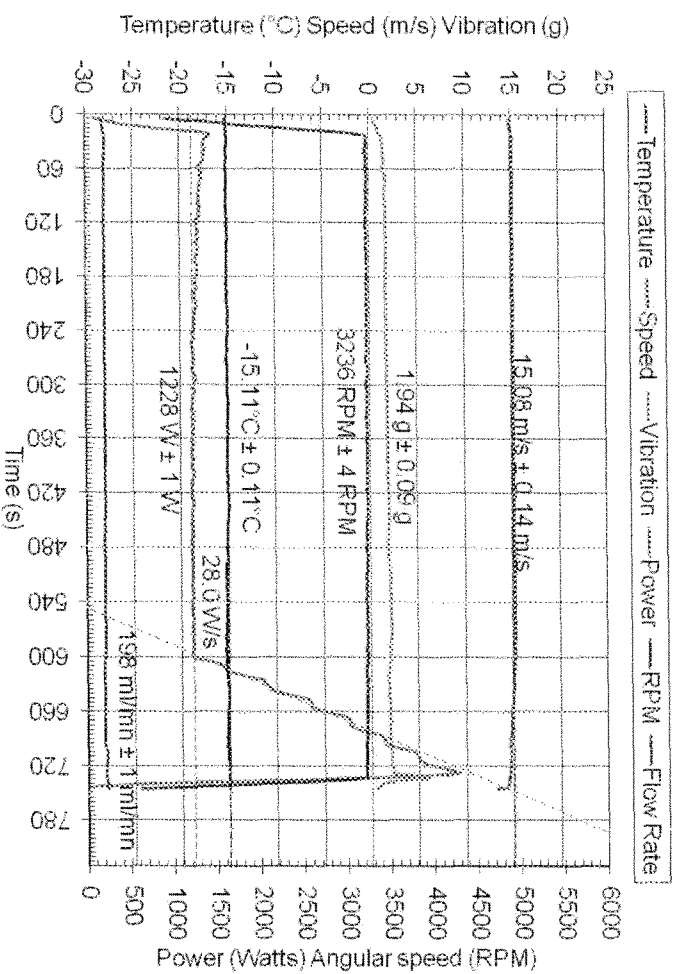
SRB-II 031



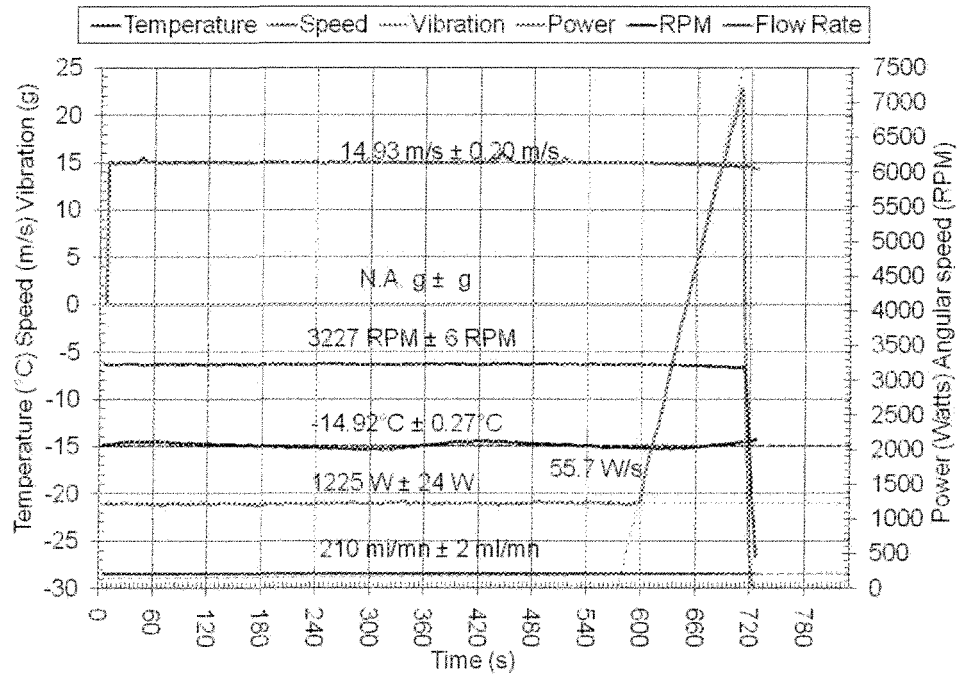
SRB-II 032



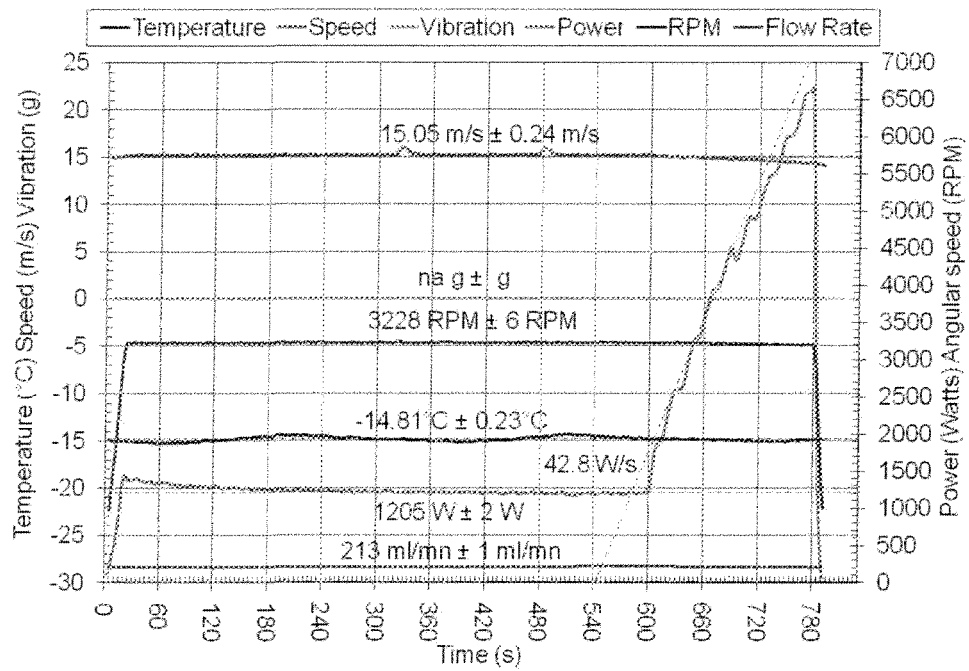
SRB-II 033



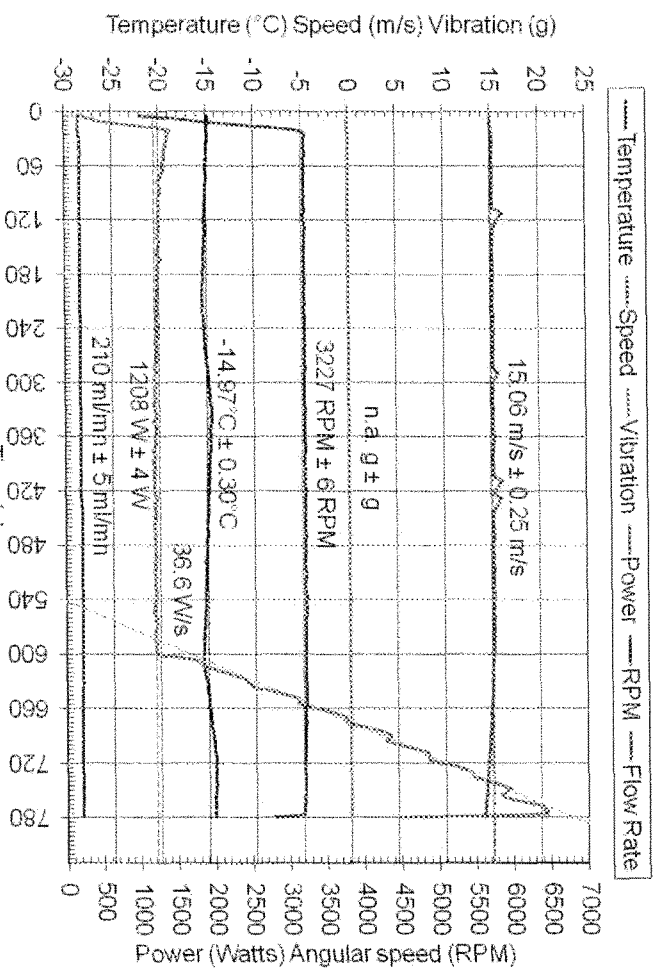
SRB-II 034



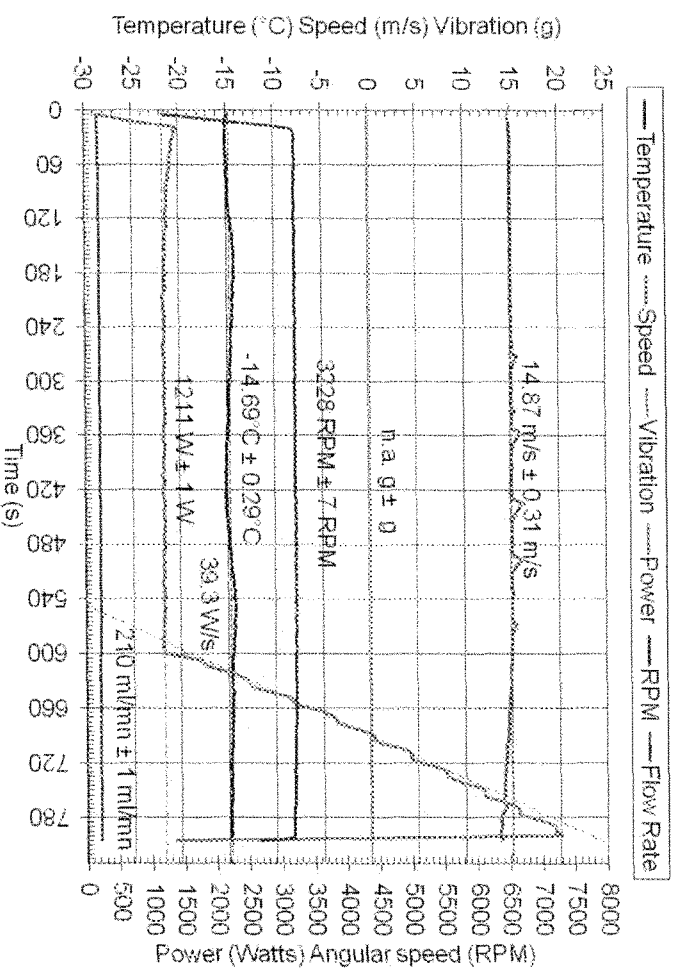
SRB-II 035



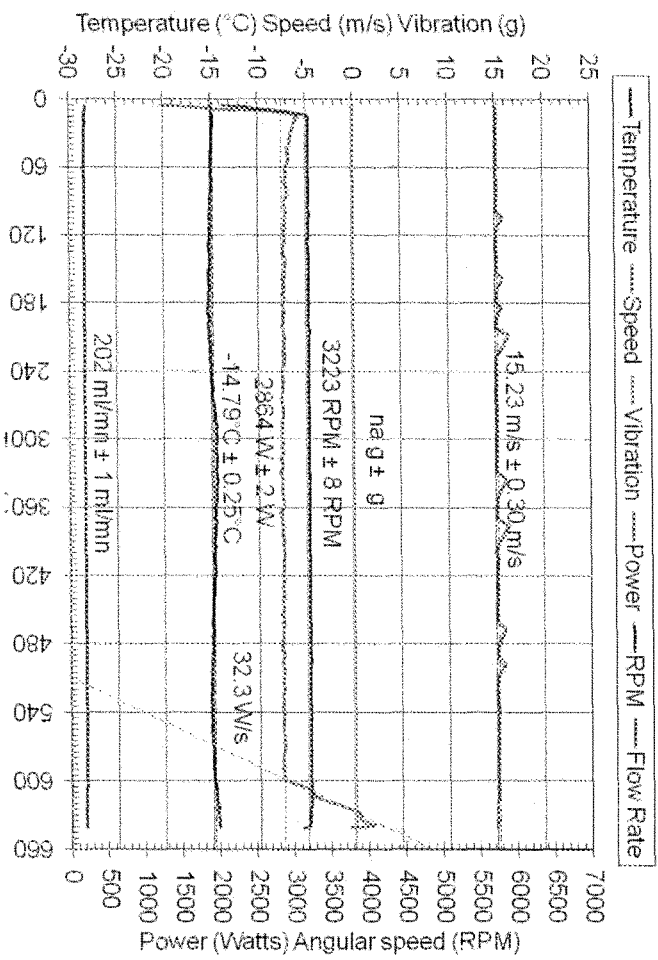
SRB-II 036



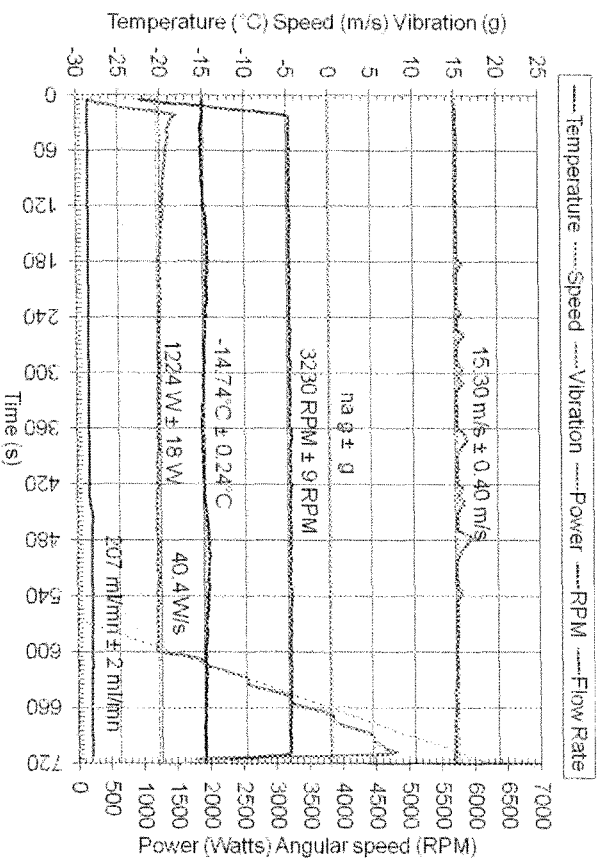
SRB-II 037



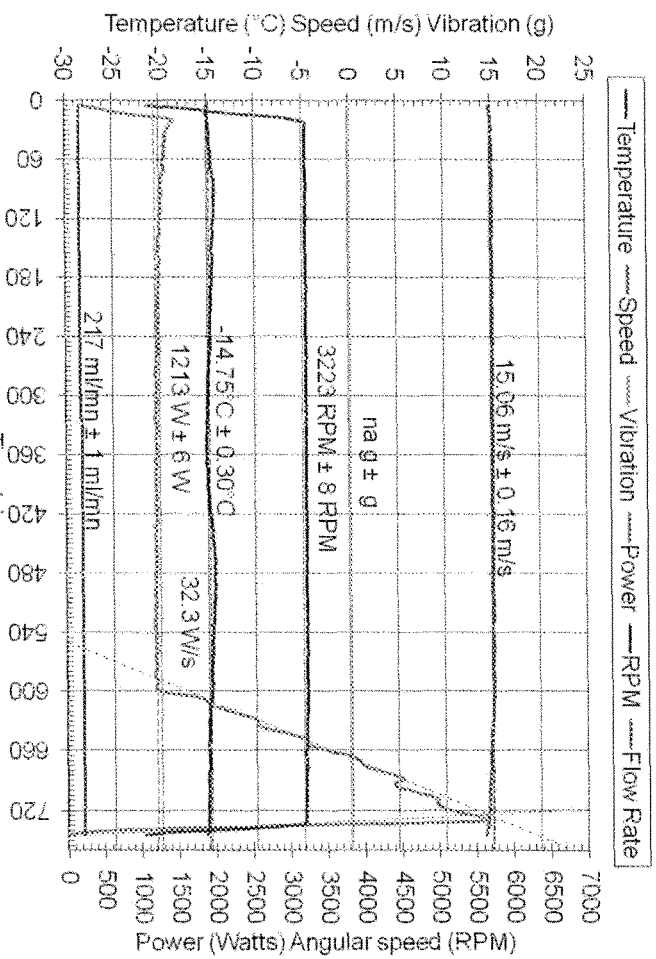
SRB-II 038



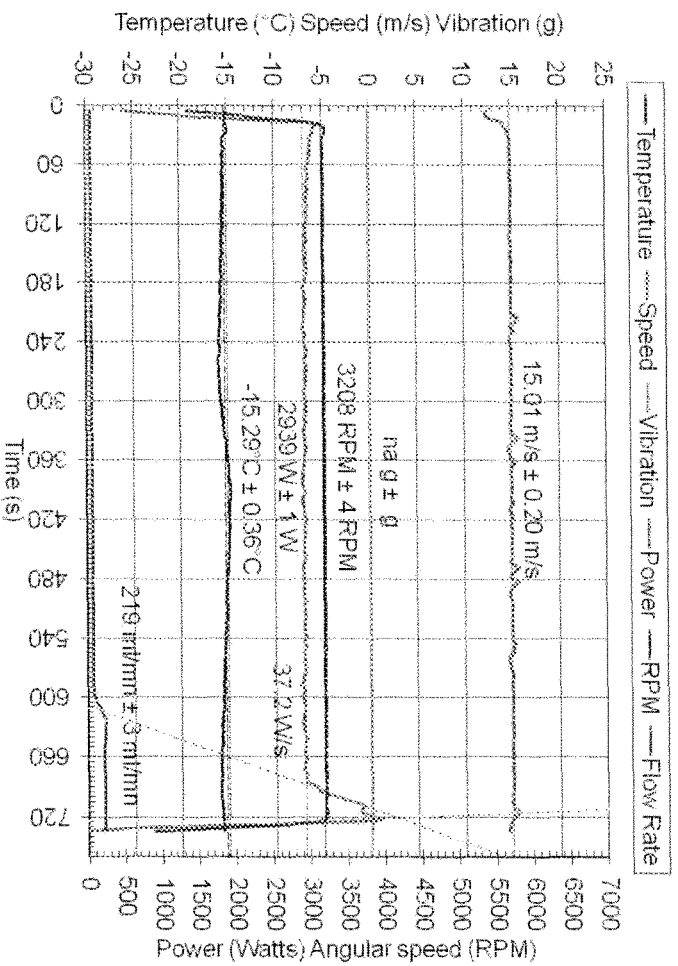
SRB-II 039



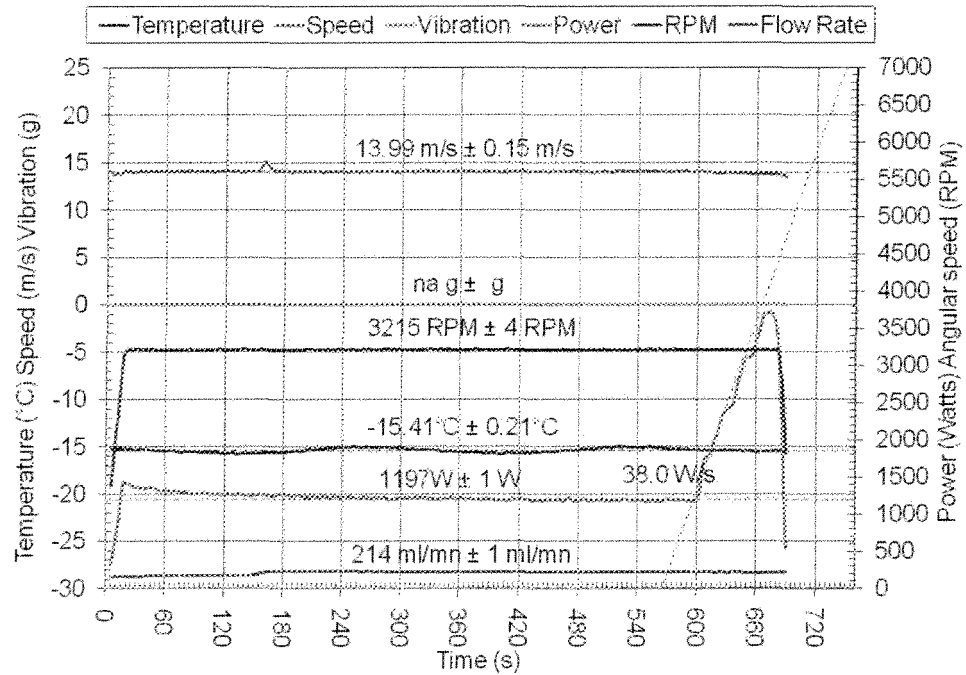
SRB-II 040



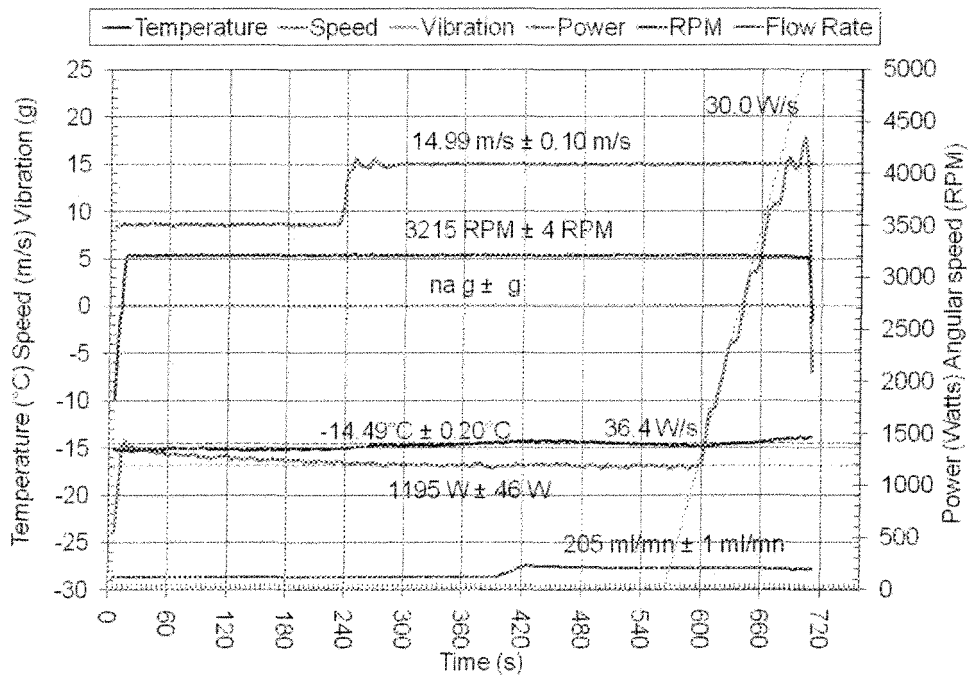
SRB-II 041



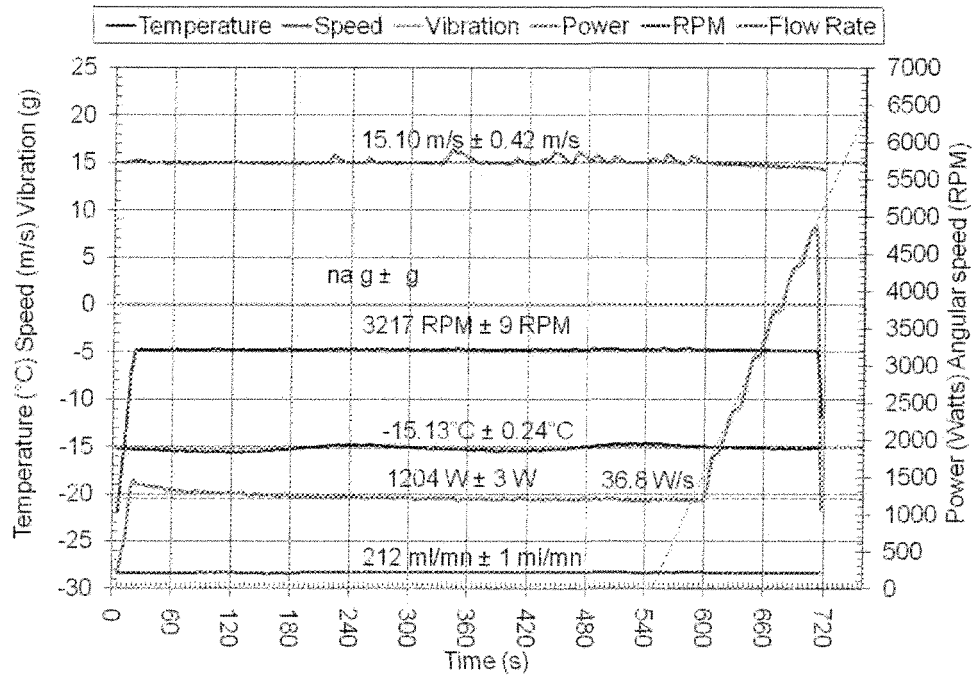
SRB-II 042



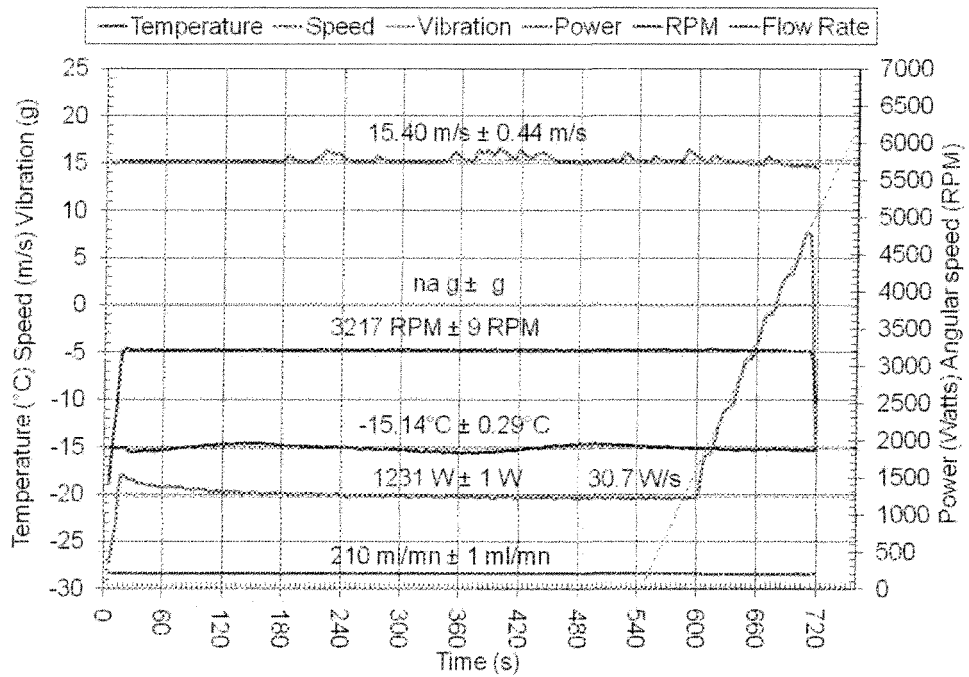
SRB-II 044



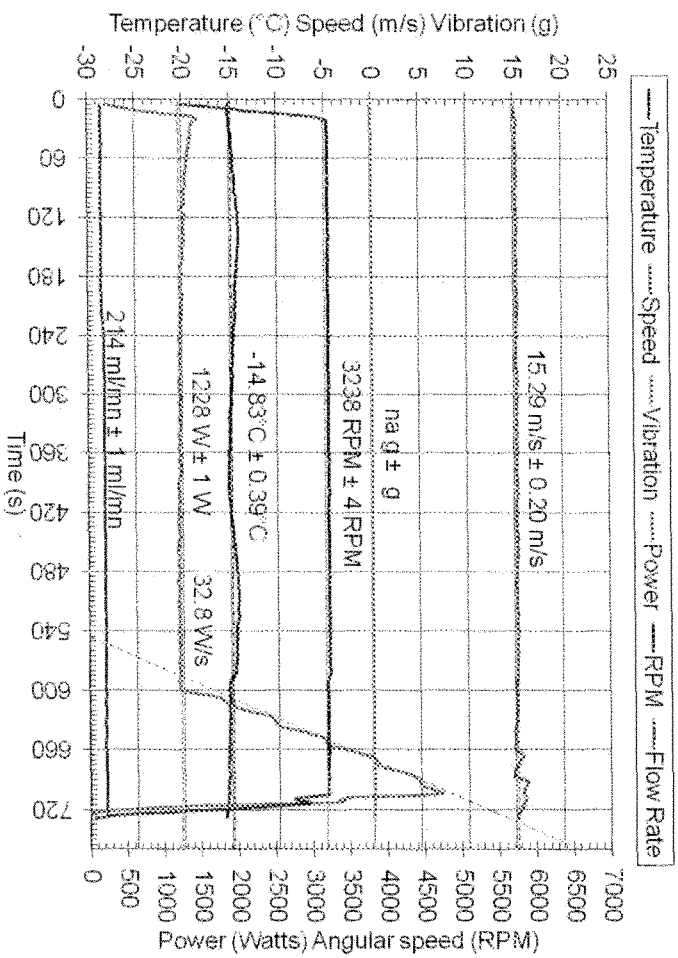
SRB-II 045



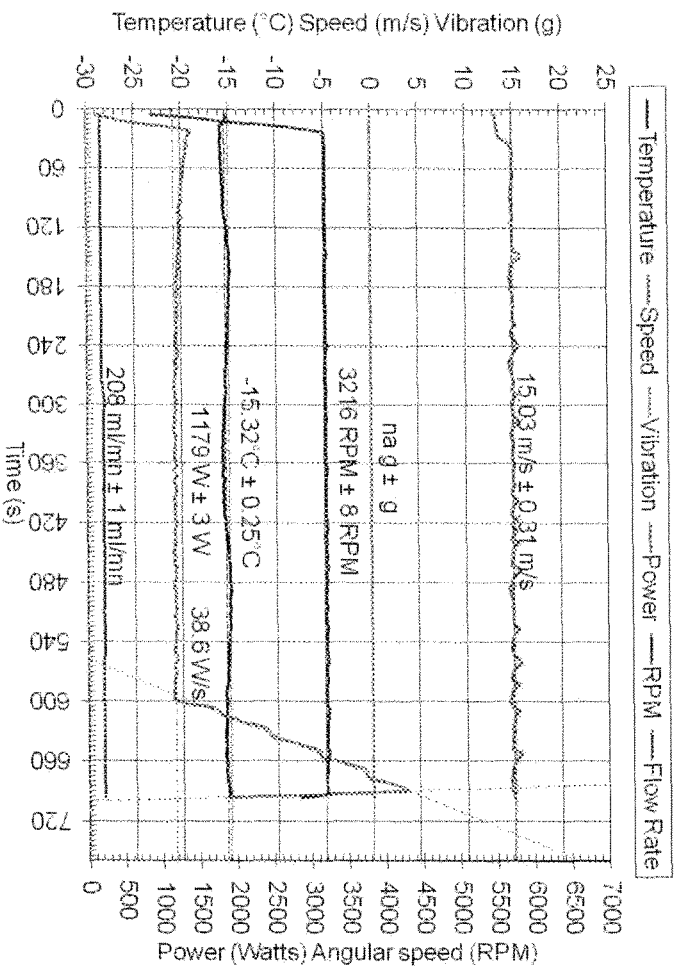
SRB-II 046



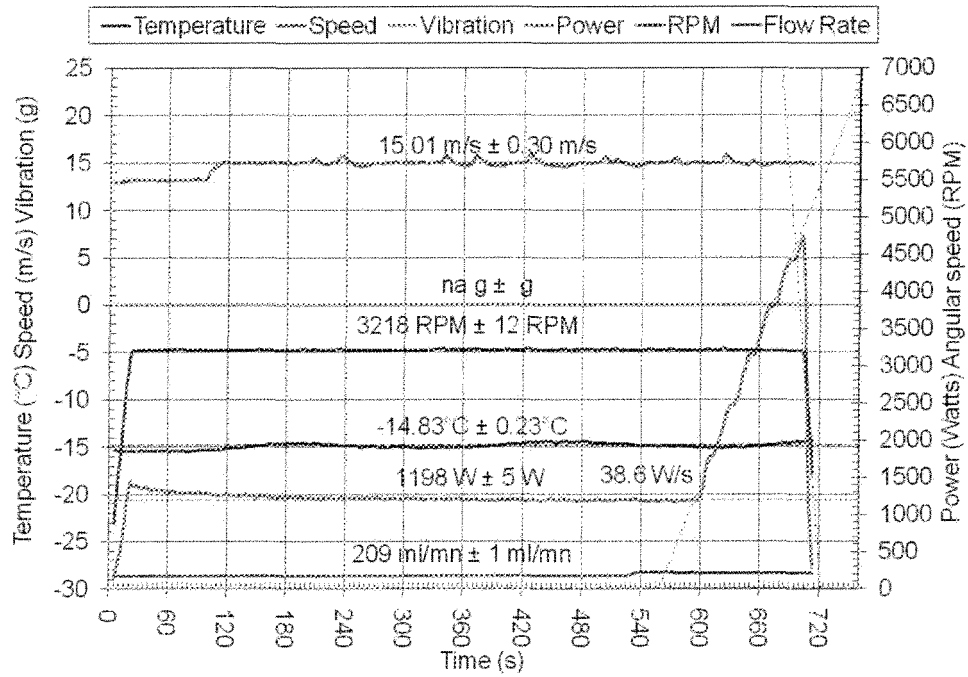
SRB-II 047



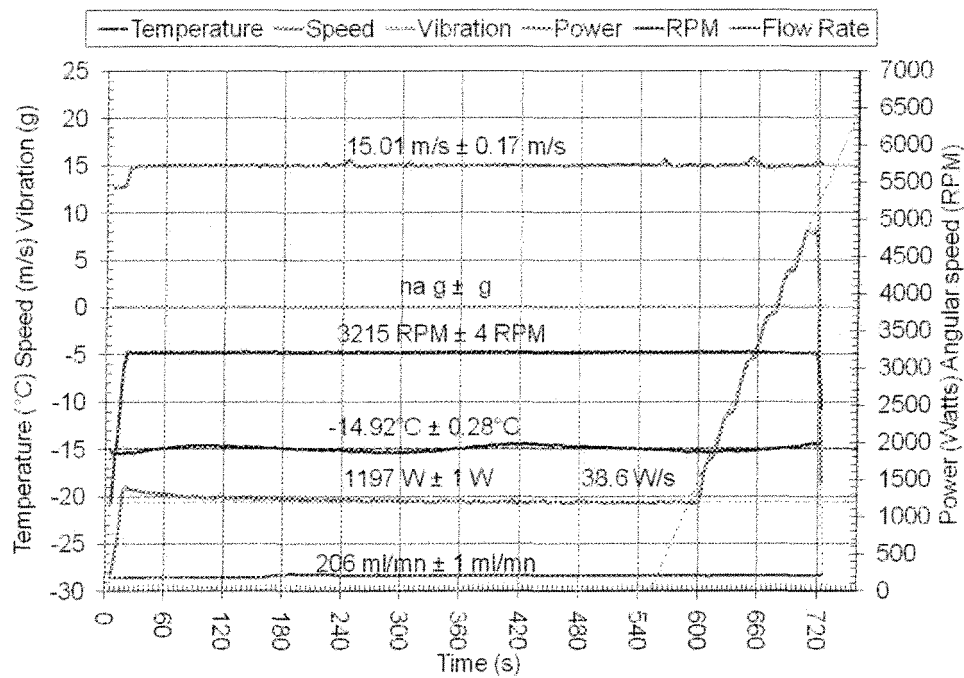
SRB-II 048



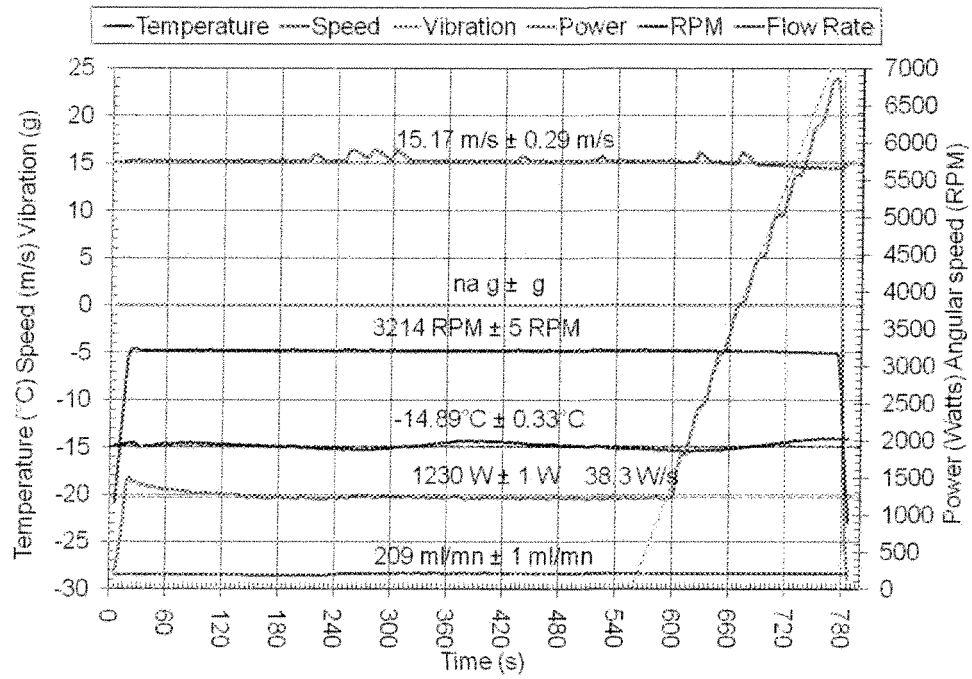
SRB-II 049



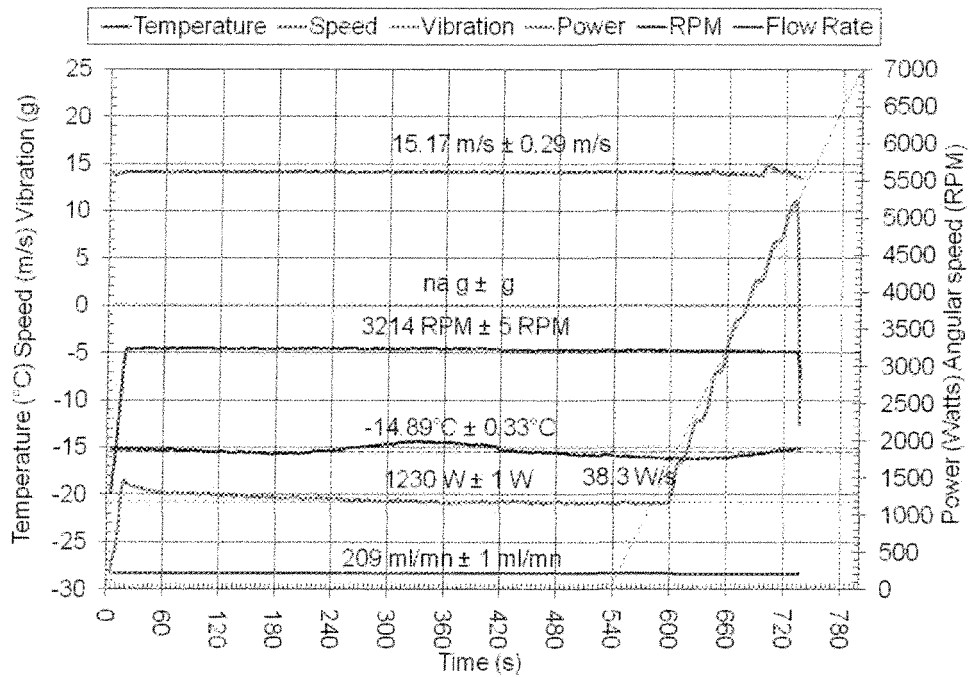
SRB-II 050



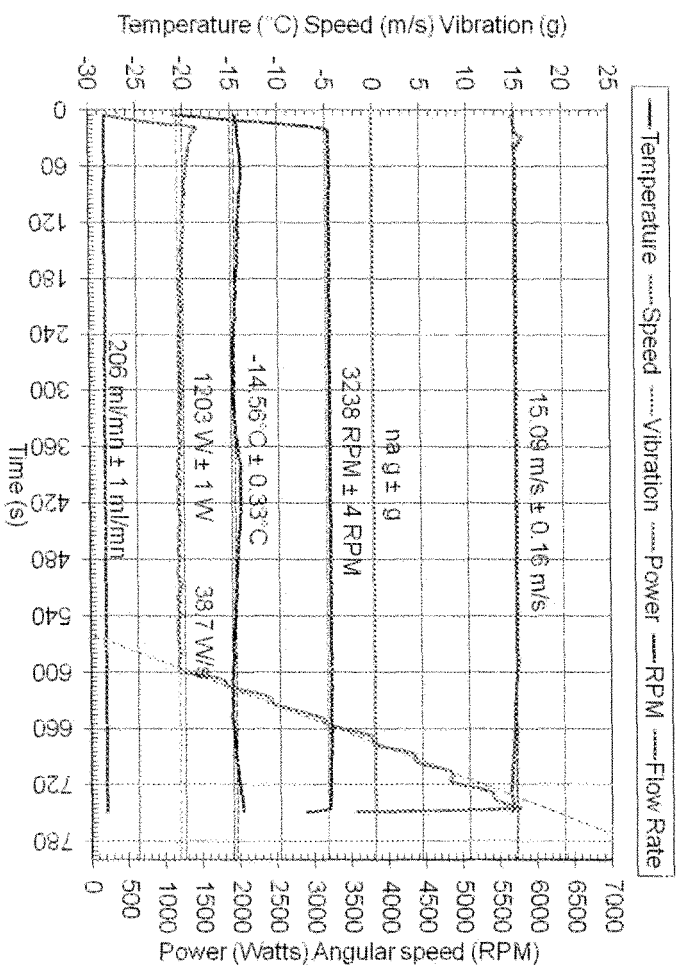
SRB-II 051



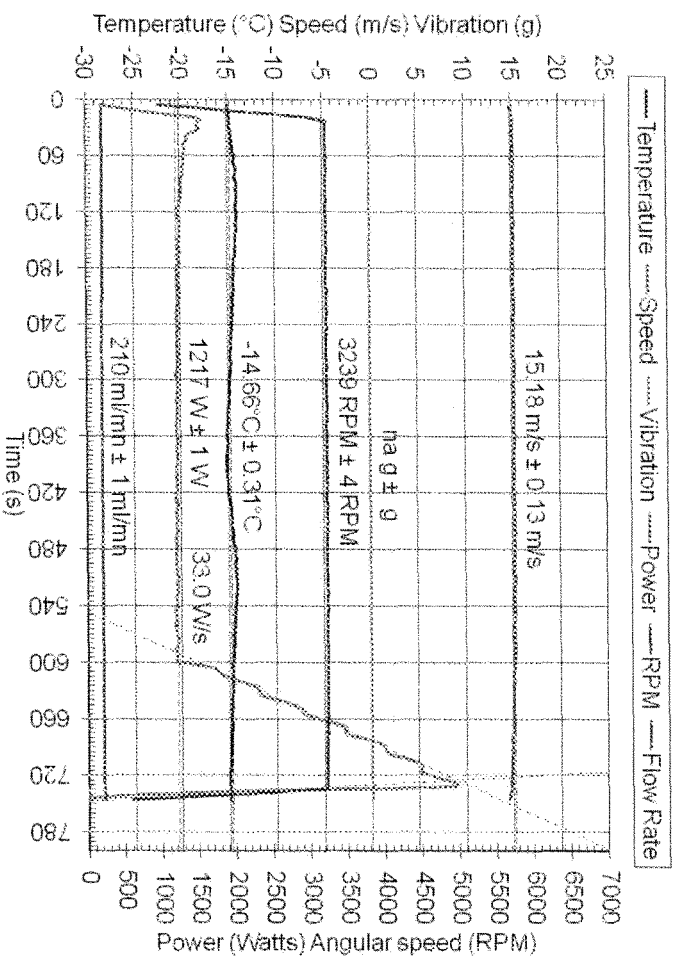
SRB-II 052



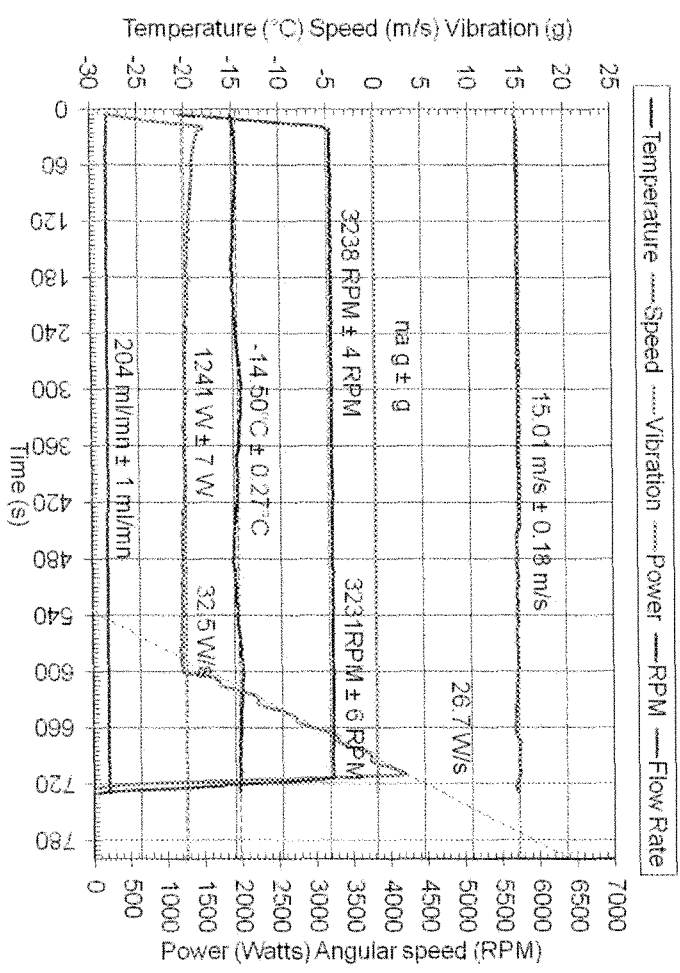
SRB-II 053



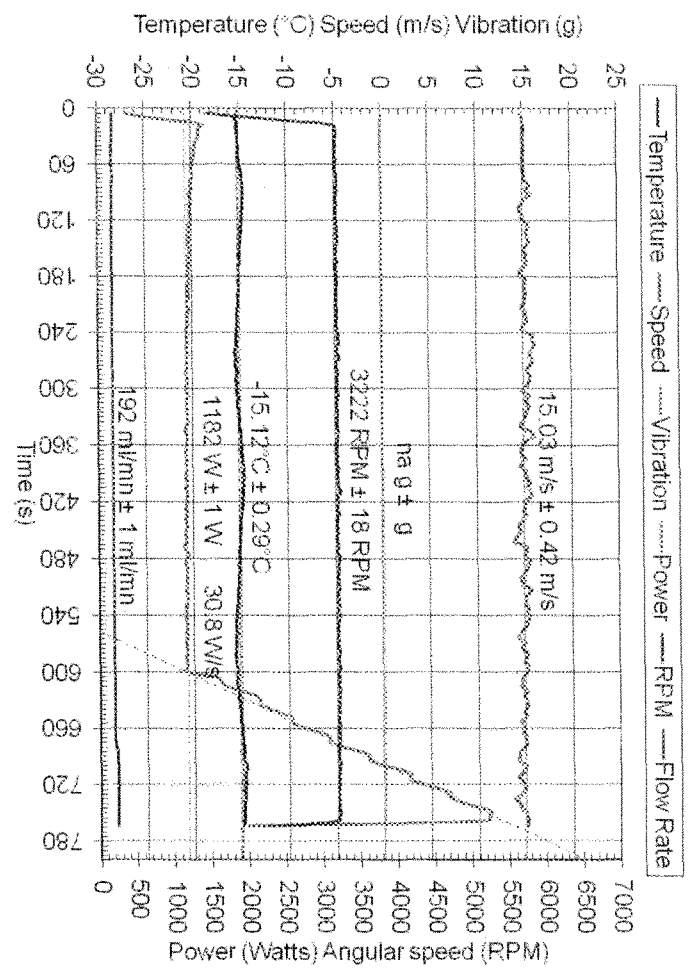
SRB-II 054



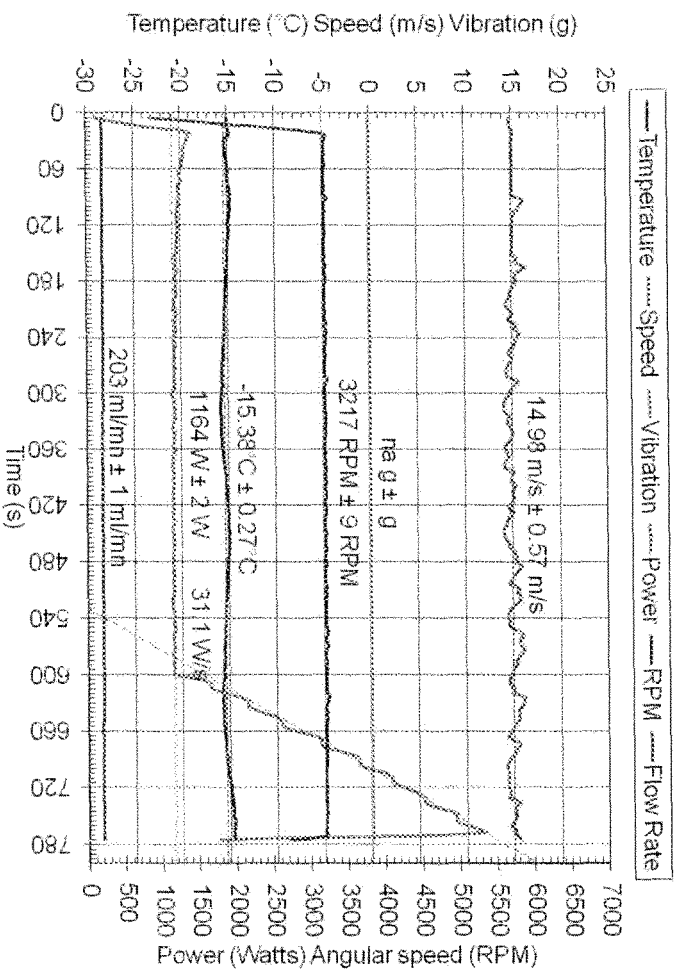
SRB-II 055



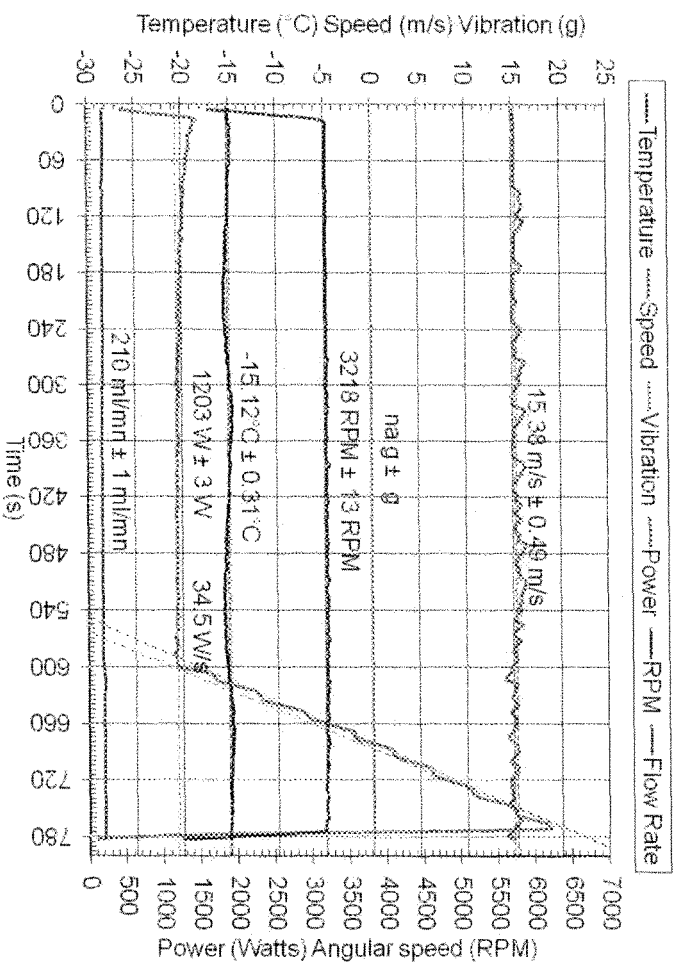
SRB-II 056



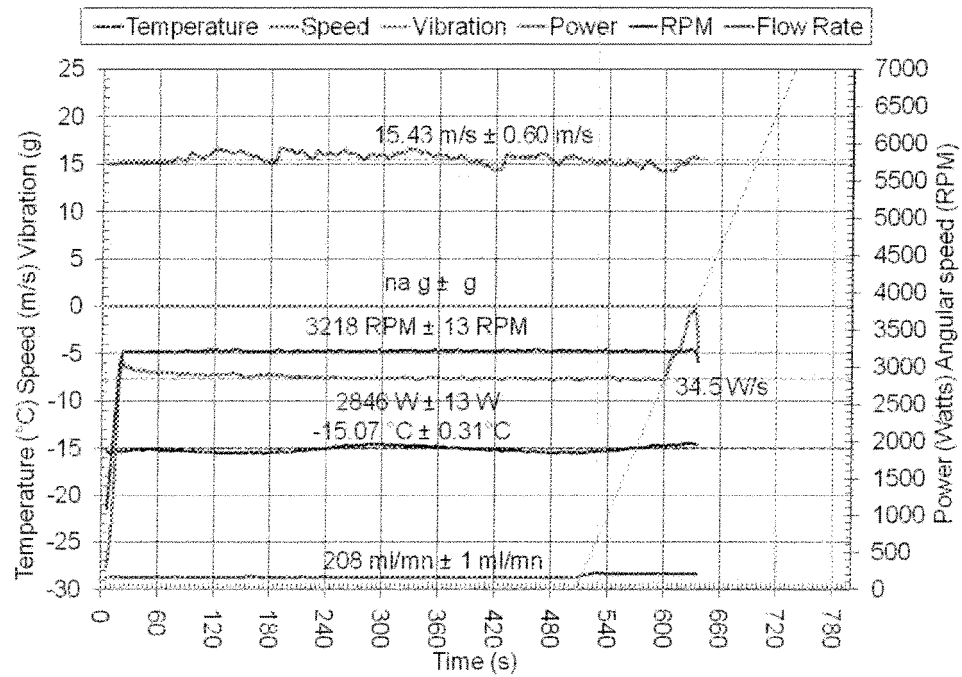
SRB-II 057



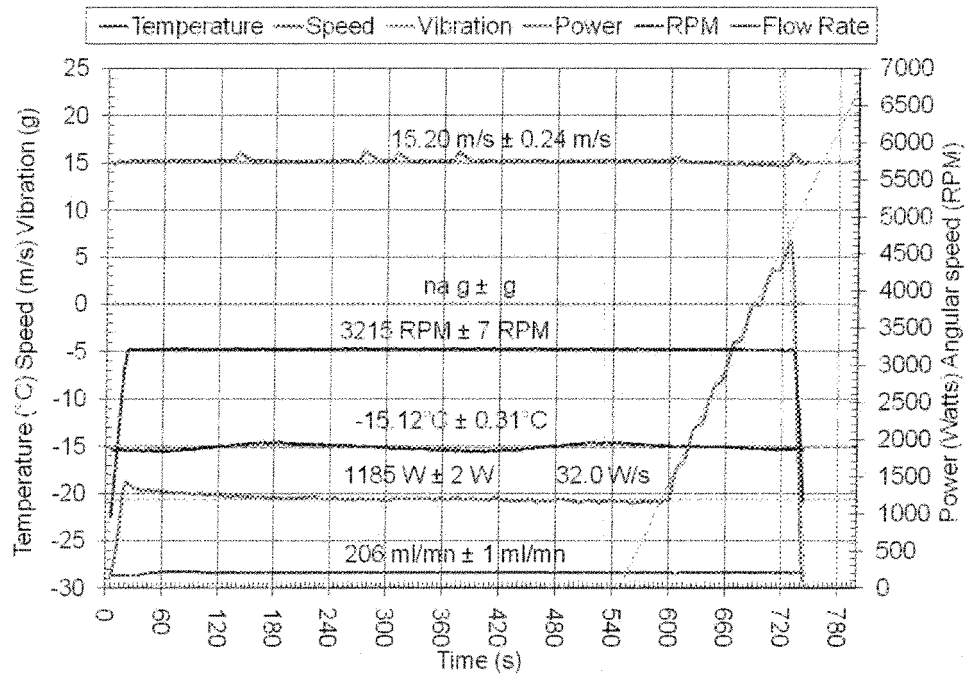
SRB-II 058



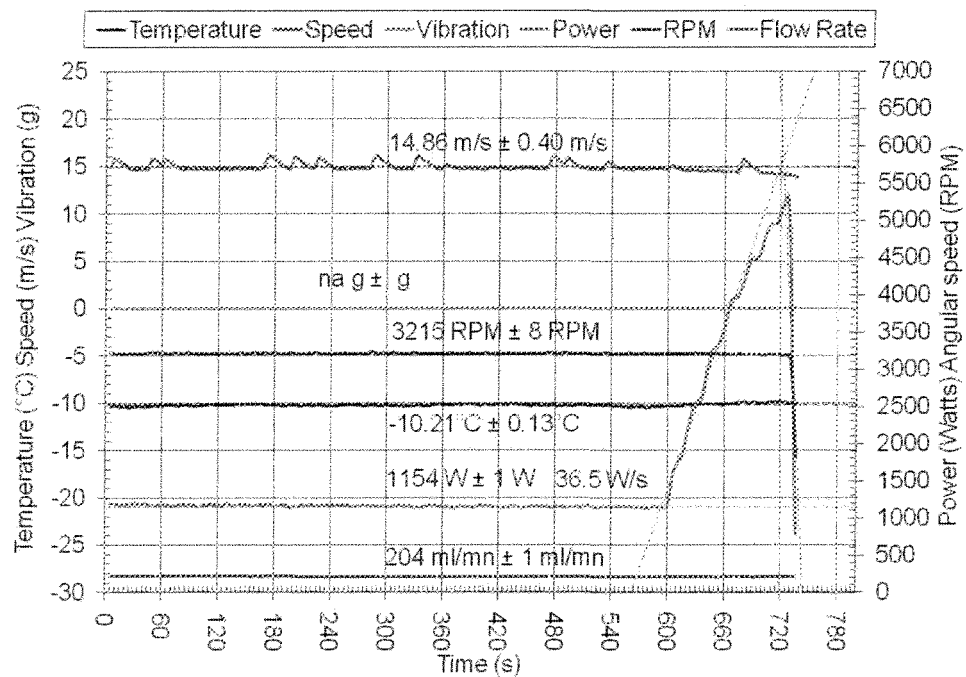
SRB-II 059



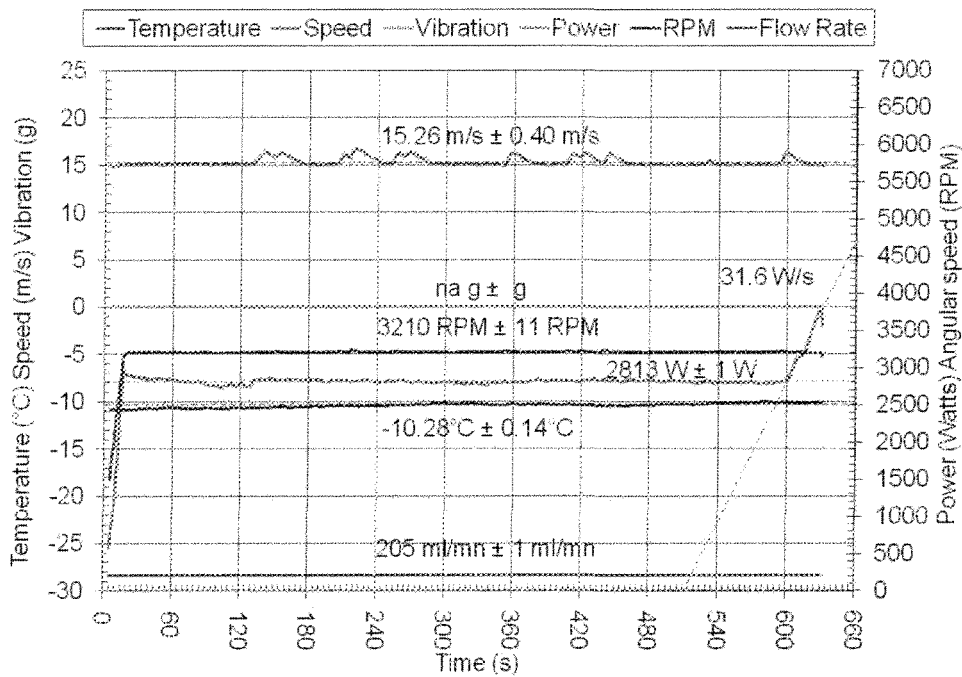
SRB-II 060



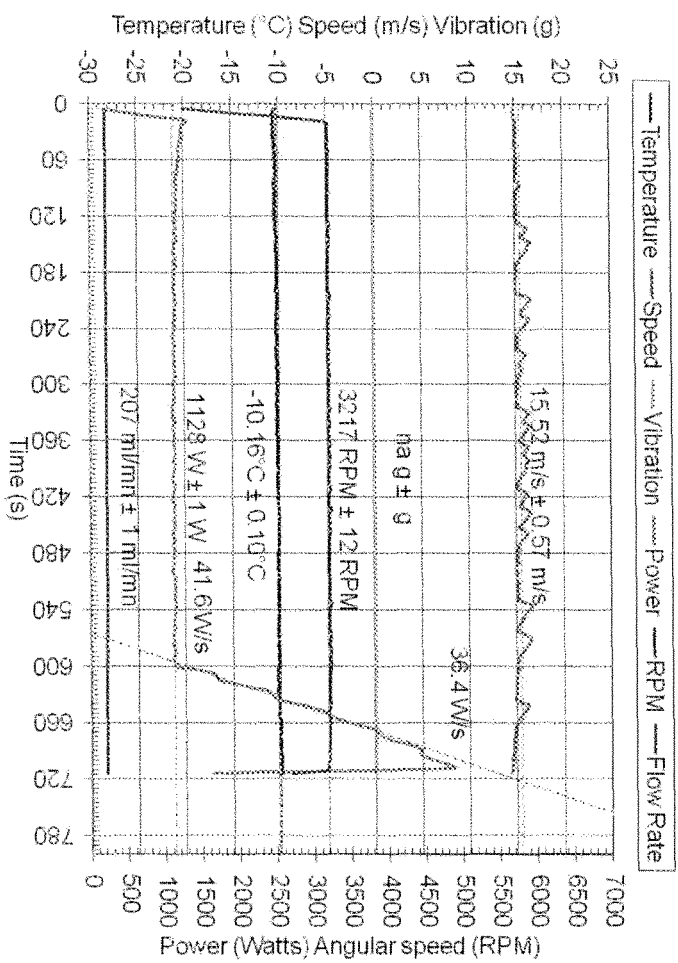
SRB-II 061



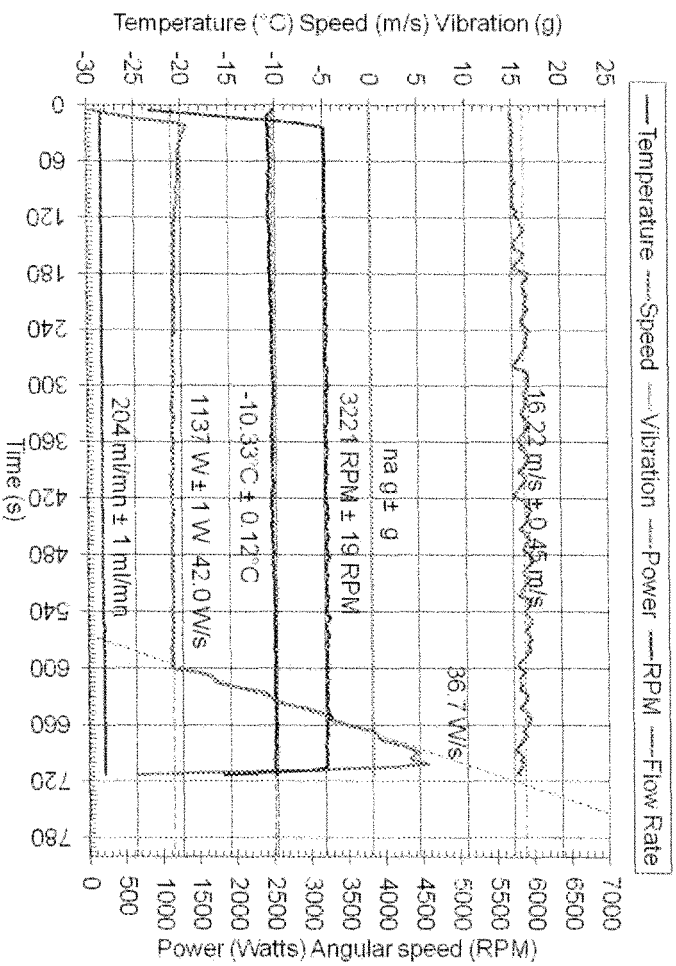
SRB-II 062



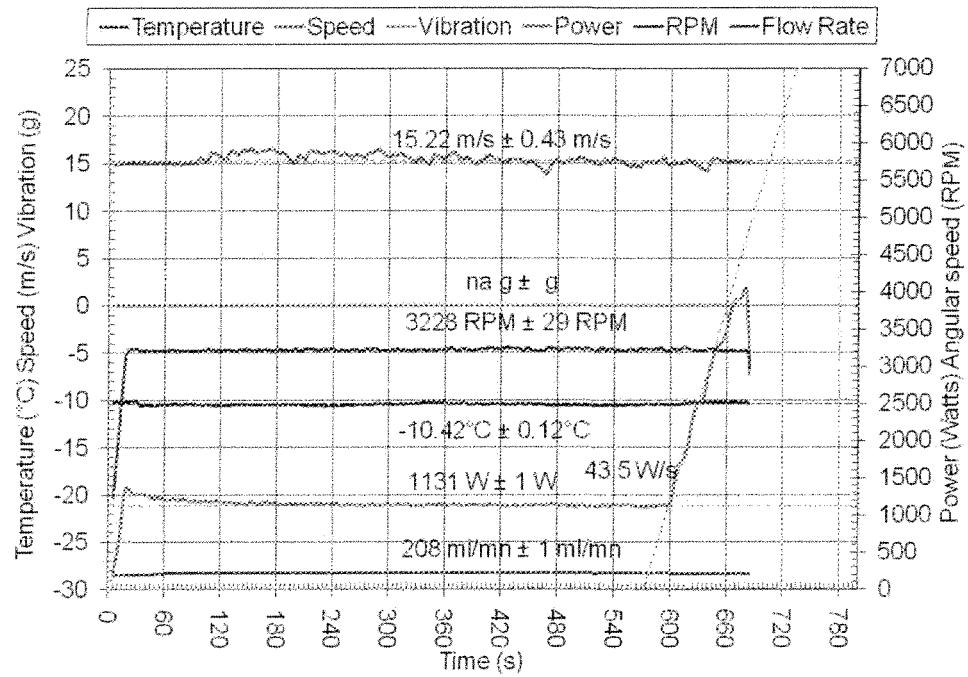
SRB-II 063



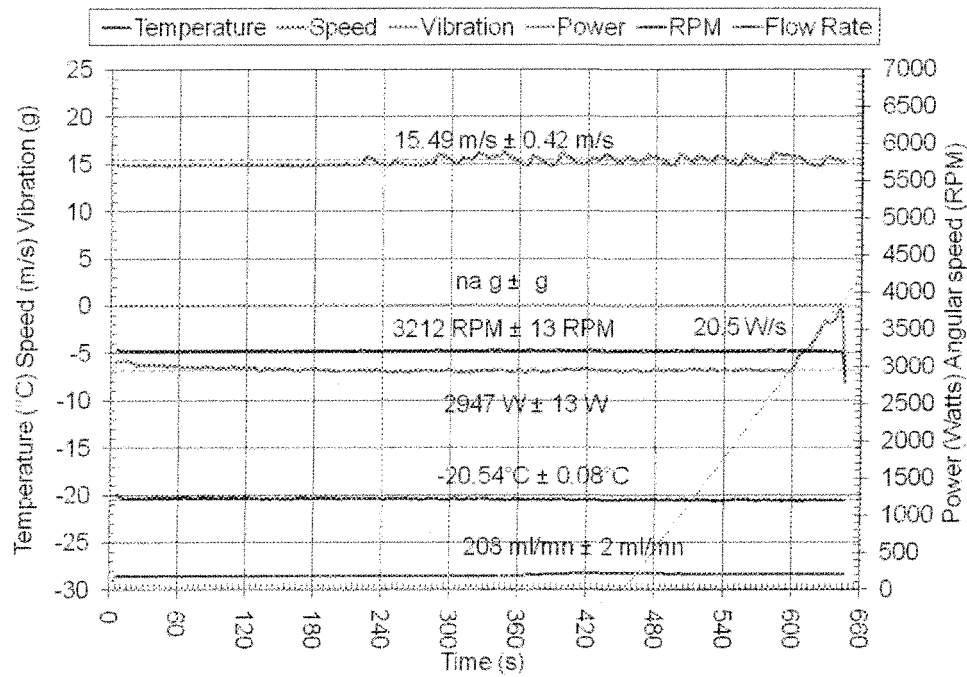
SRB-II 064



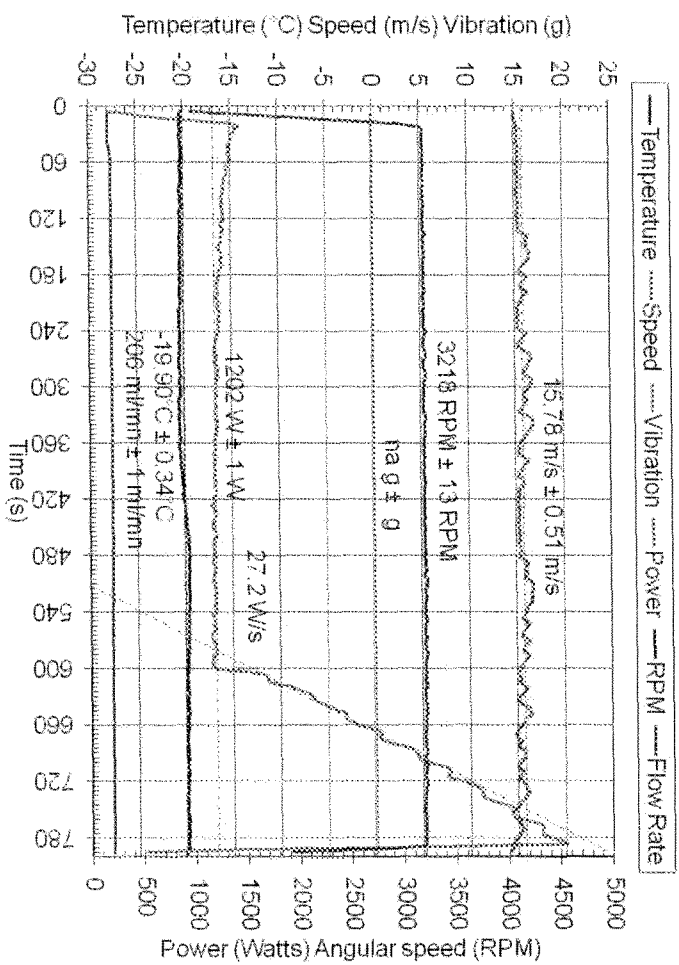
SRB-II 065



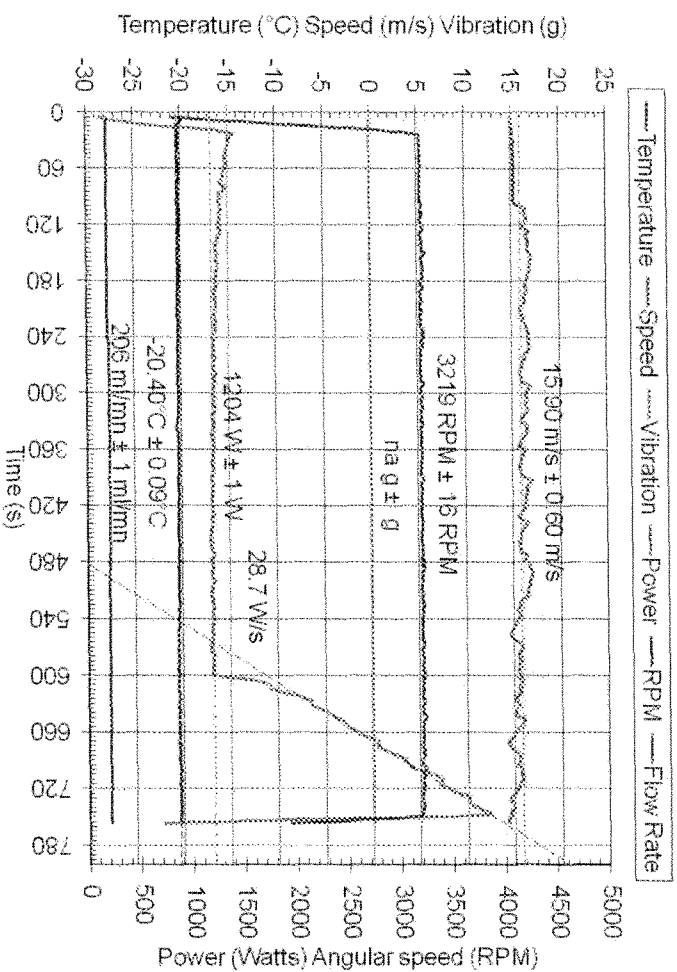
SRB-II 066



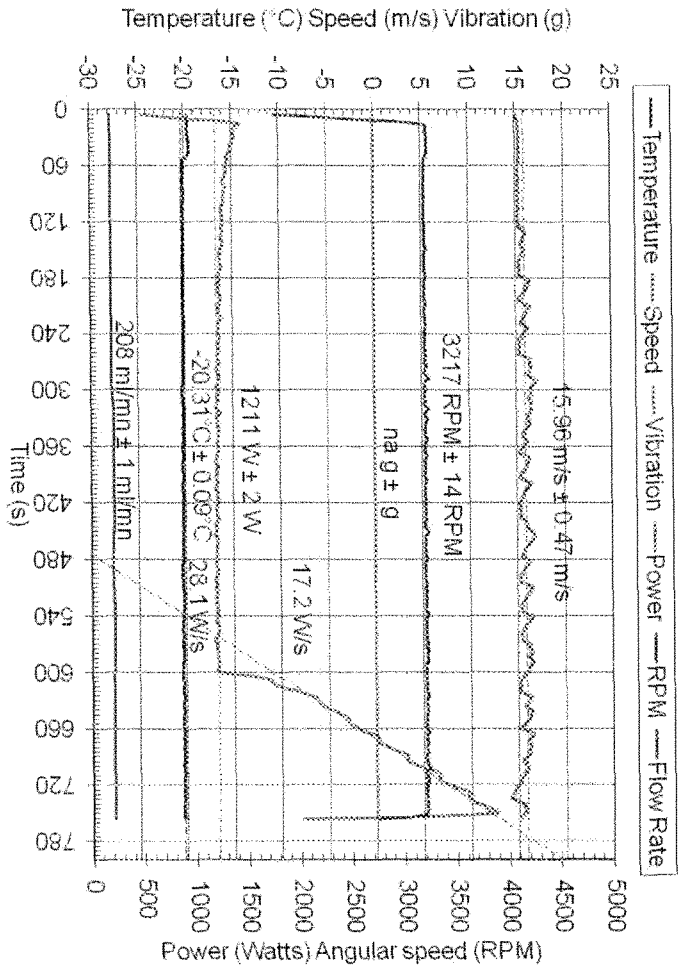
SRB-II 067



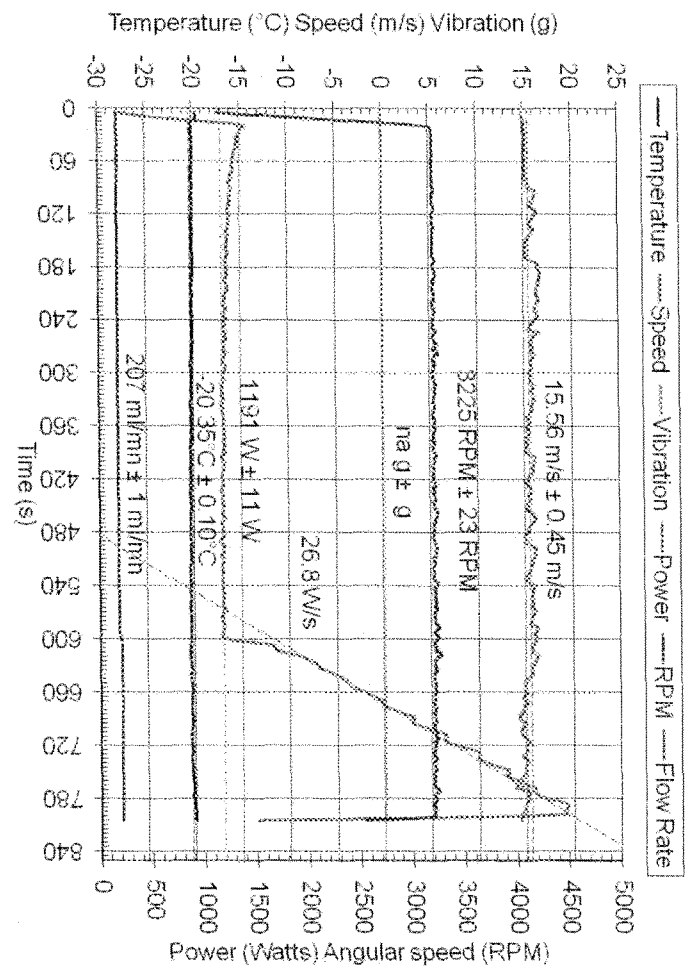
SRB-II 068



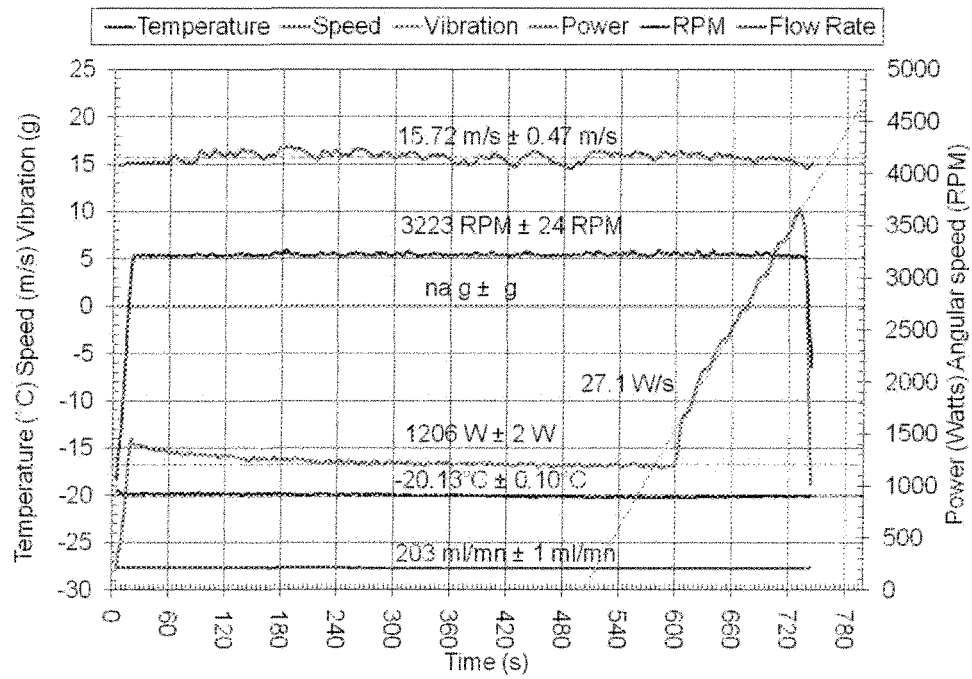
SRB-II 069



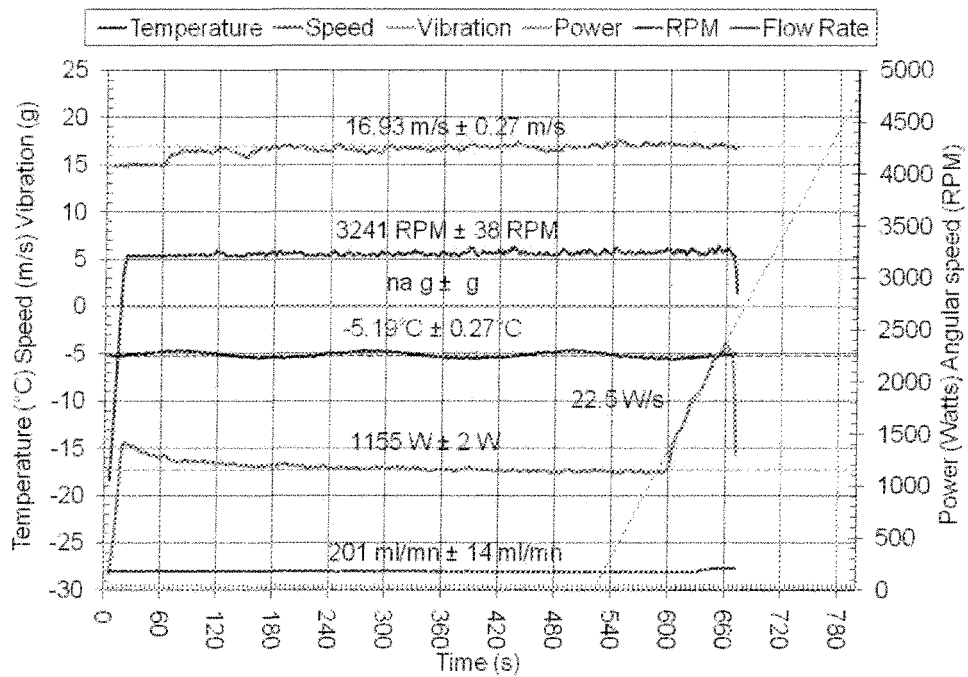
SRB-II 070



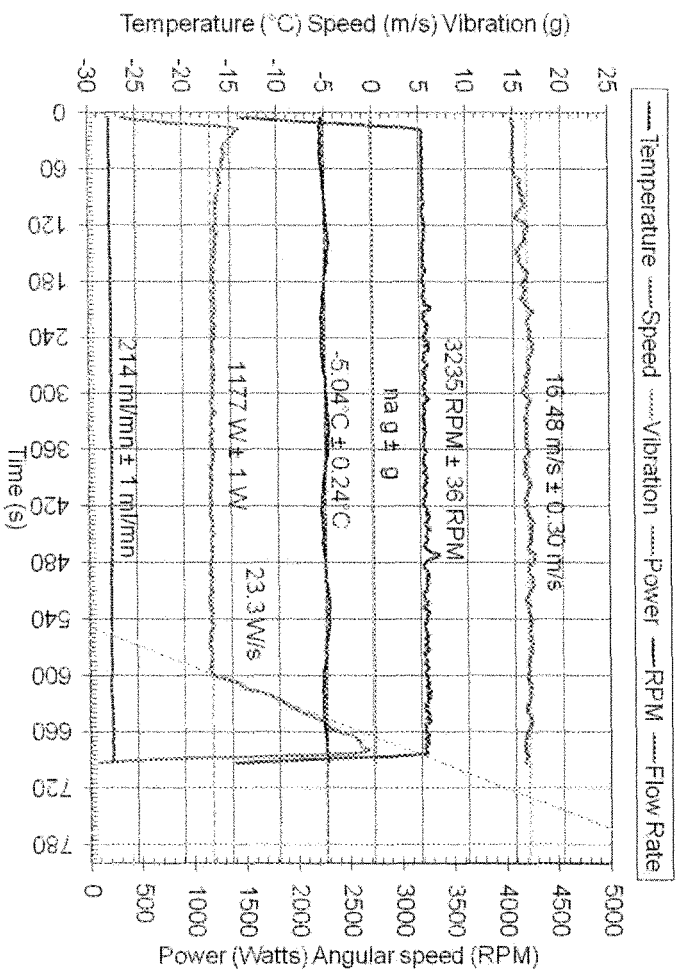
SRB-II 071



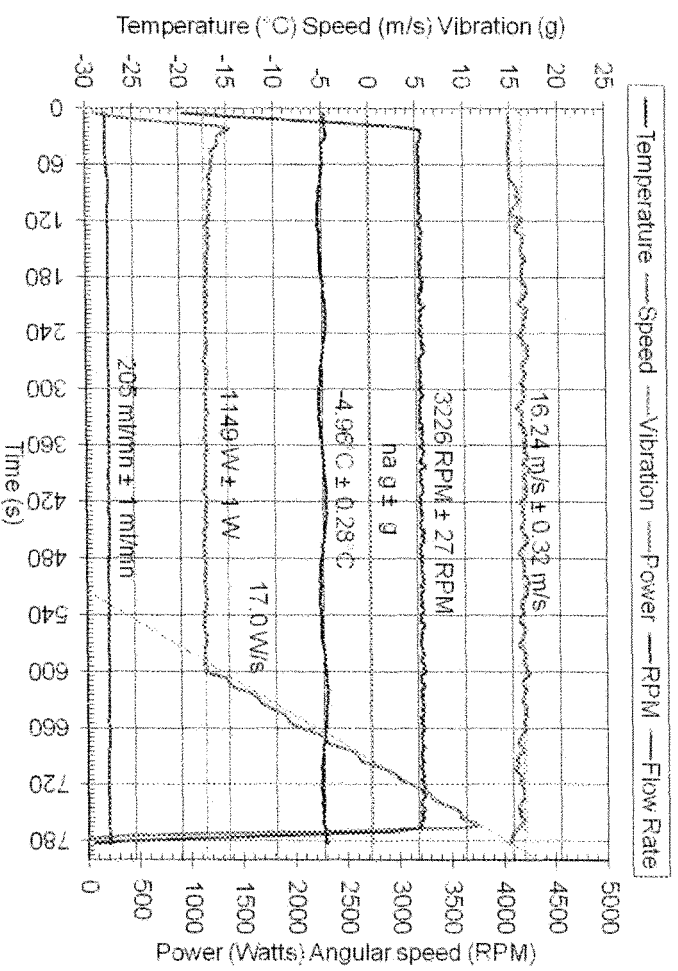
SRB-II 072



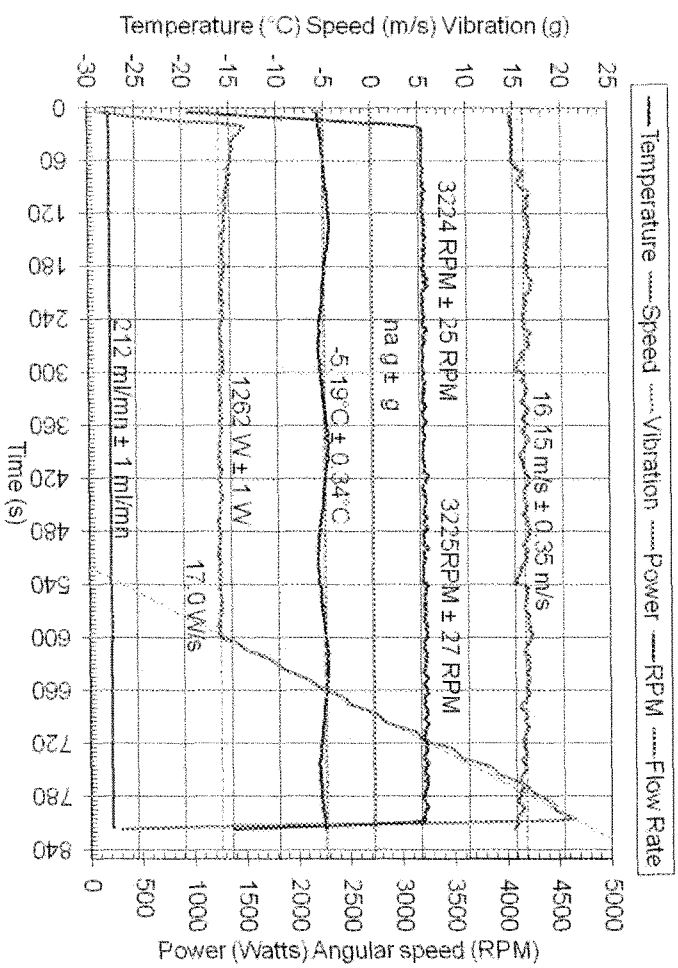
SRB-II 073



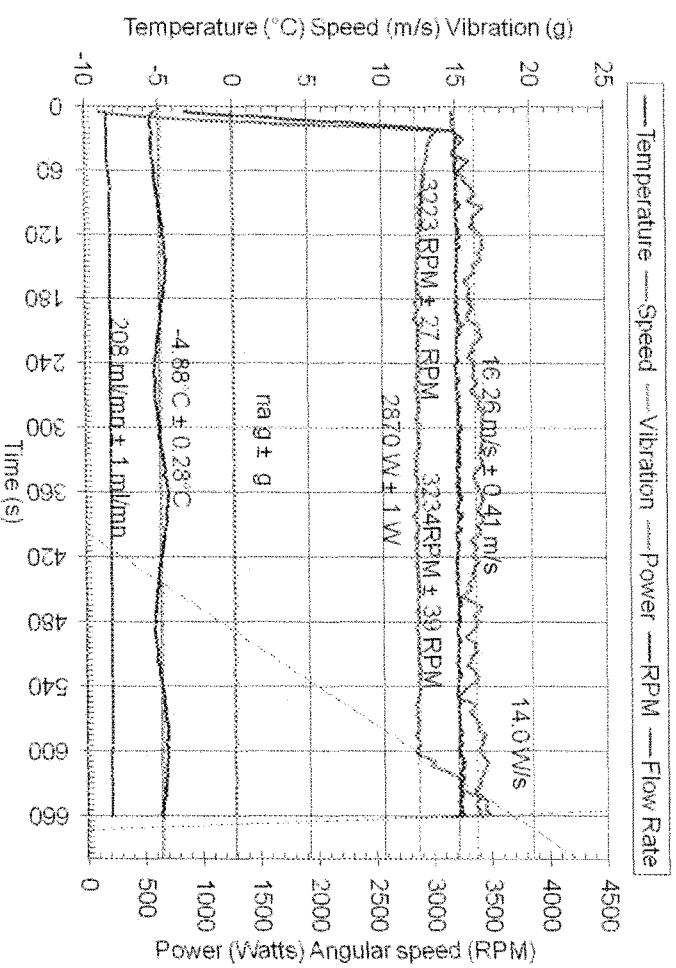
SRB-II 074



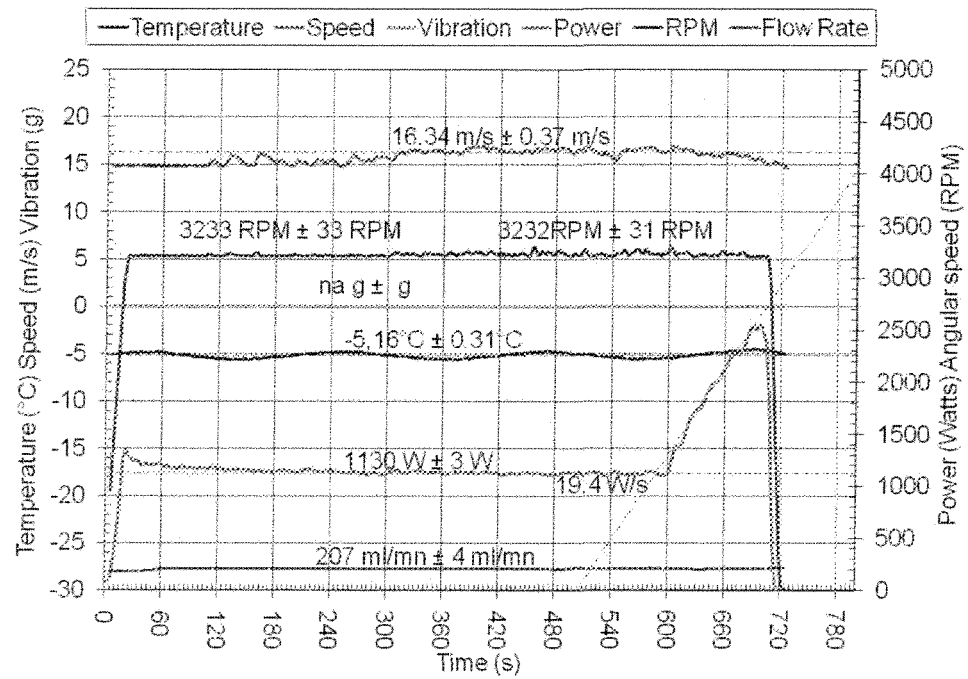
SRB-II 075



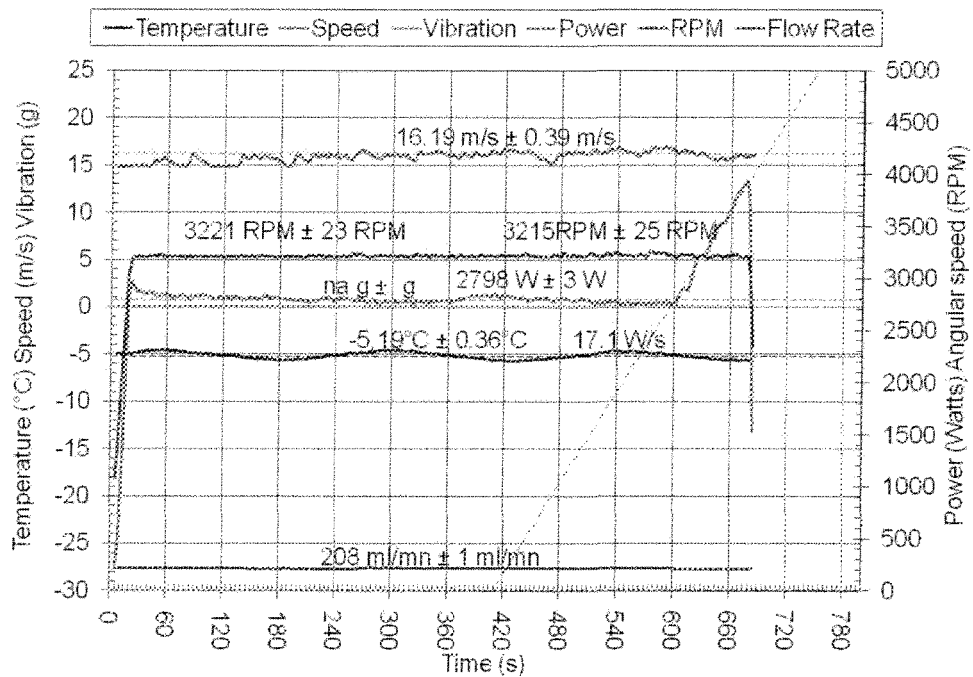
SRB-II 076



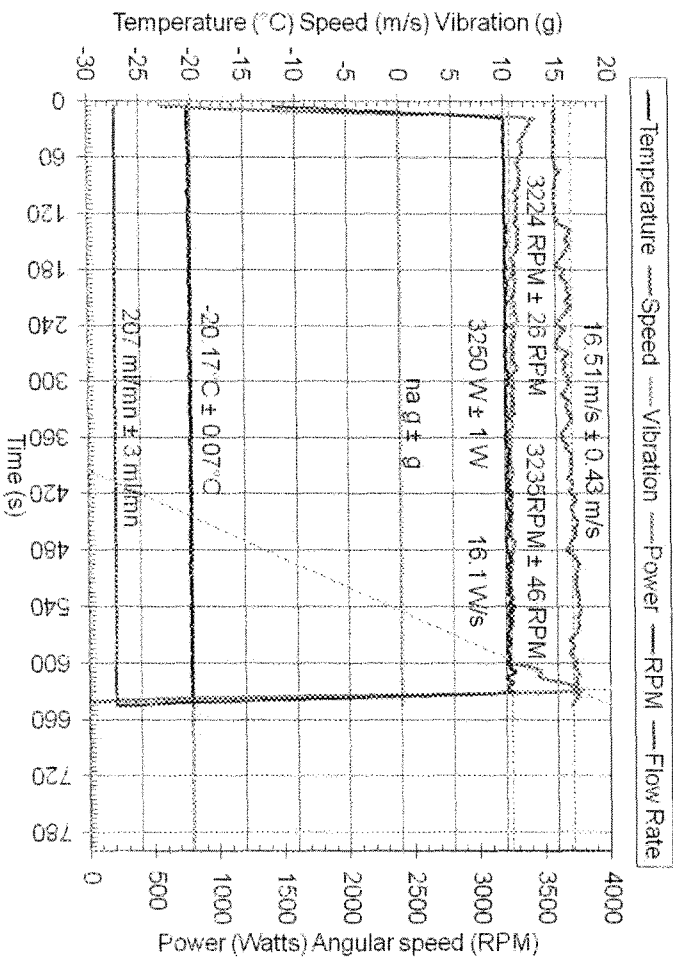
SRB-II 077



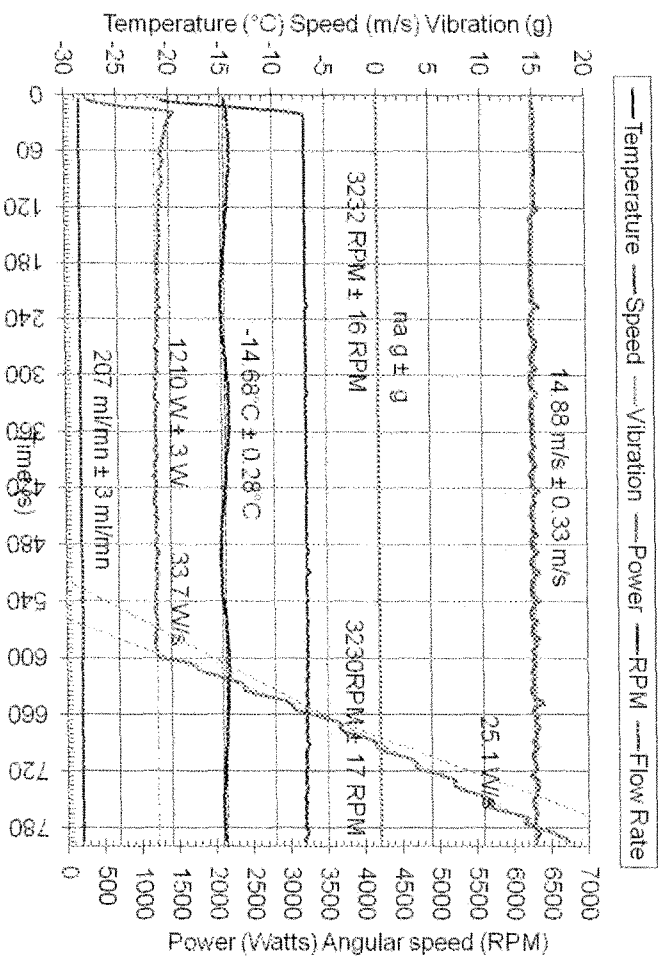
SRB-II 078



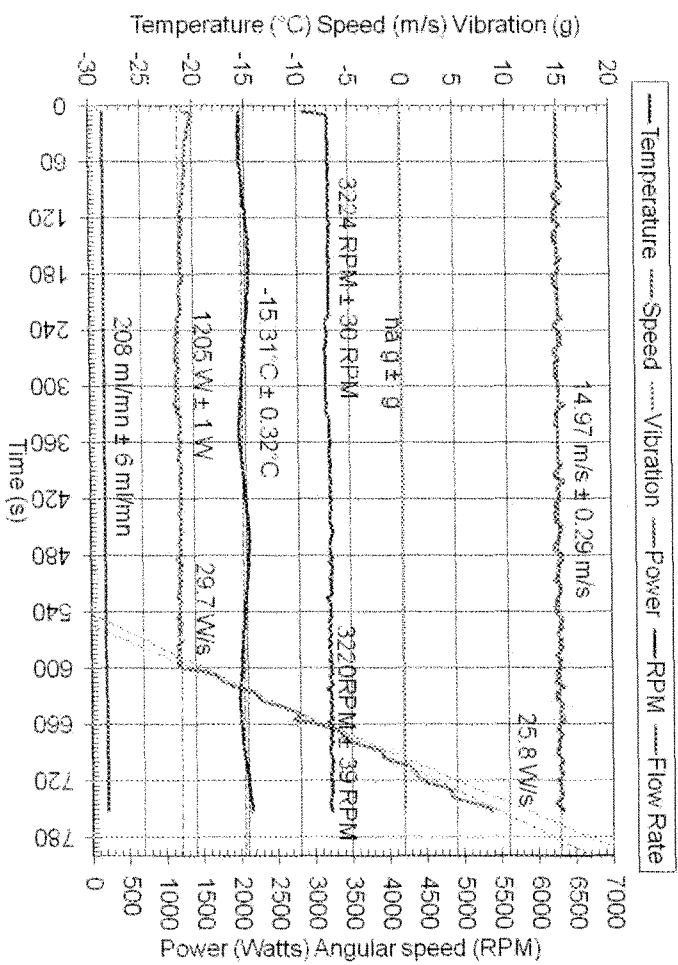
SRB-II 079



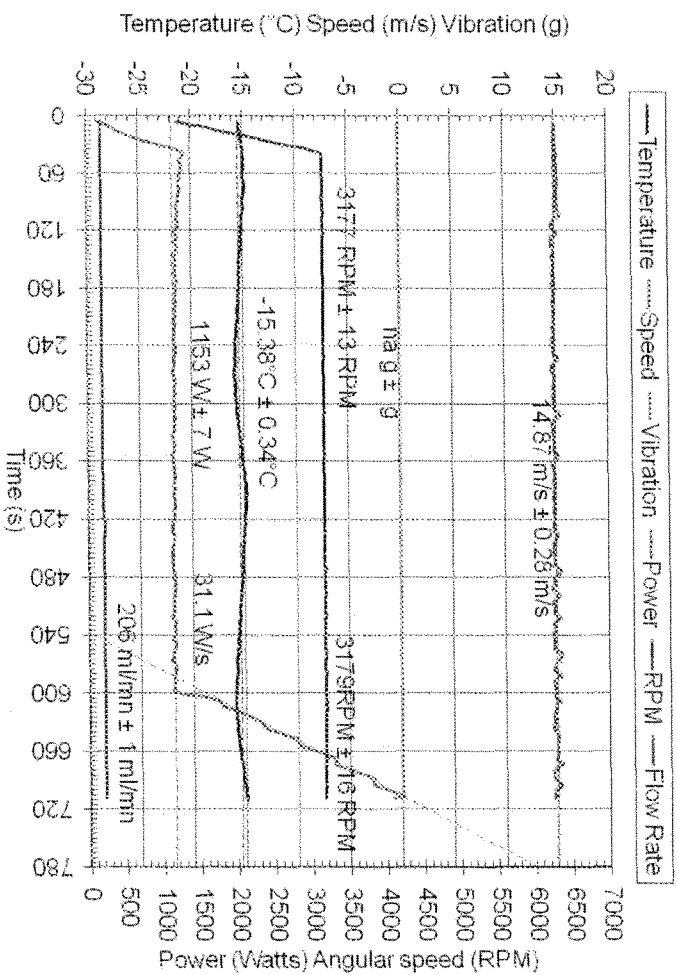
SRB-II 080



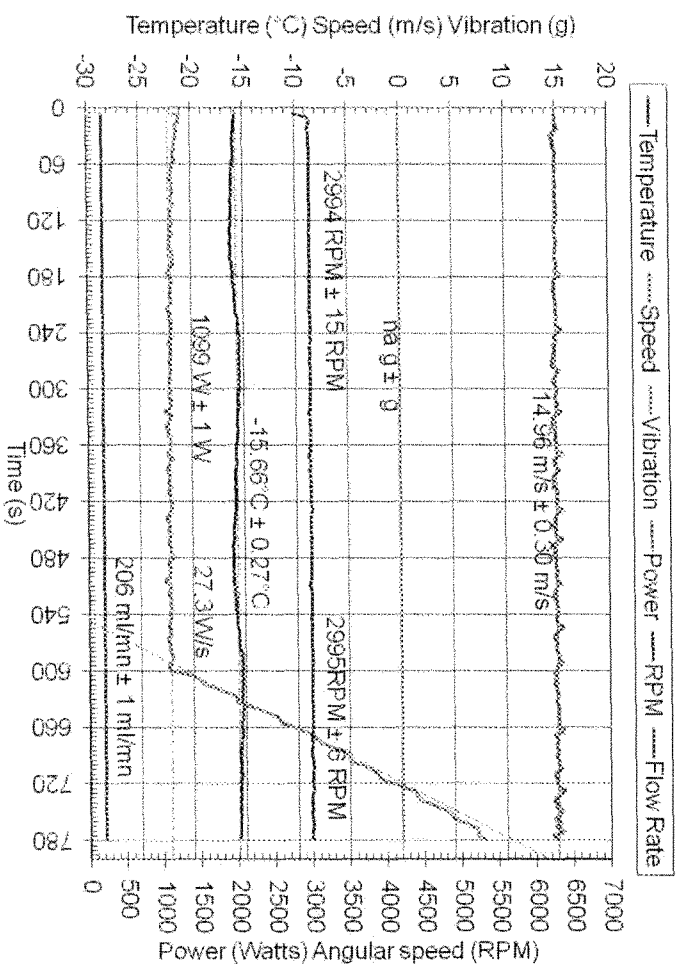
SRB-II 082



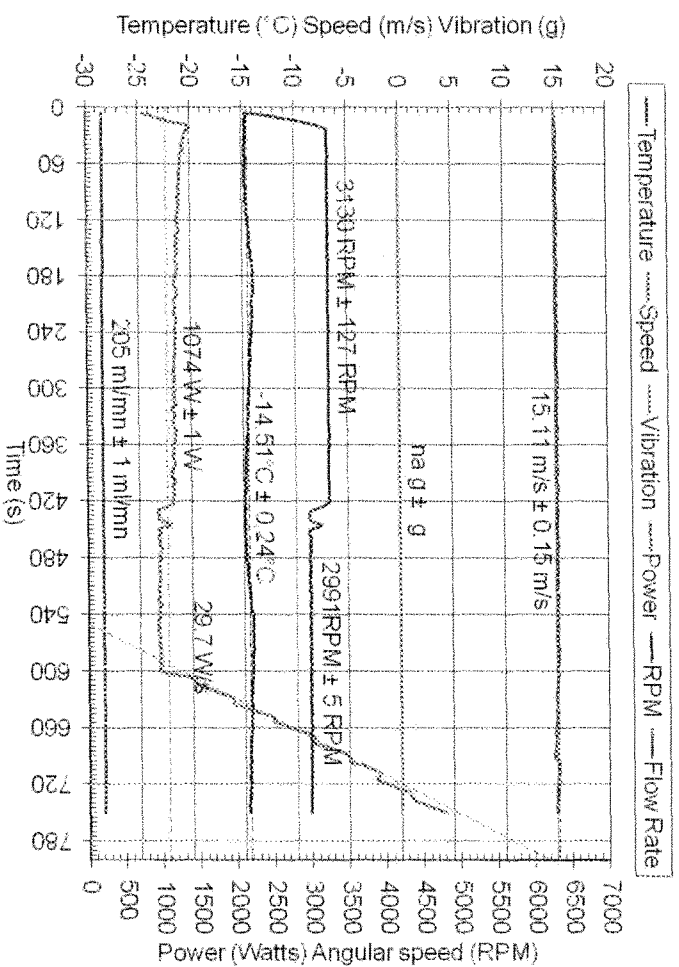
SRB-II 083



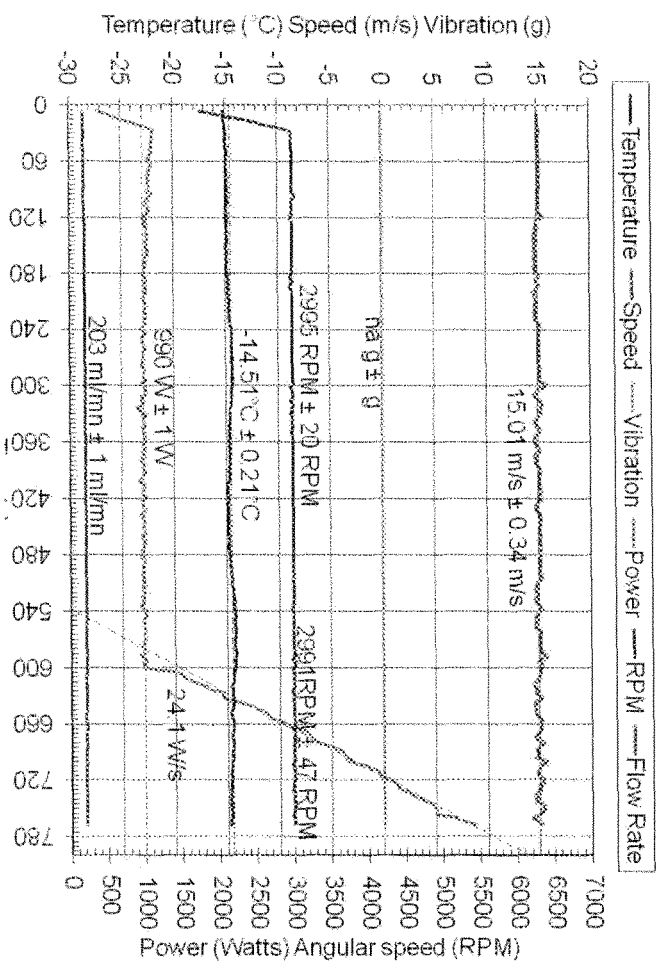
SRB-II 084



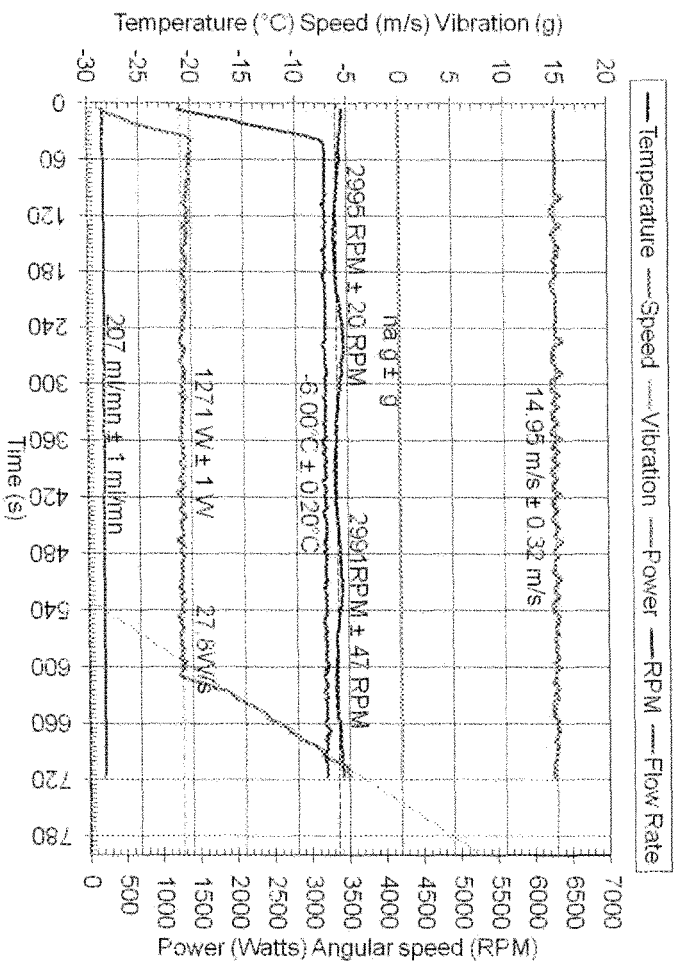
SRB-II 085



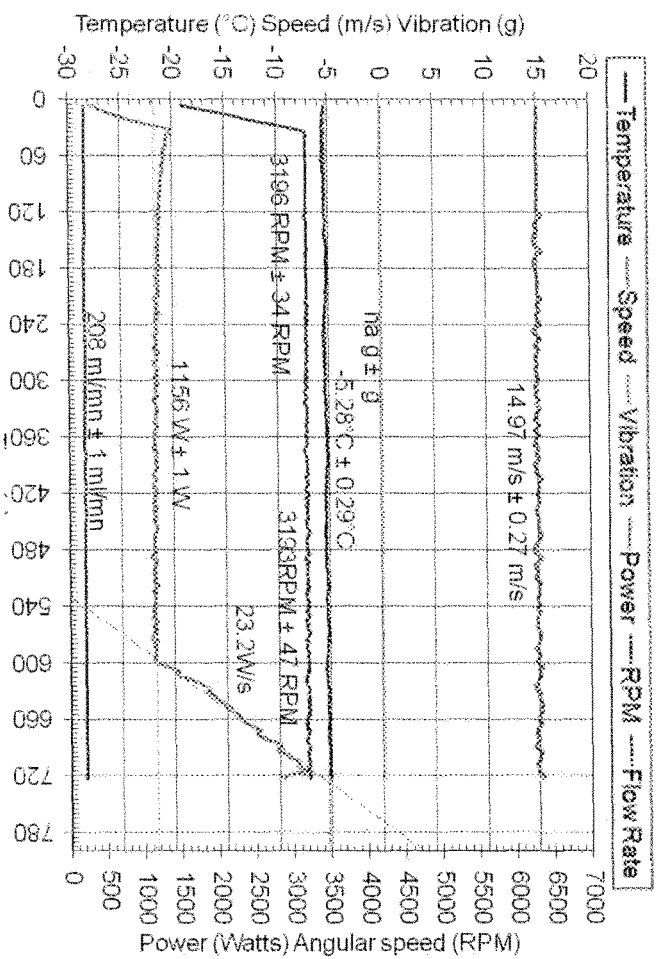
SRB-II 086



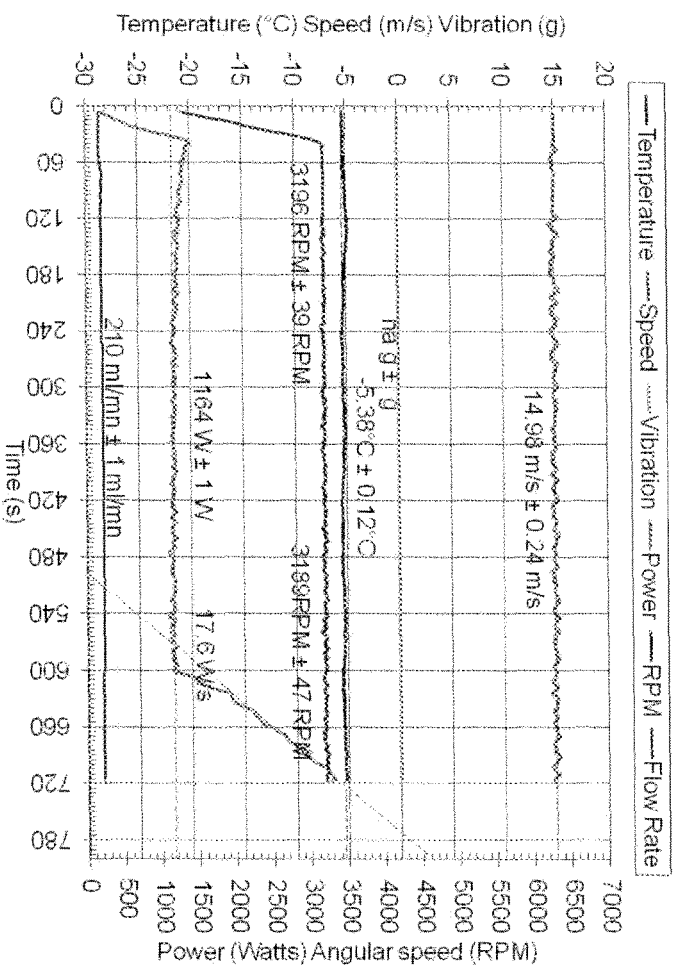
SRB-II 087



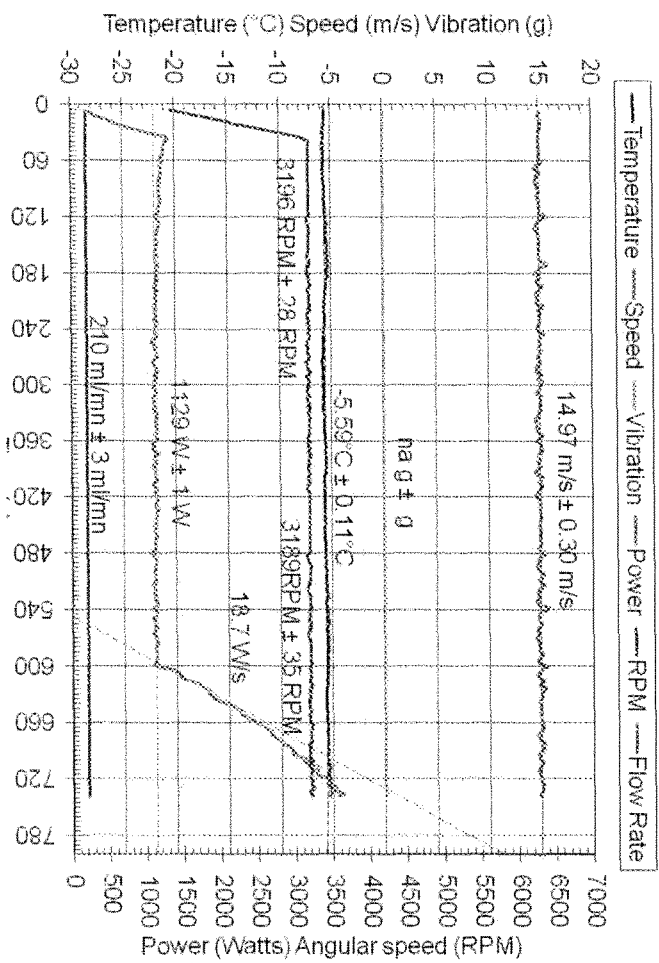
SRB-II 088



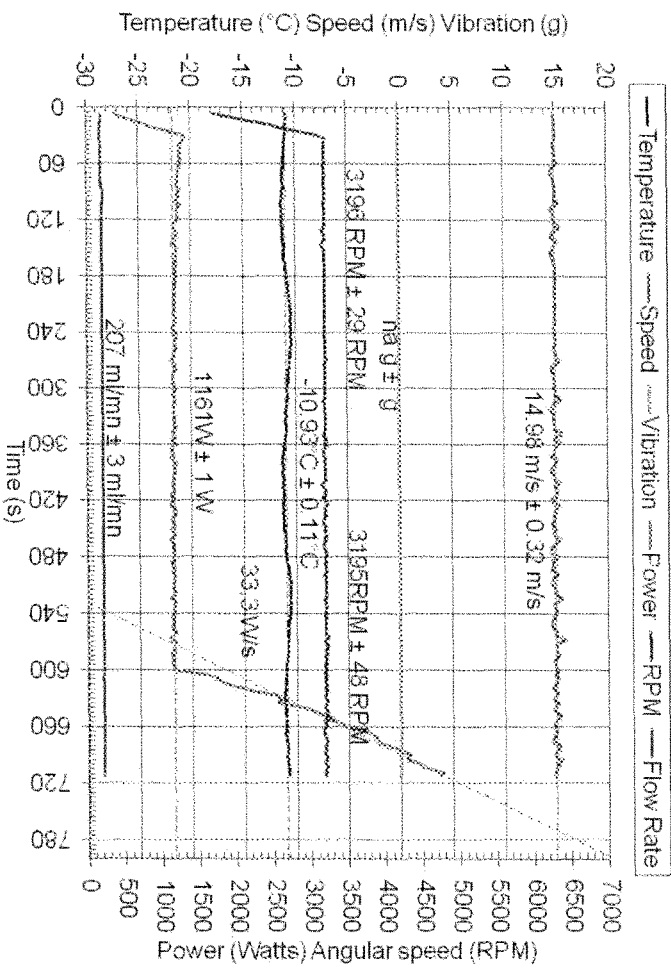
SRB-II 089



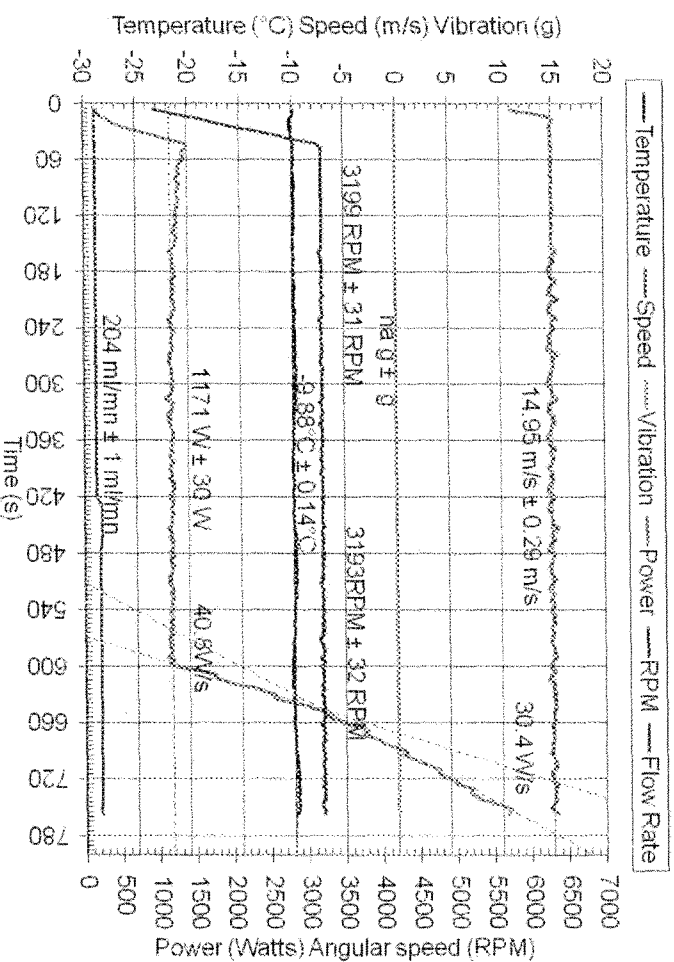
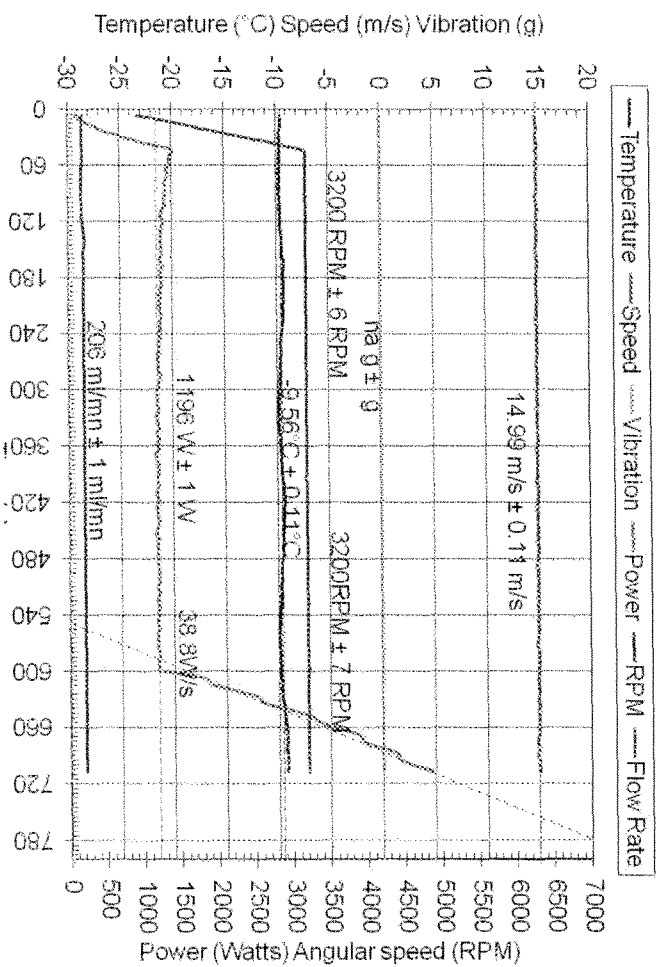
SRB-II 090

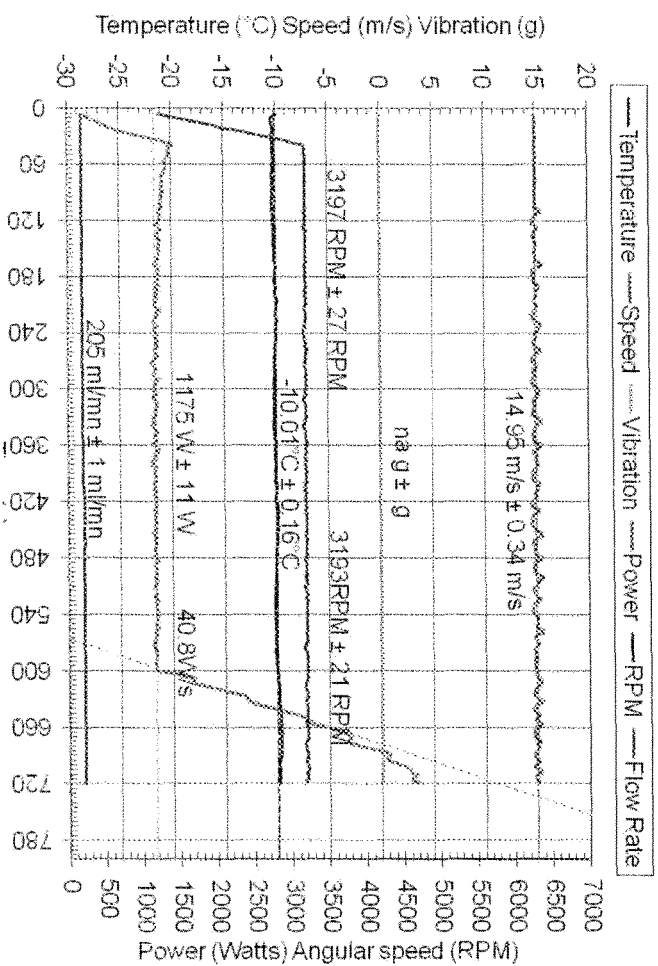


SRB-II 091

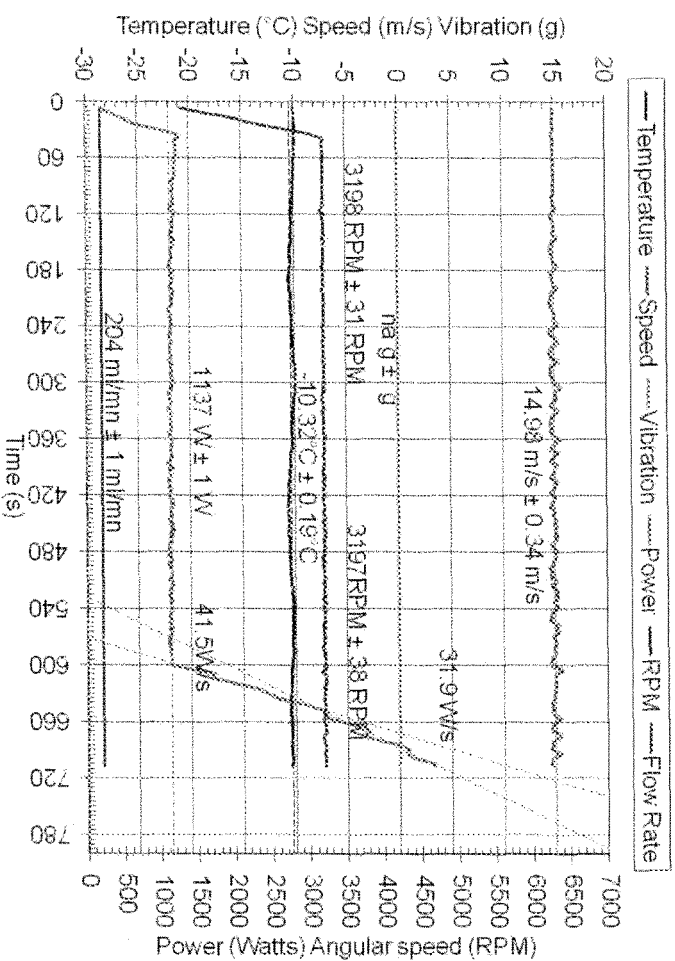


SRB-II 092

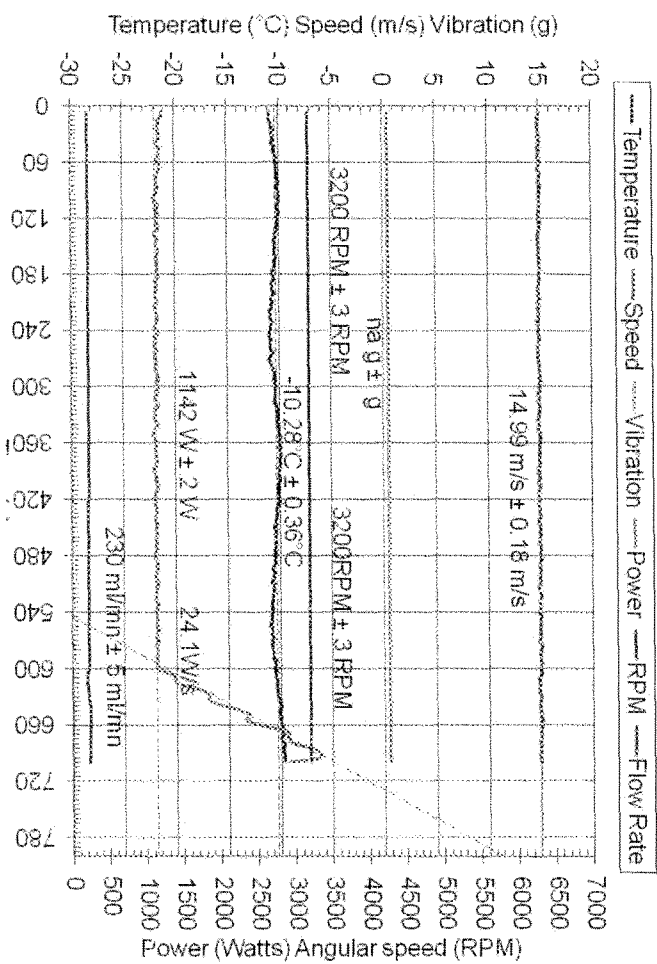




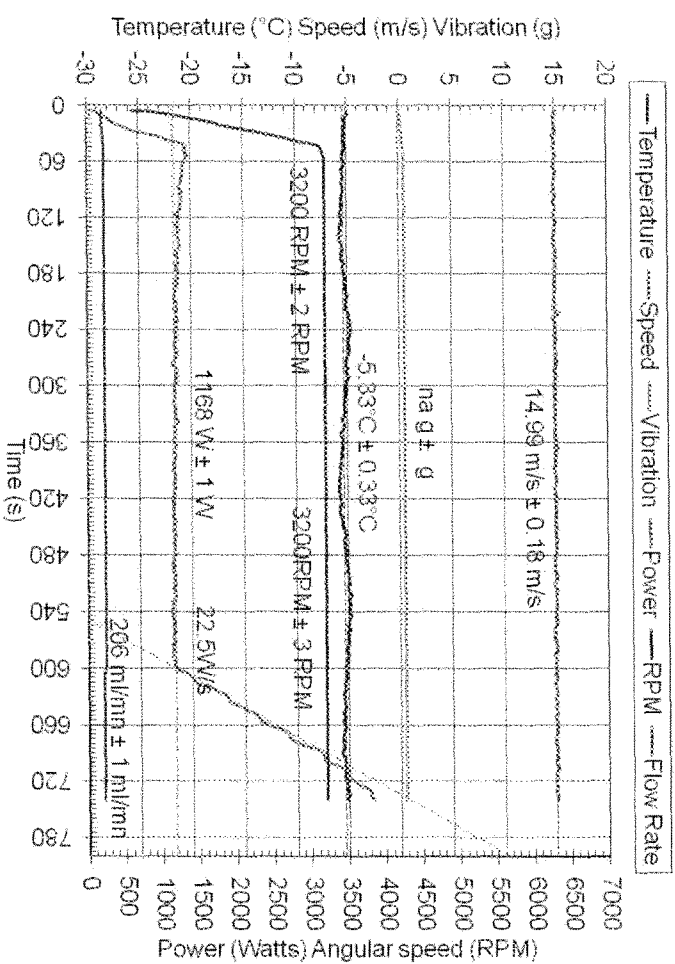
SRB-II 095



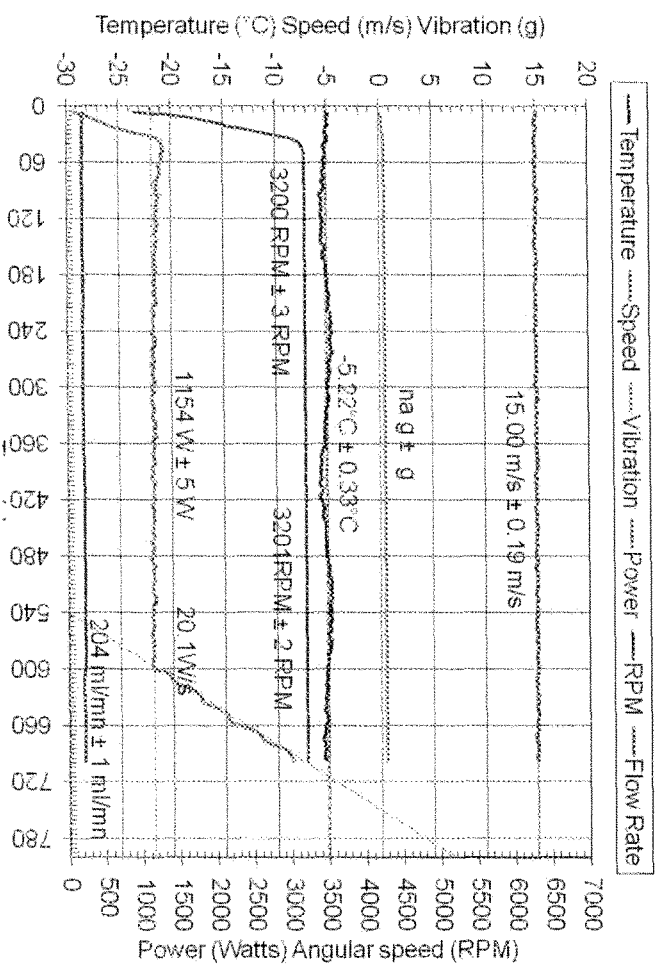
SRB-II 096



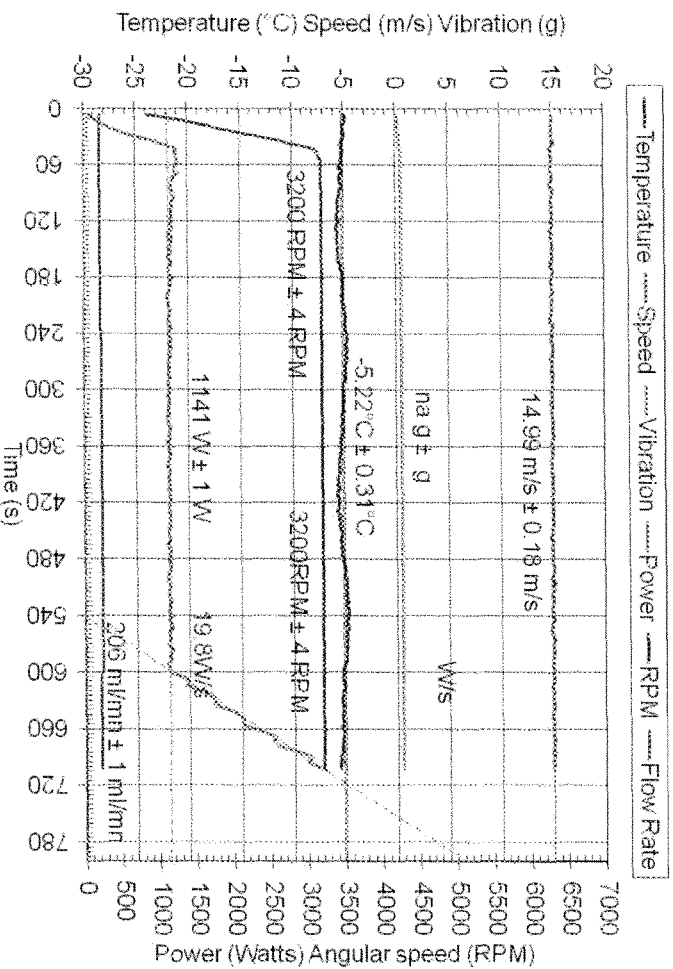
SRB-II 097



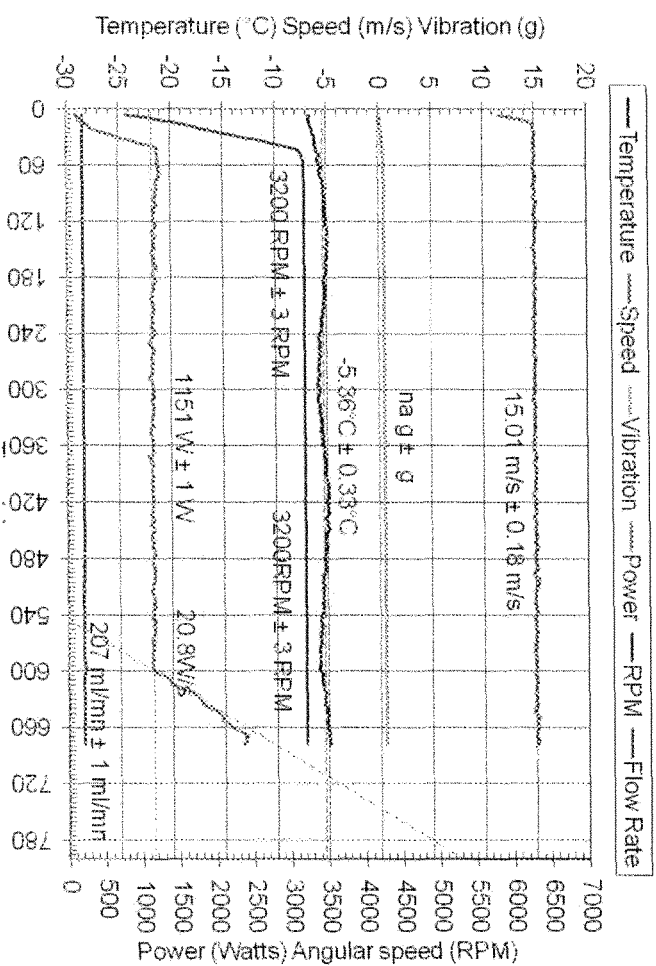
SRB-II 098



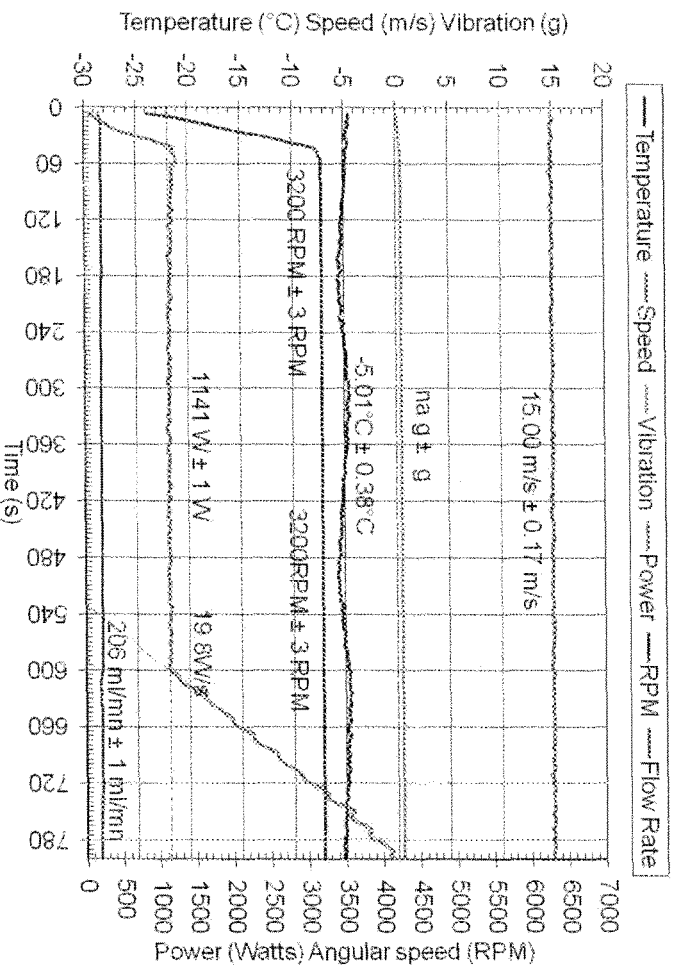
SRB-II 099



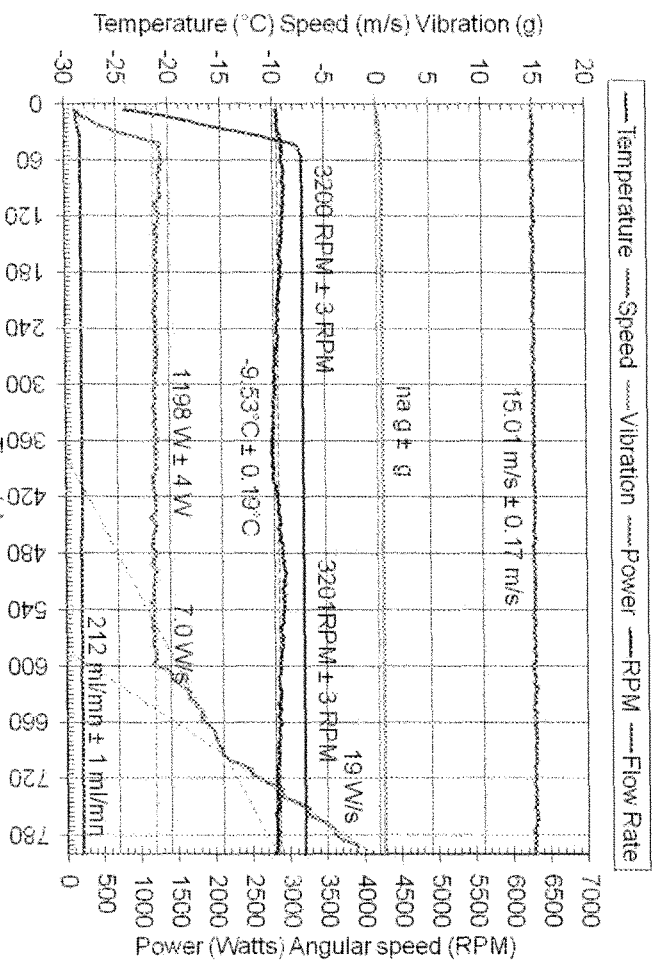
SRB-II 100



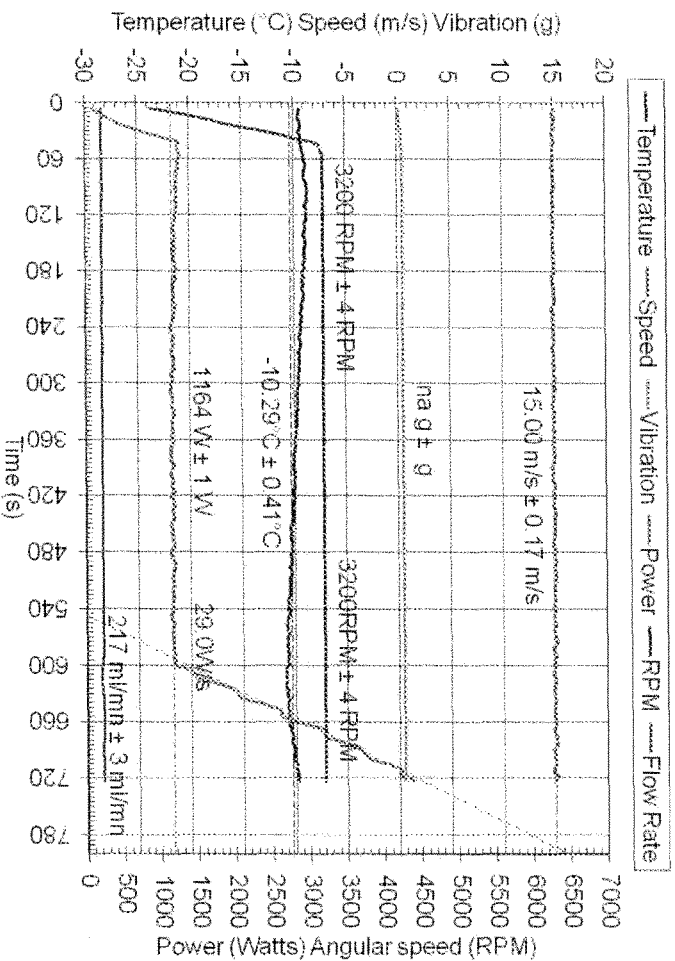
SRB-II 101



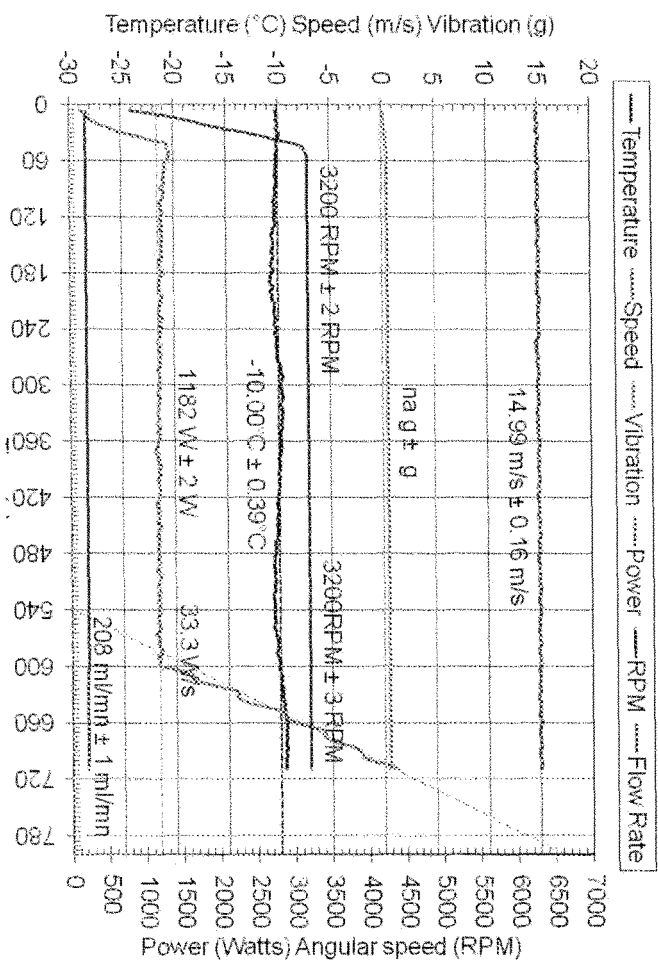
SRB-II 102



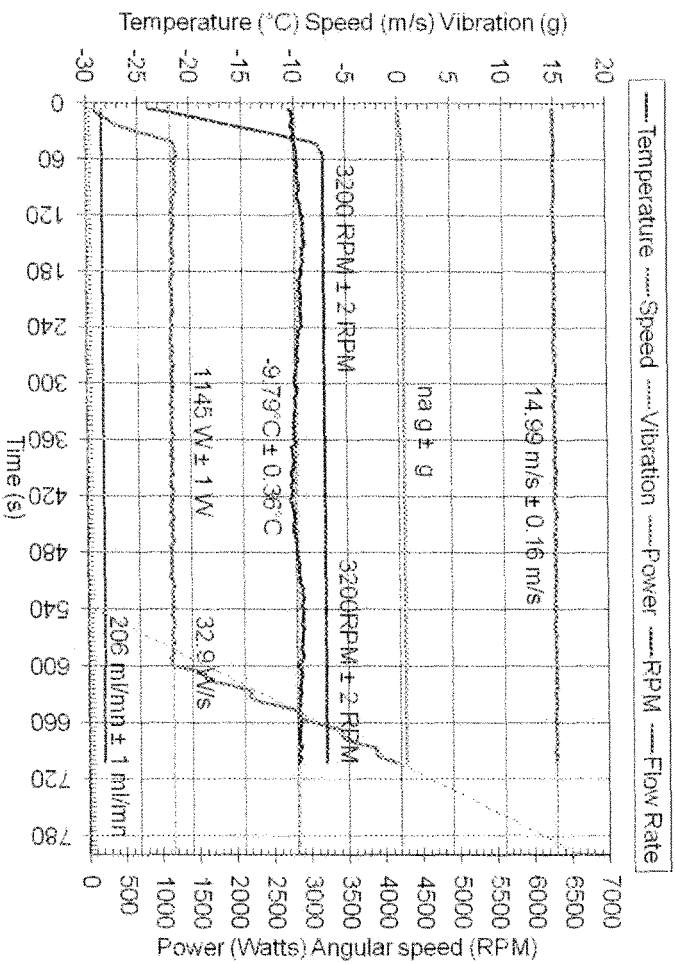
SRB-II 103



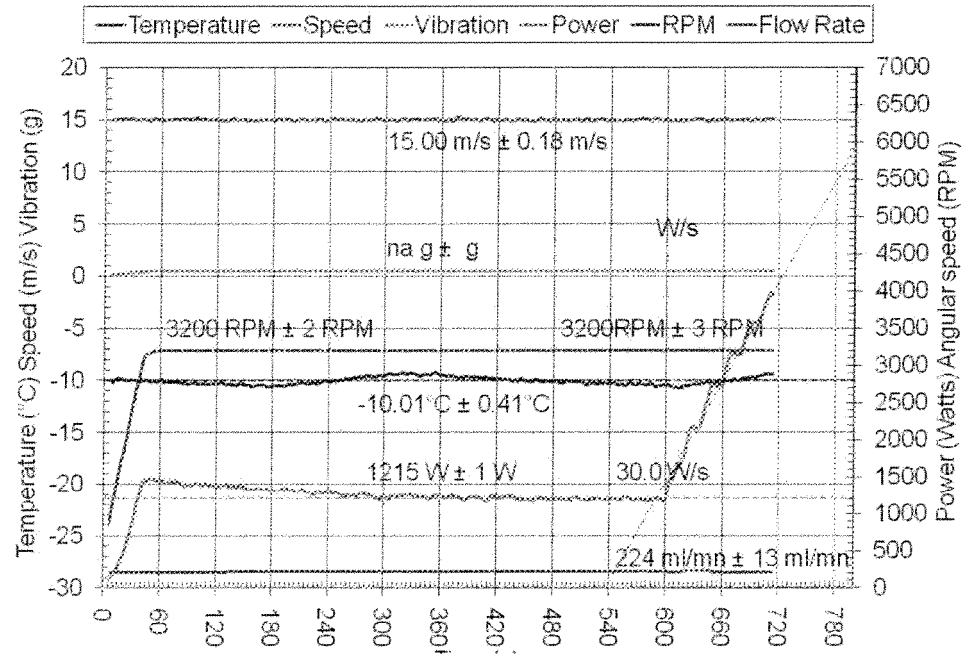
SRB-II 104



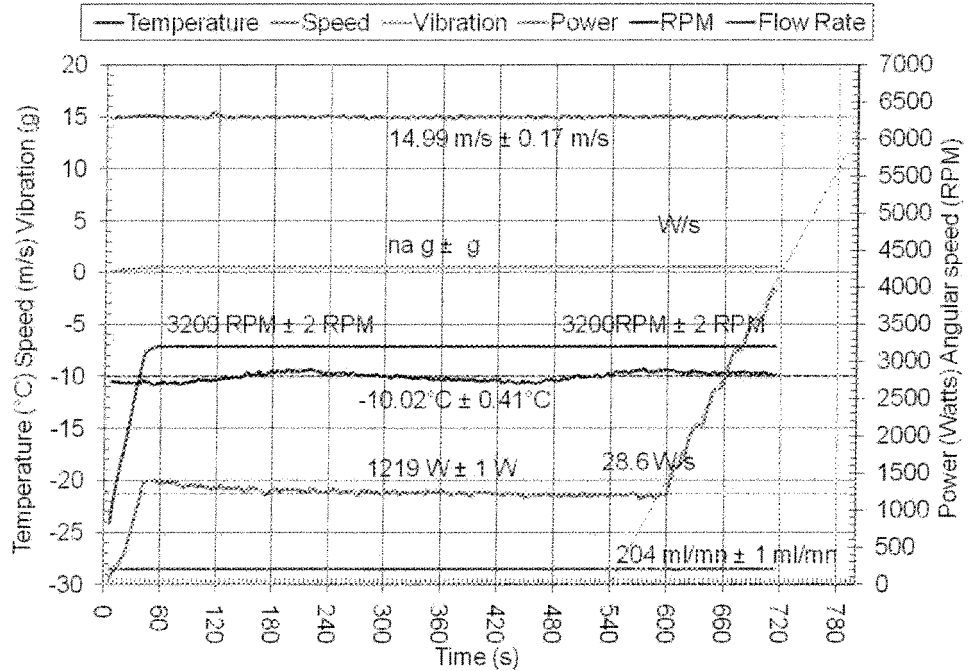
SRB-II 105



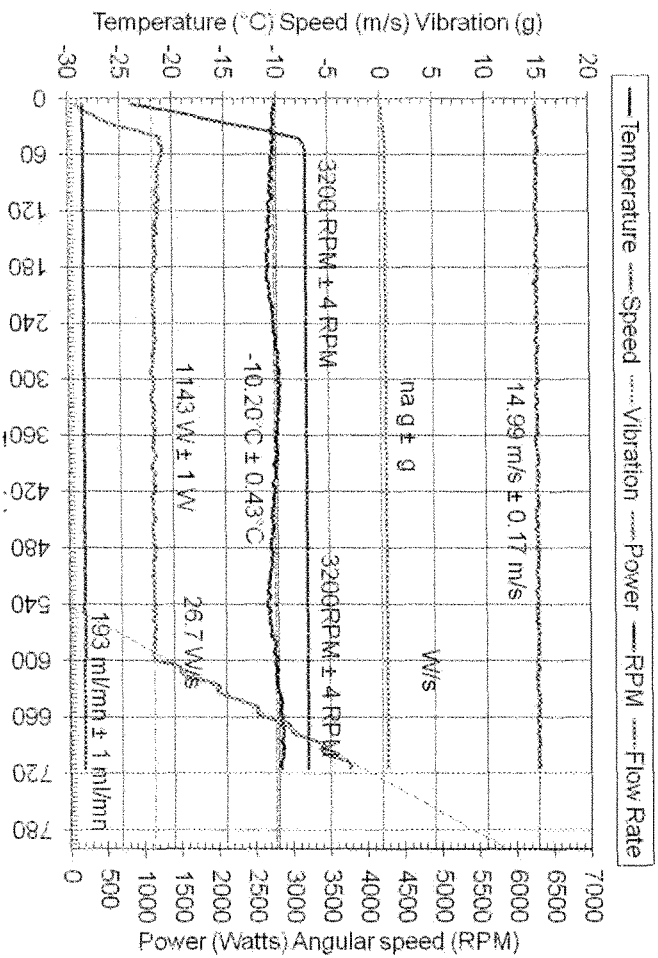
SRB-II 106



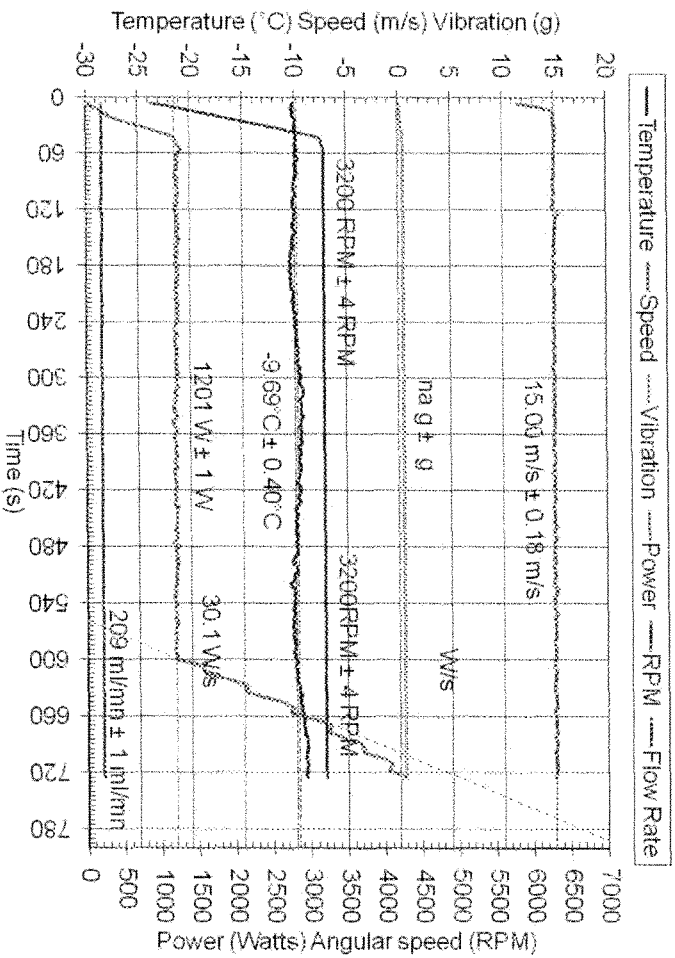
SRB-II 107



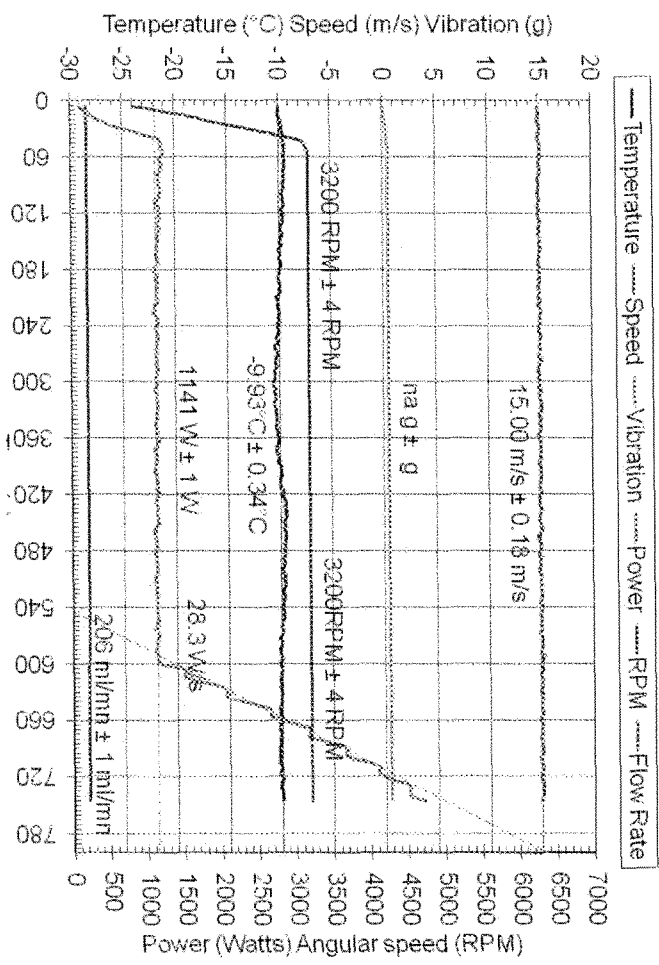
SRB-II 108



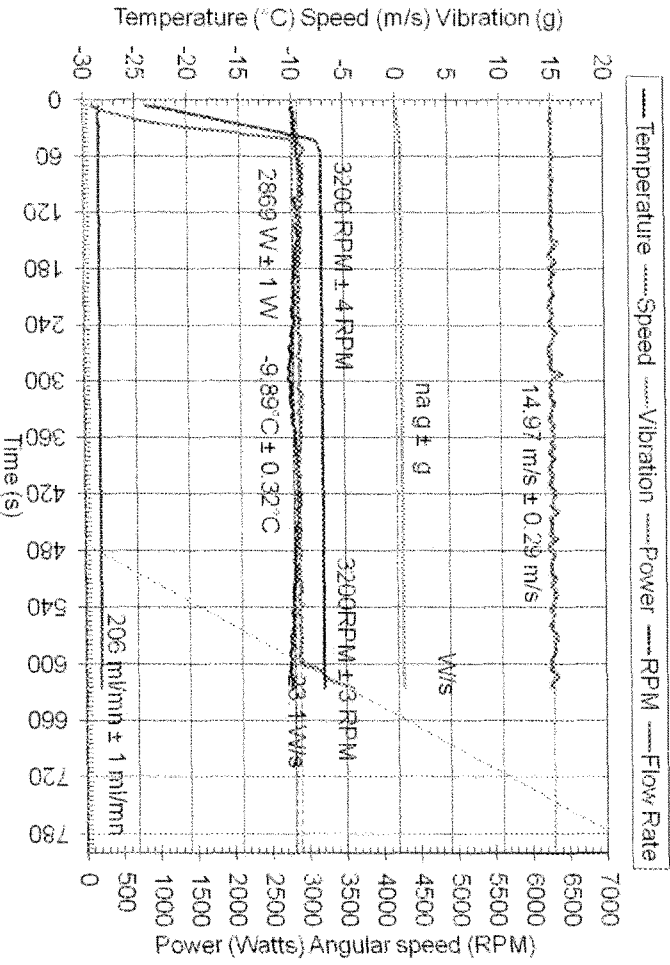
SRB-II 109



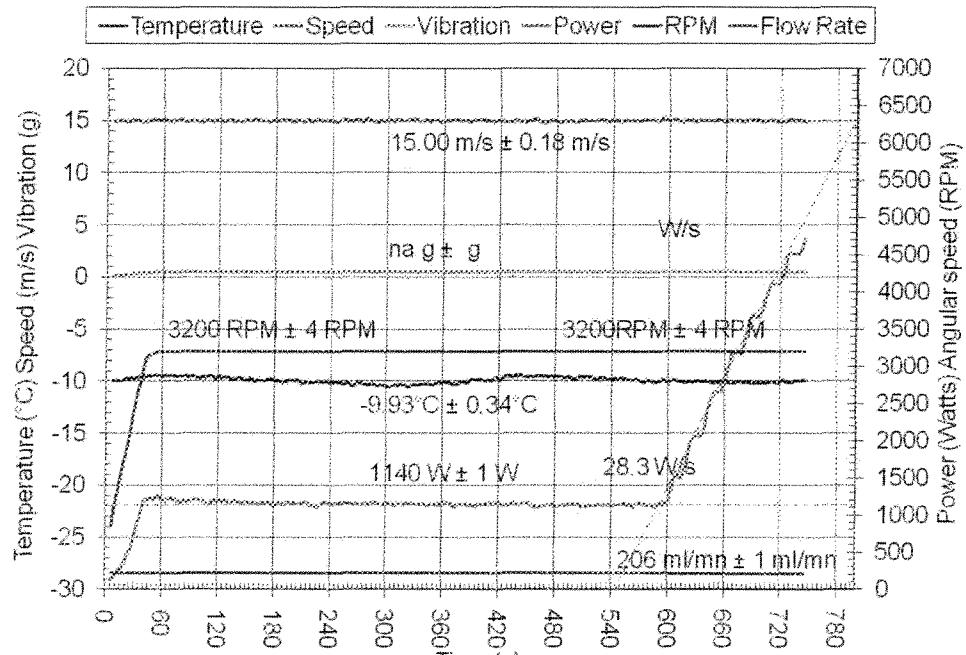
SRB-II 110



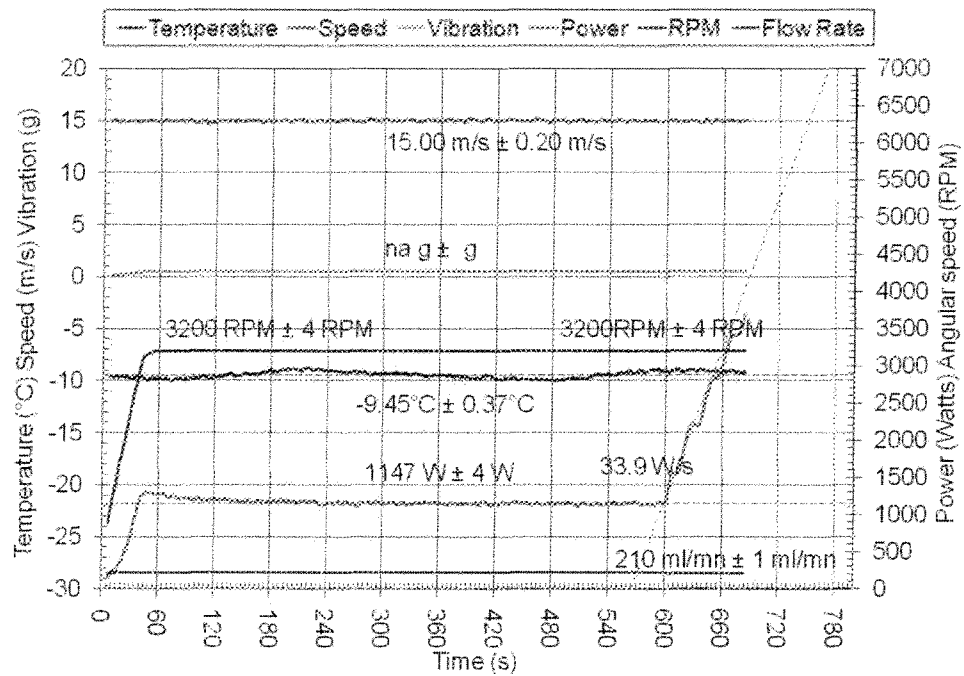
SRB-II 111



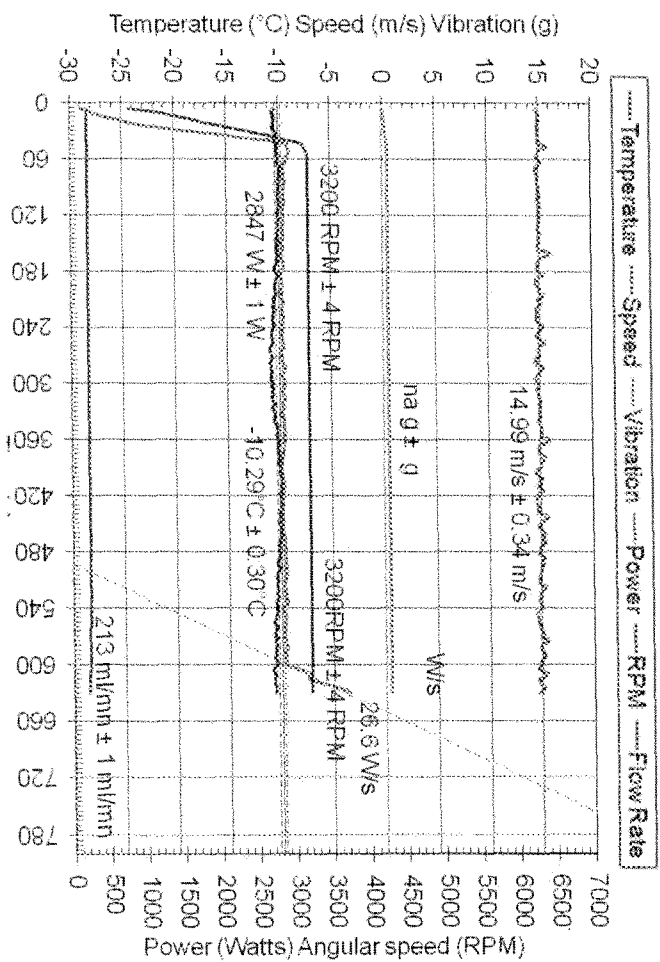
SBR 112



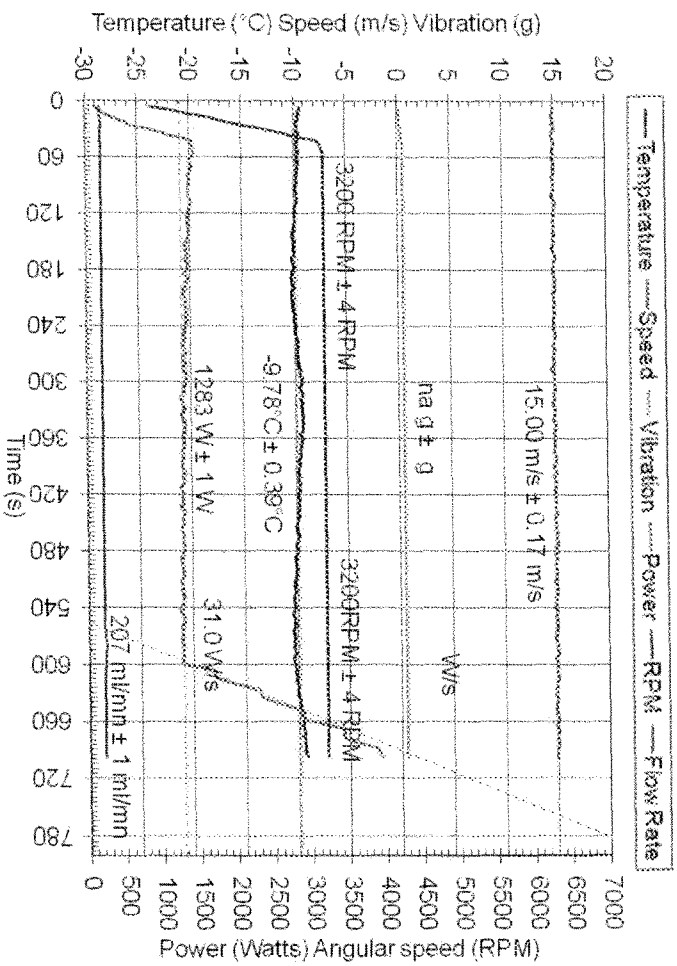
SBR 113



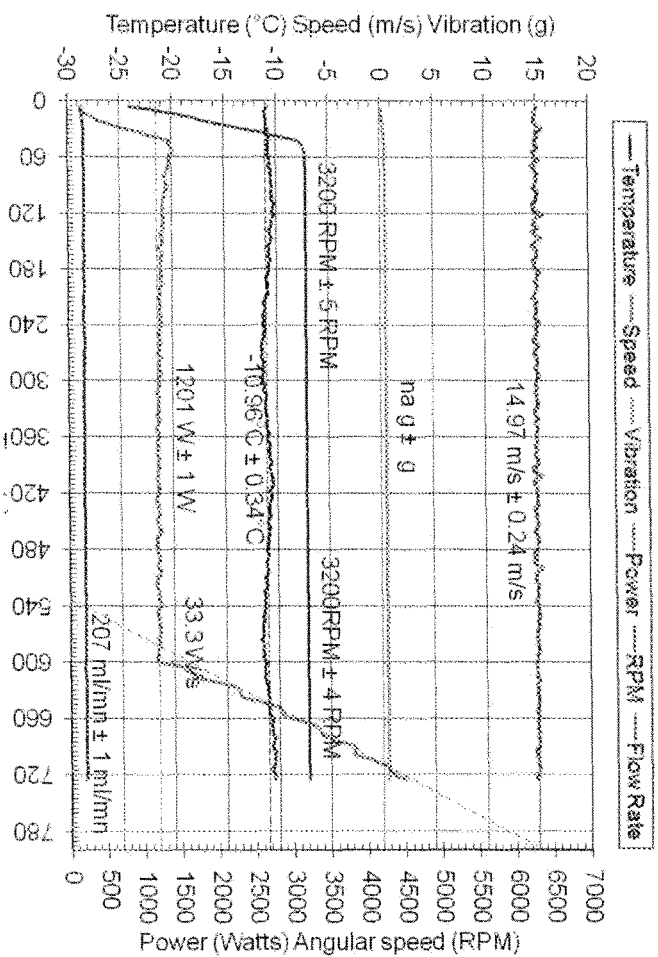
SRB-II 114



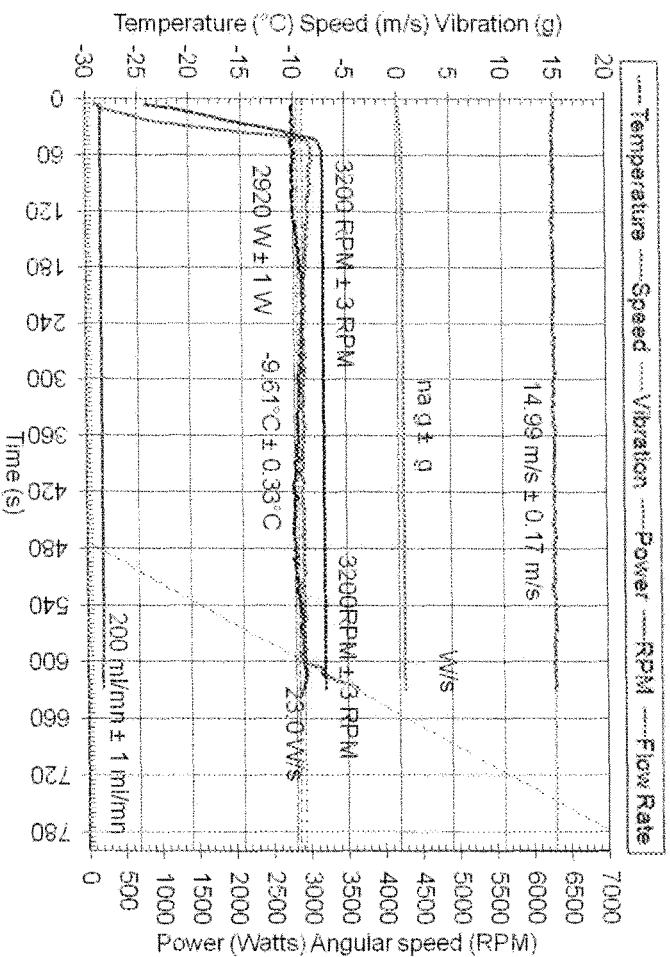
SRB-II 115



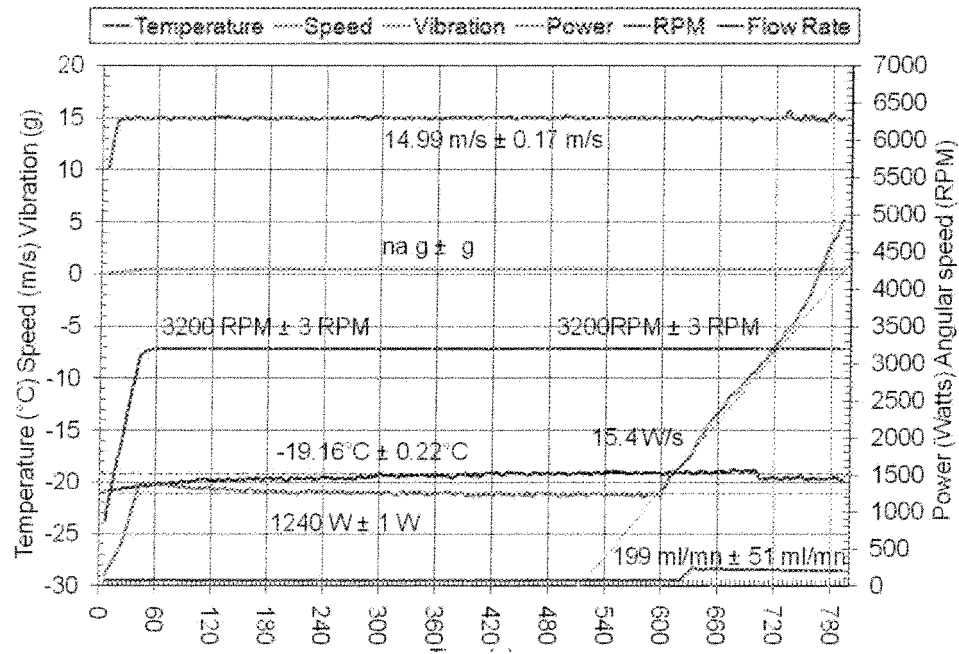
SRB-II 116



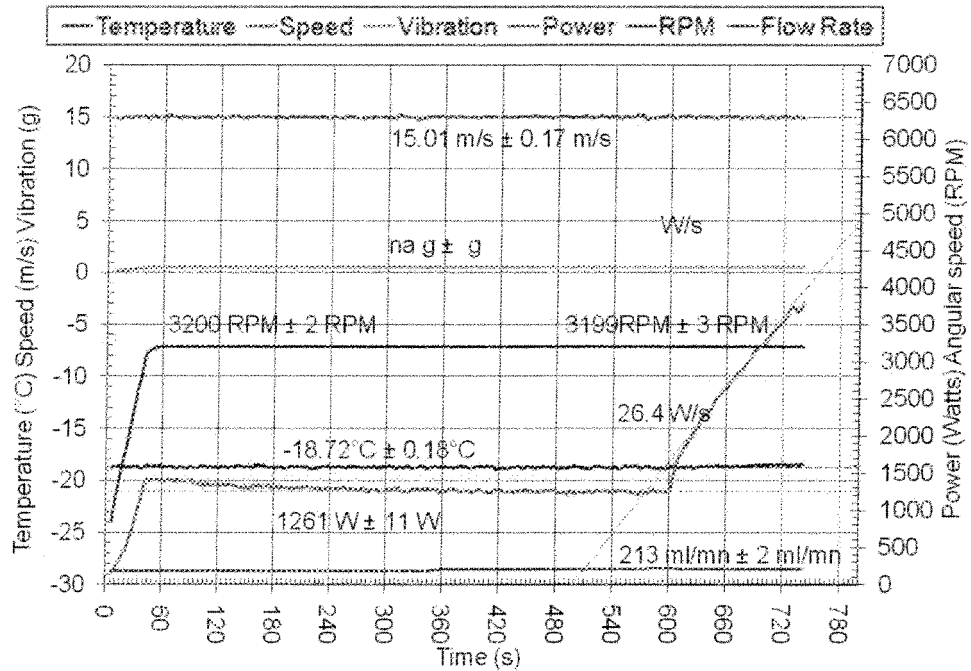
SRB-II 117



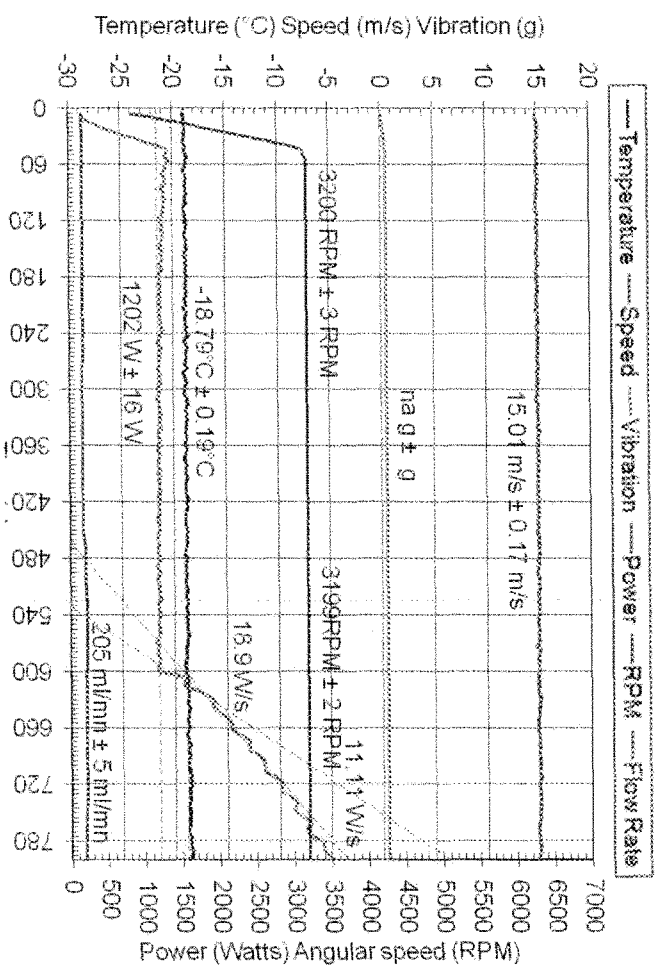
SRB-II 118



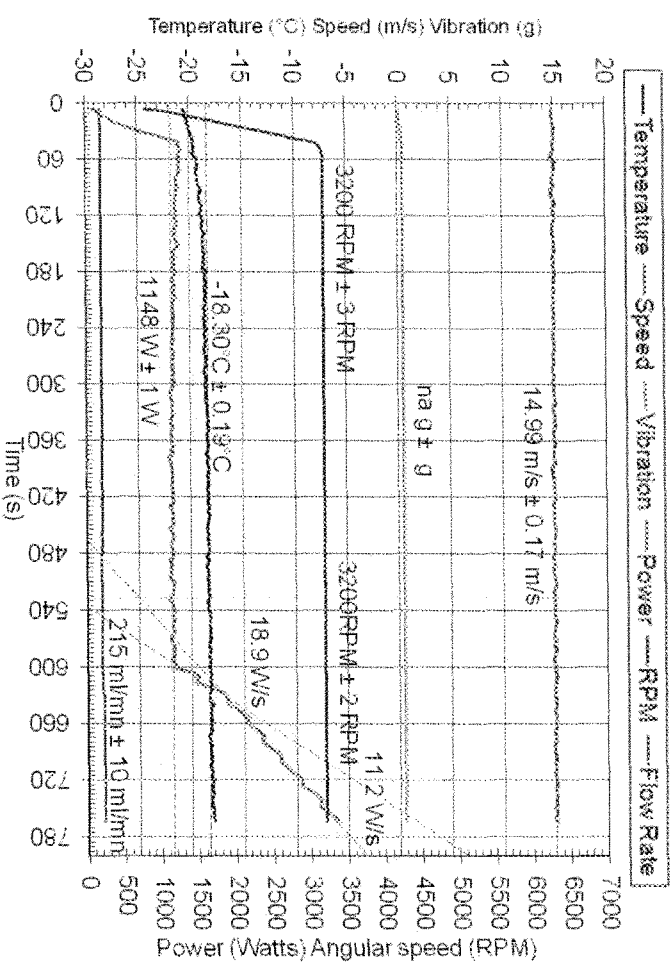
SRB-II 119



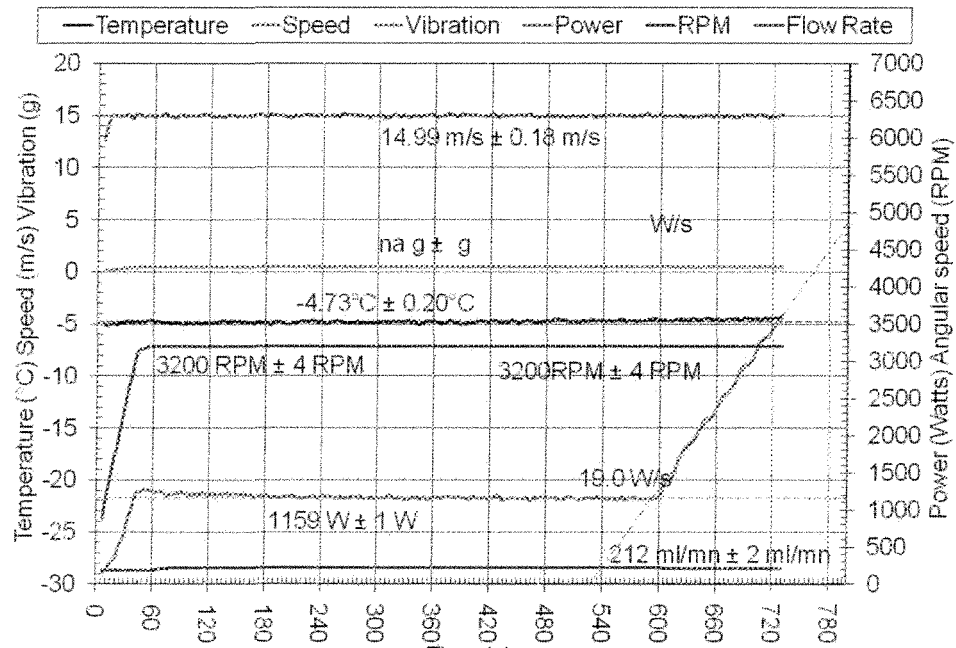
SRB-II 120



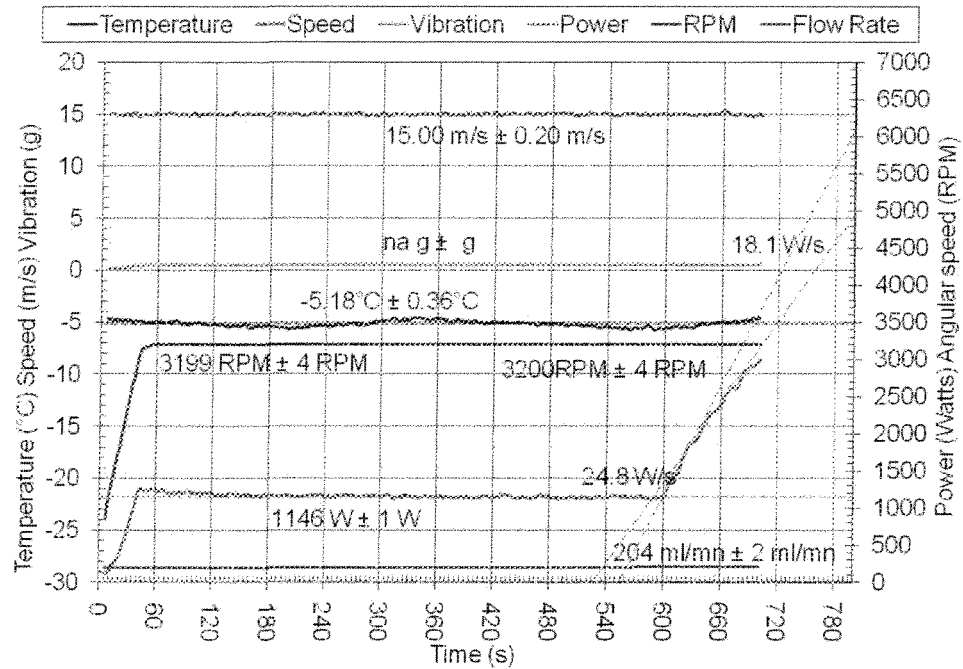
SRB-II 121



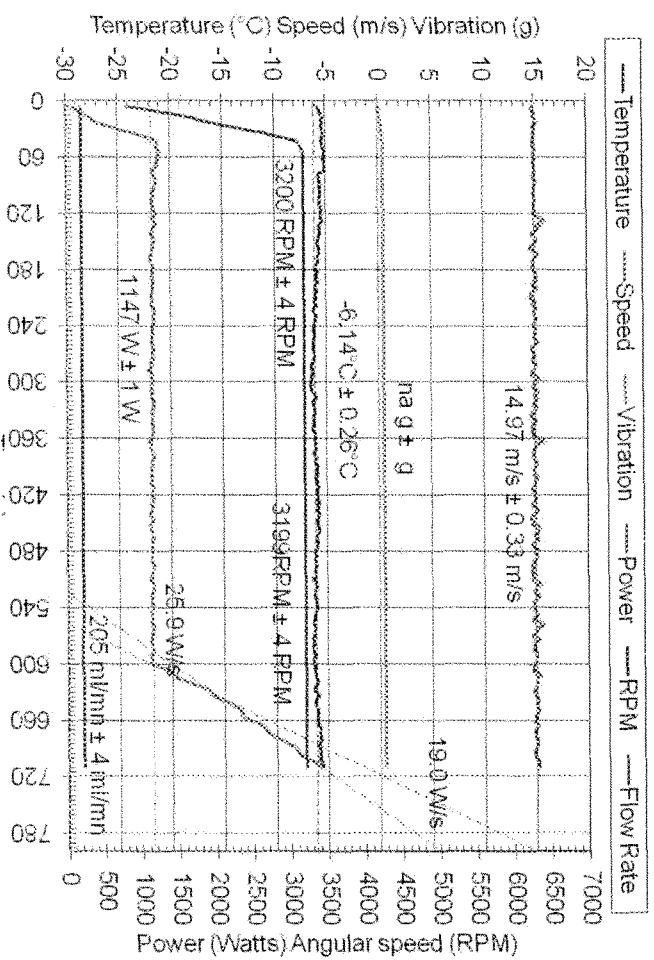
SRB-II 122



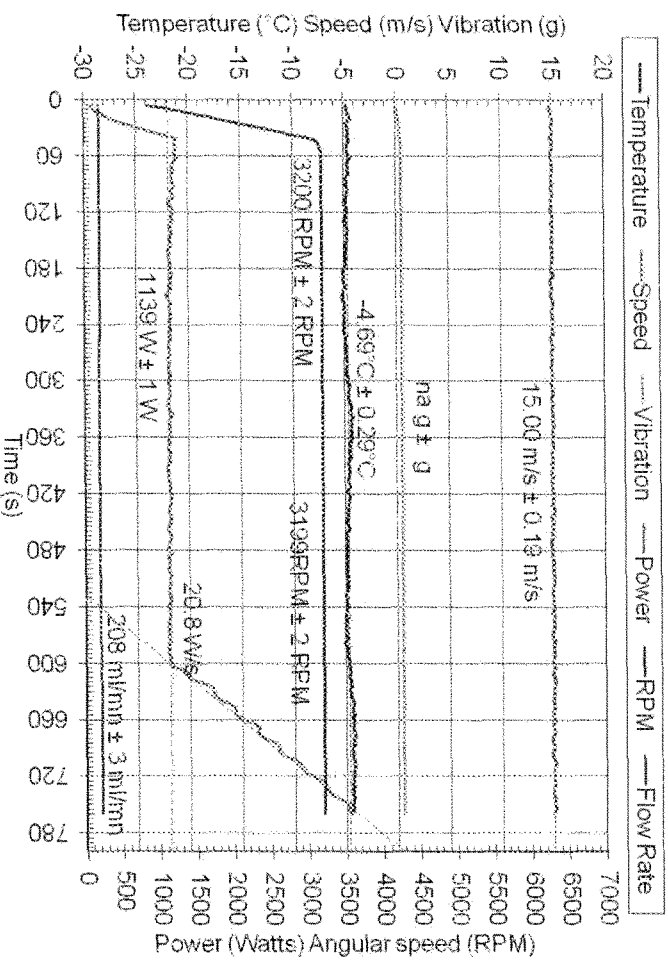
SRB-II 123



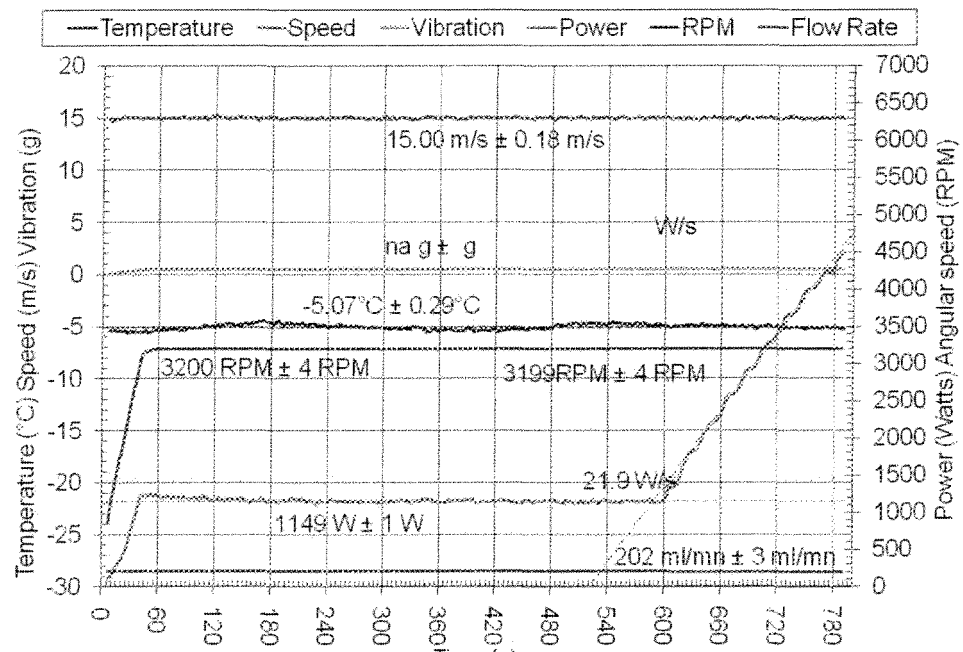
SRB-II 124



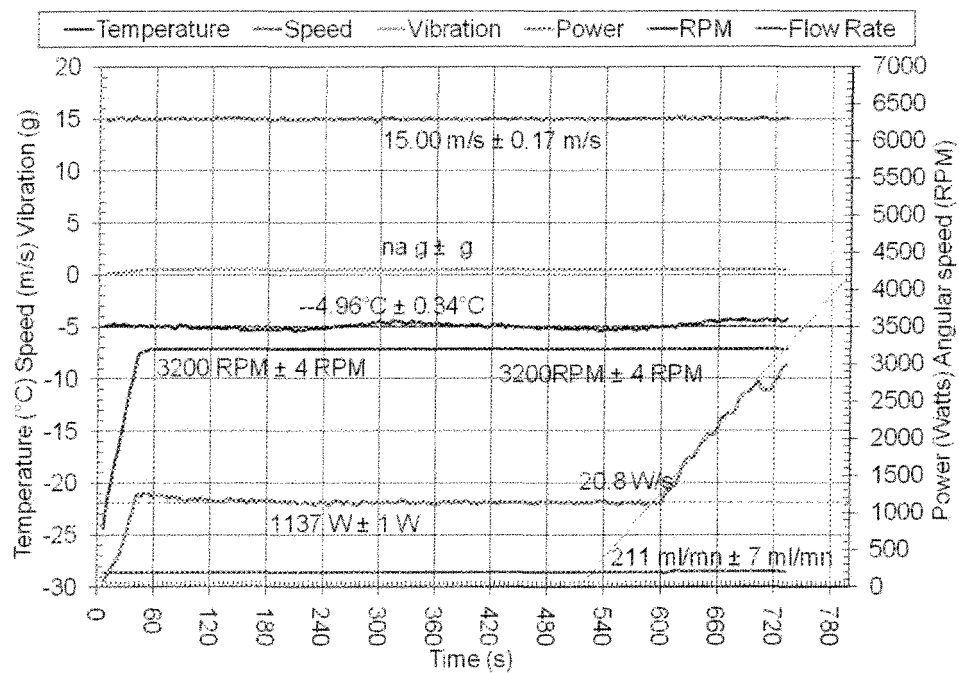
SRB-II 125



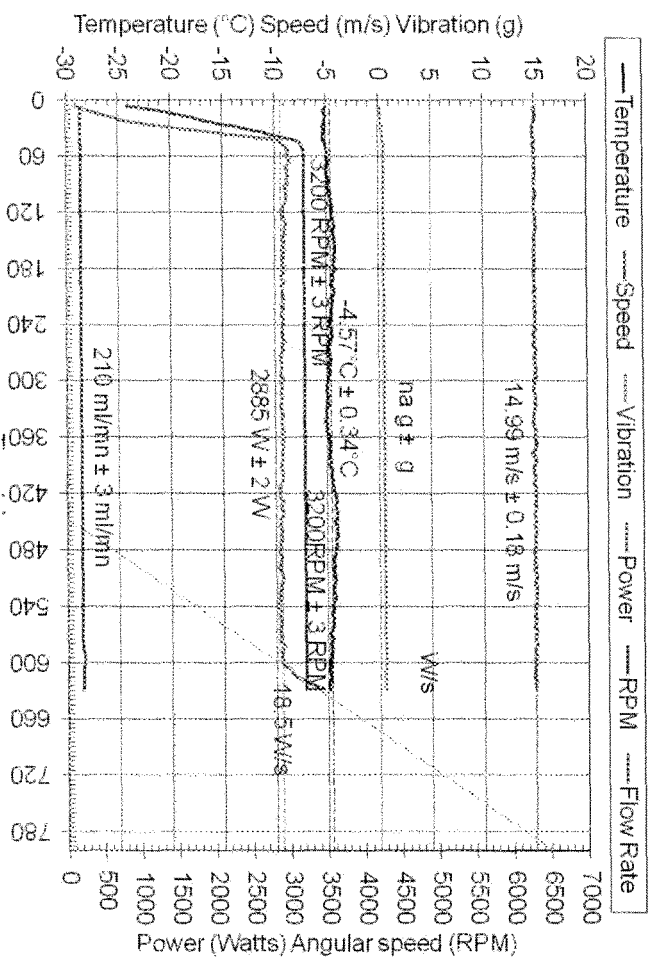
SRB-II 126



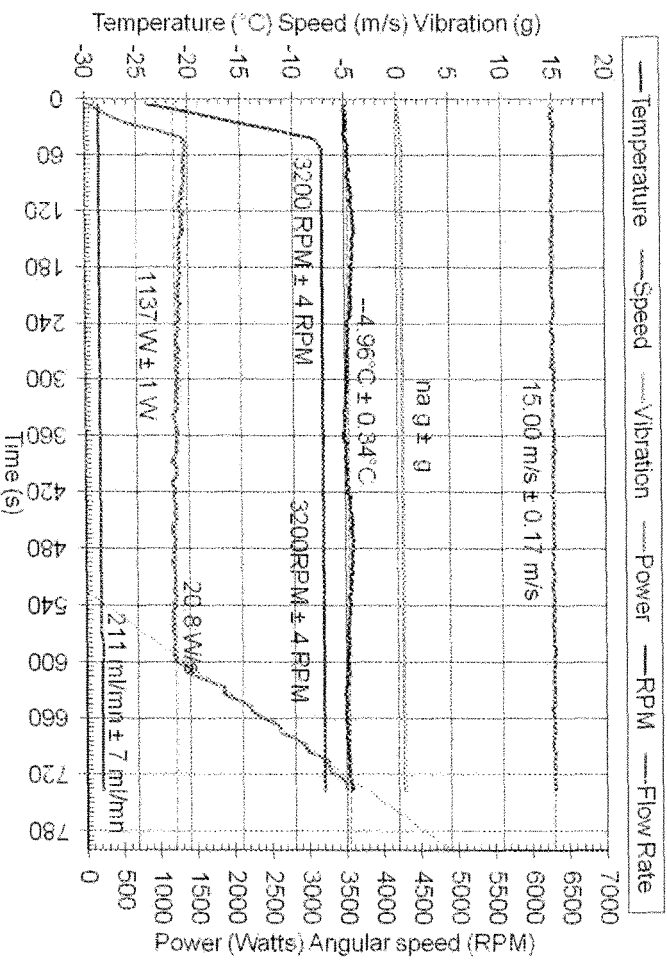
SRB-II 127



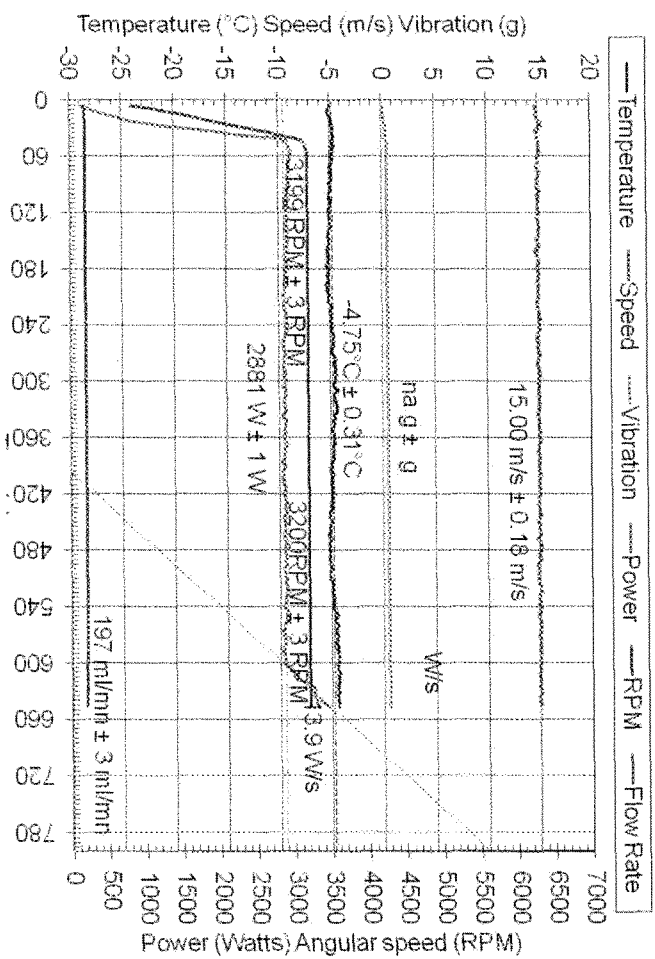
SRB-II 128



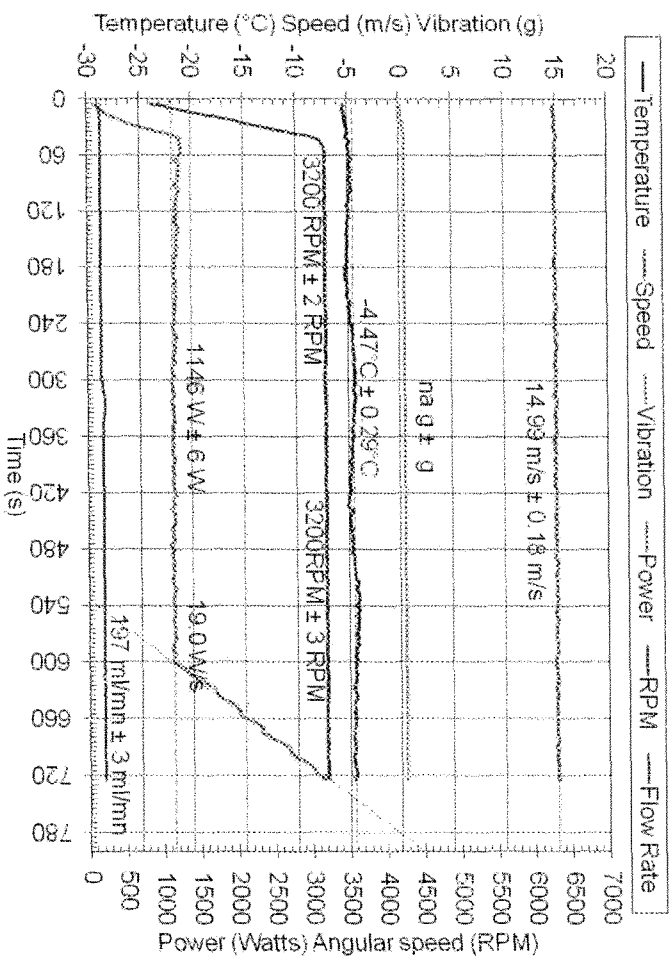
SRB-II 129



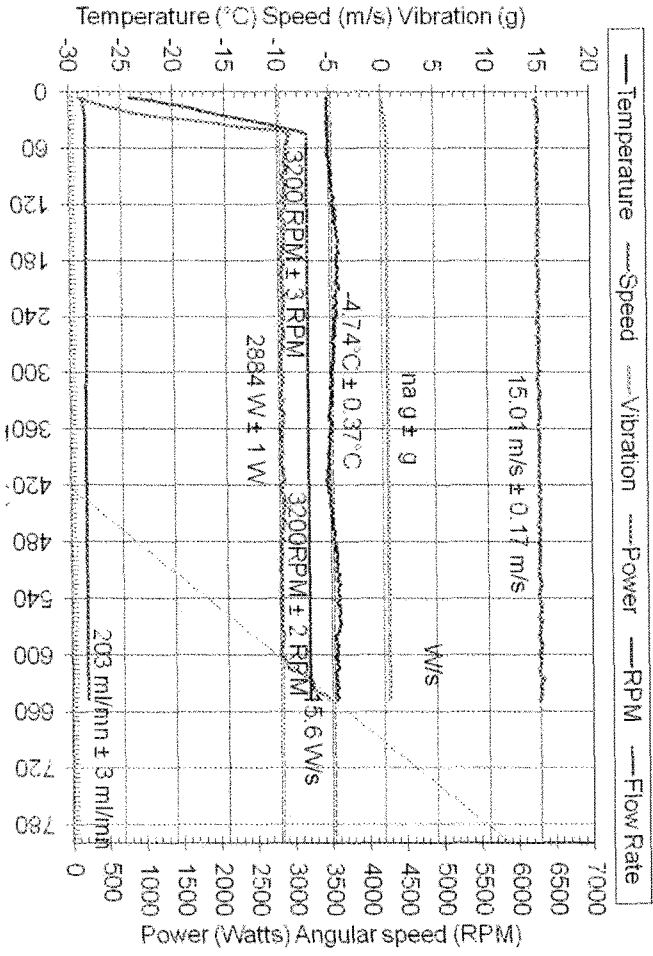
SRB-II 130



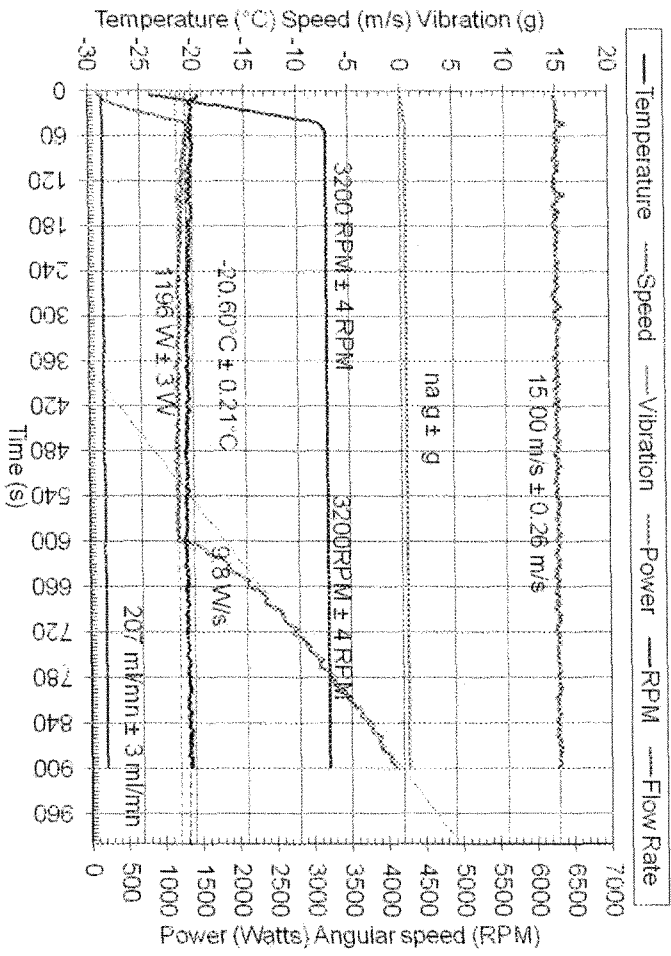
SRB-II 131



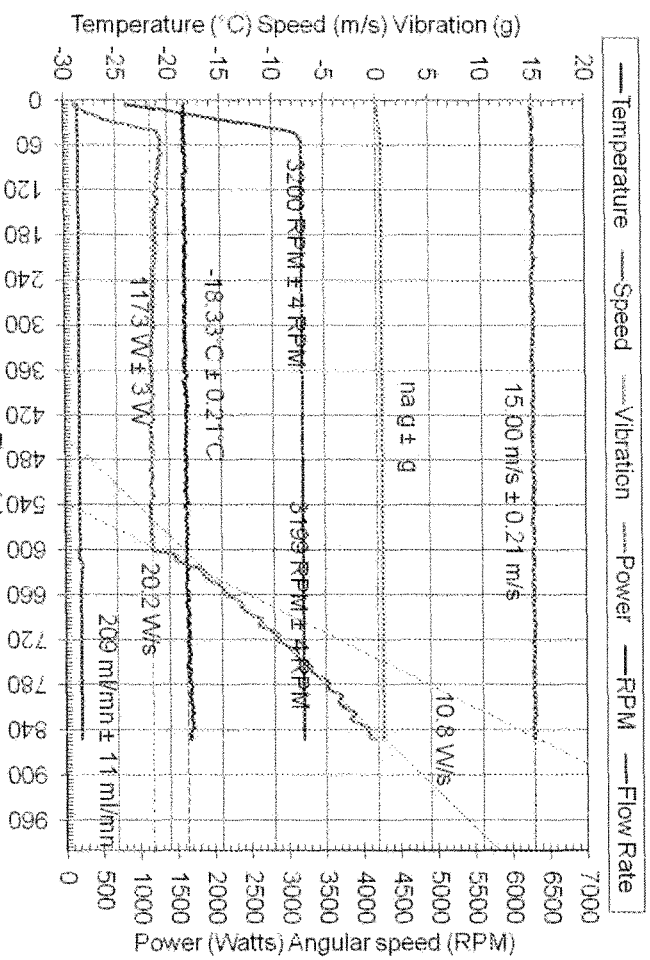
SRB-II 132



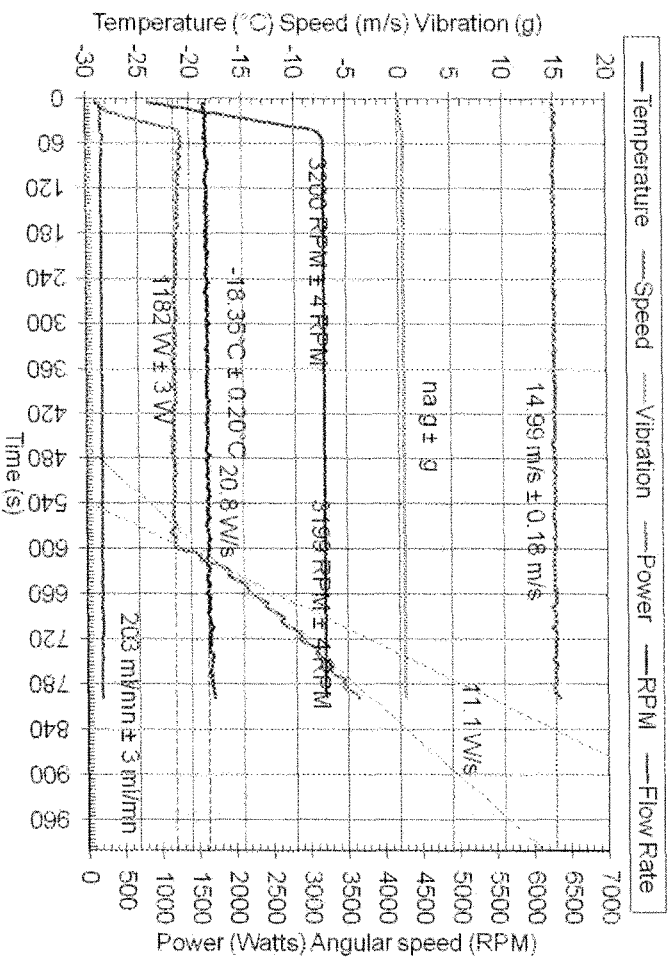
SRB-II 133



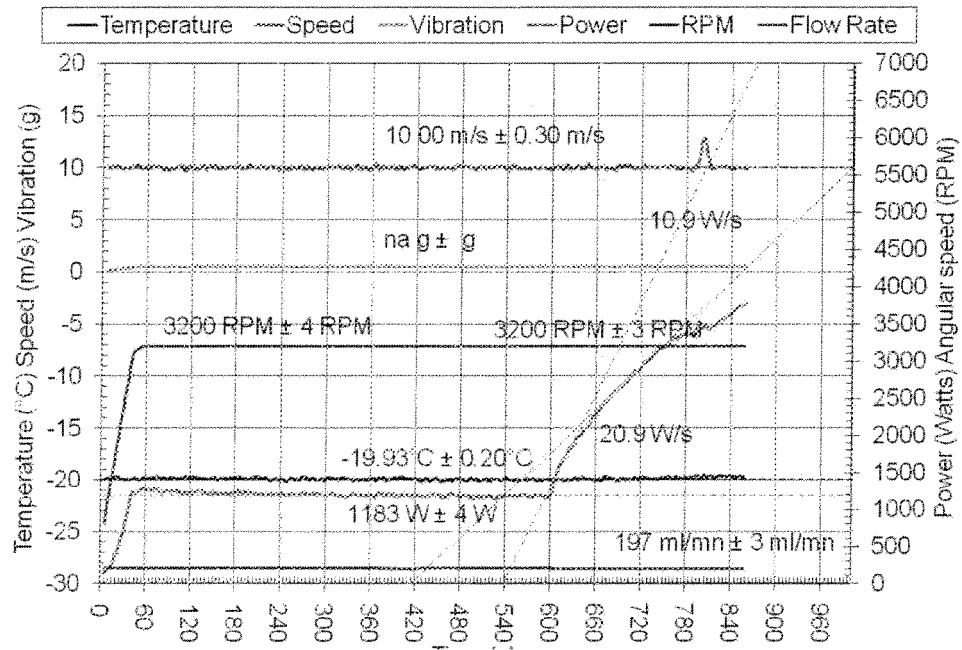
SRB-II 134



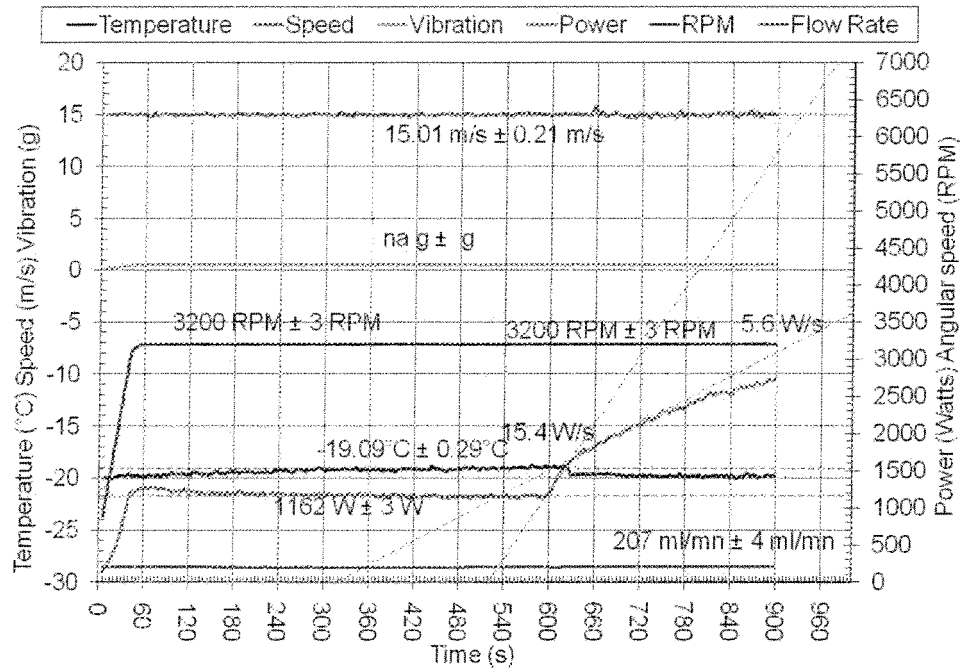
SRB-II 135



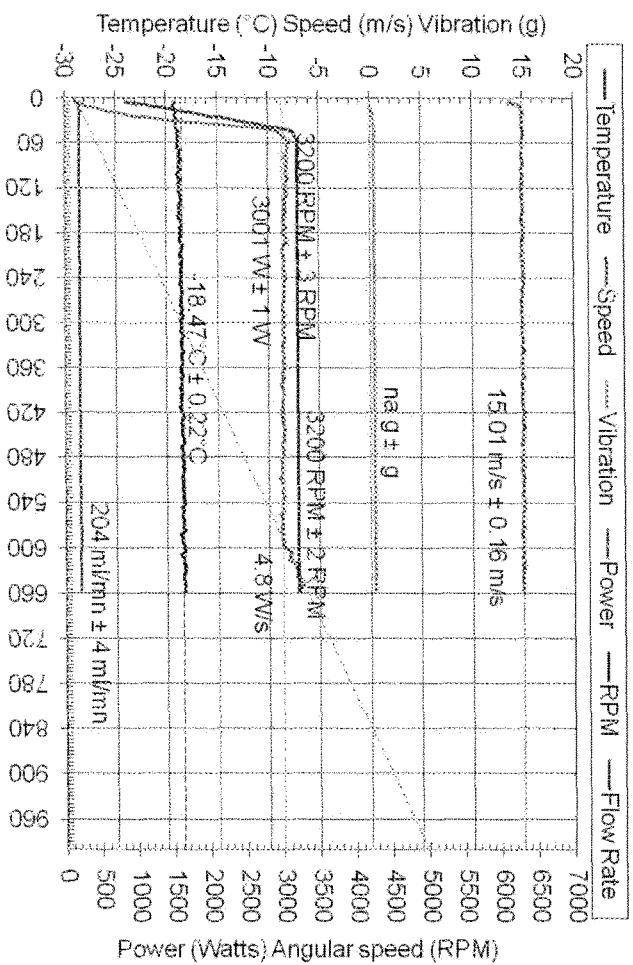
SRB-II 136



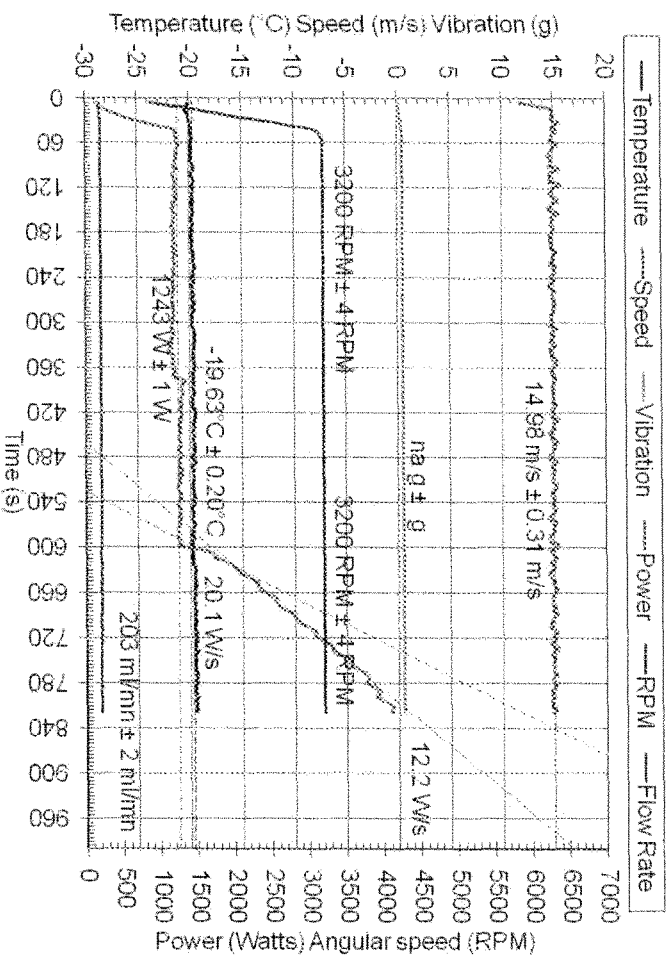
SRB-II 137



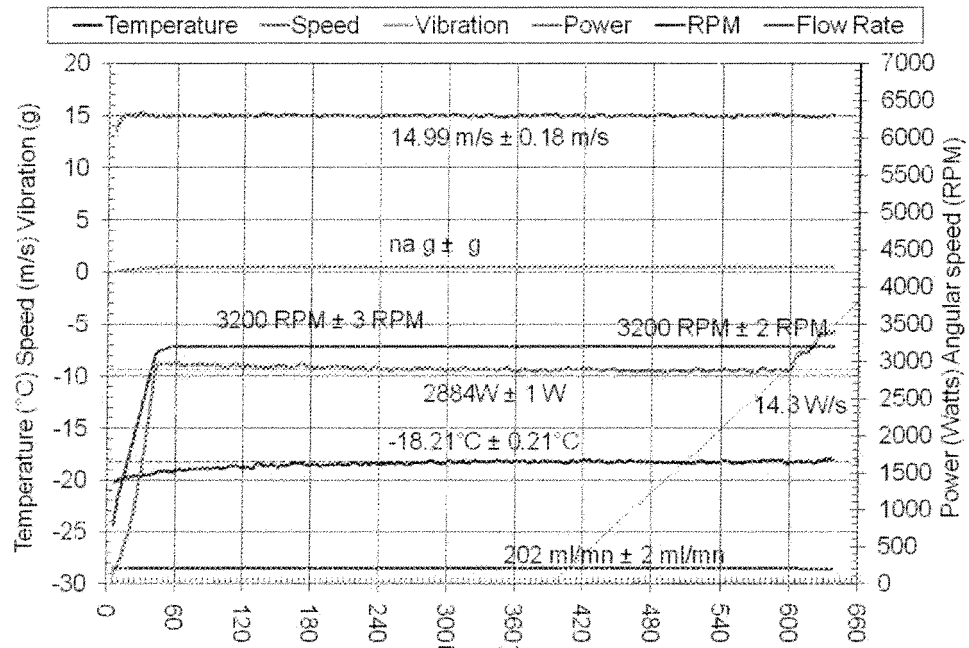
SRB-II 138



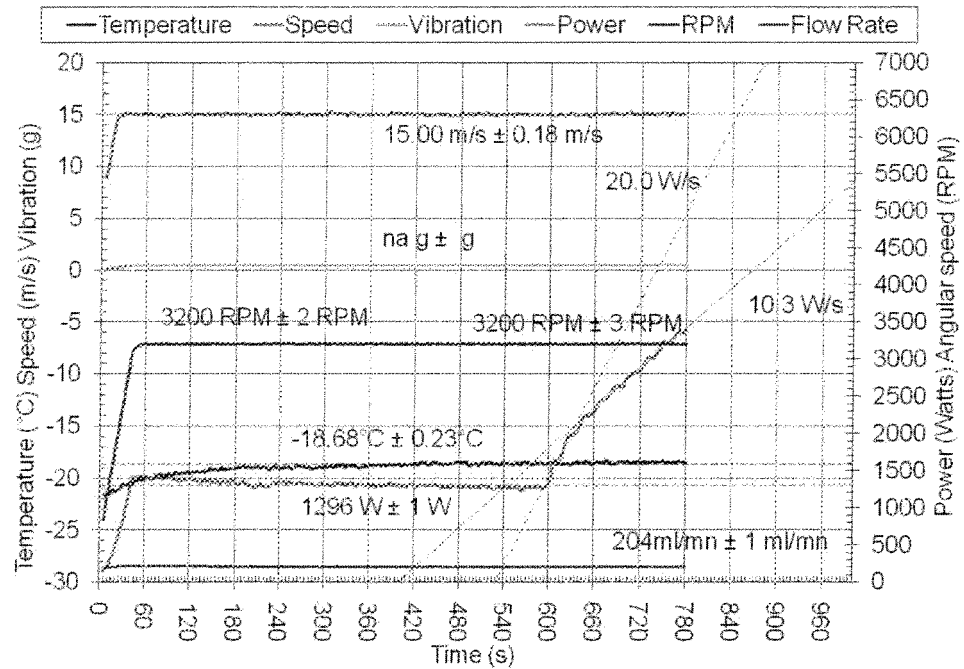
SRB-II 139



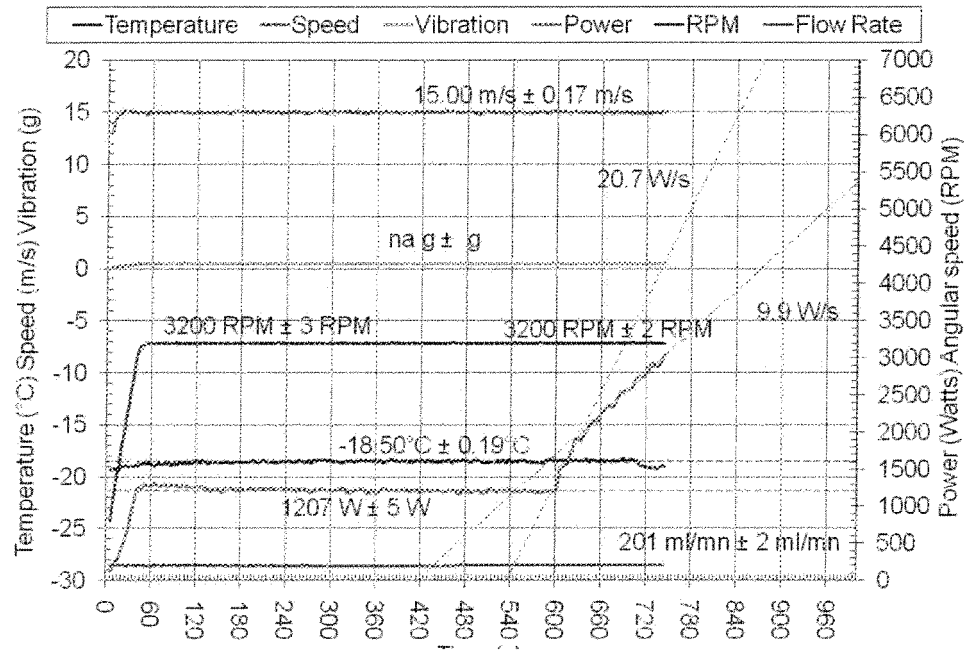
SRB-II 140



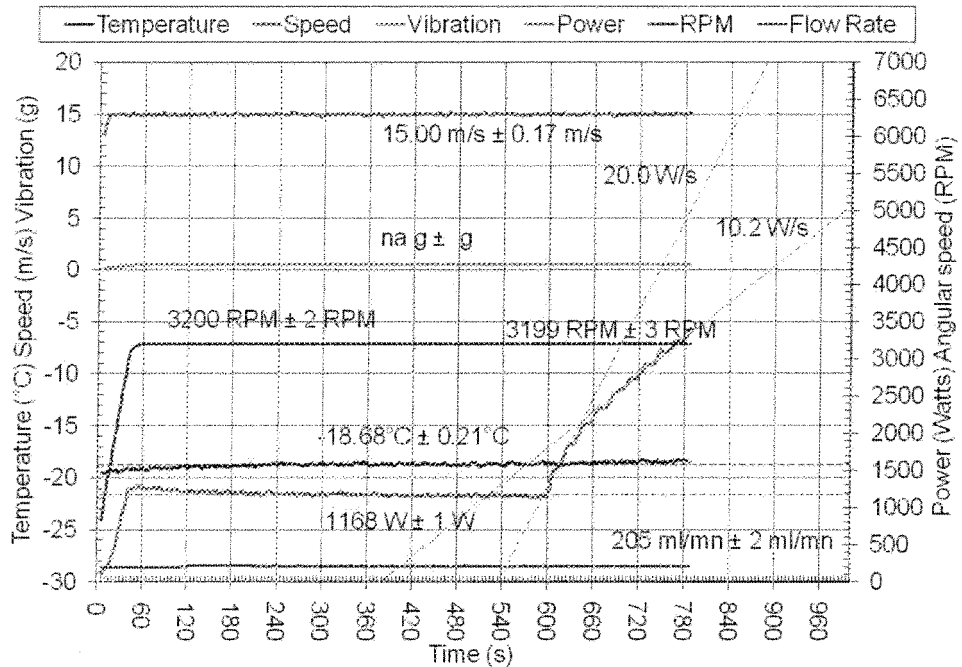
SRB-II 141



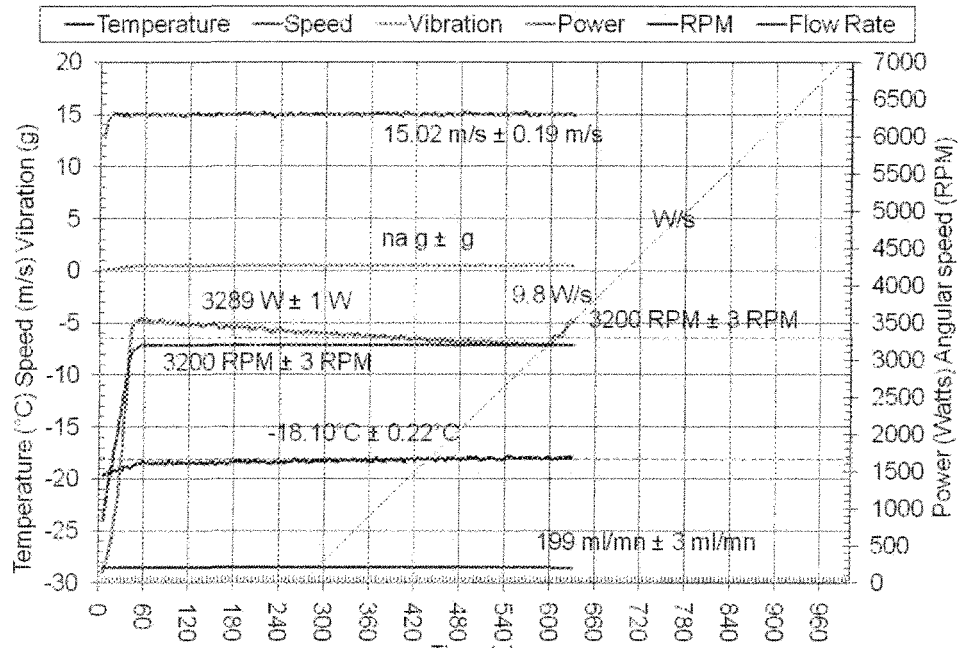
SRB-II 142



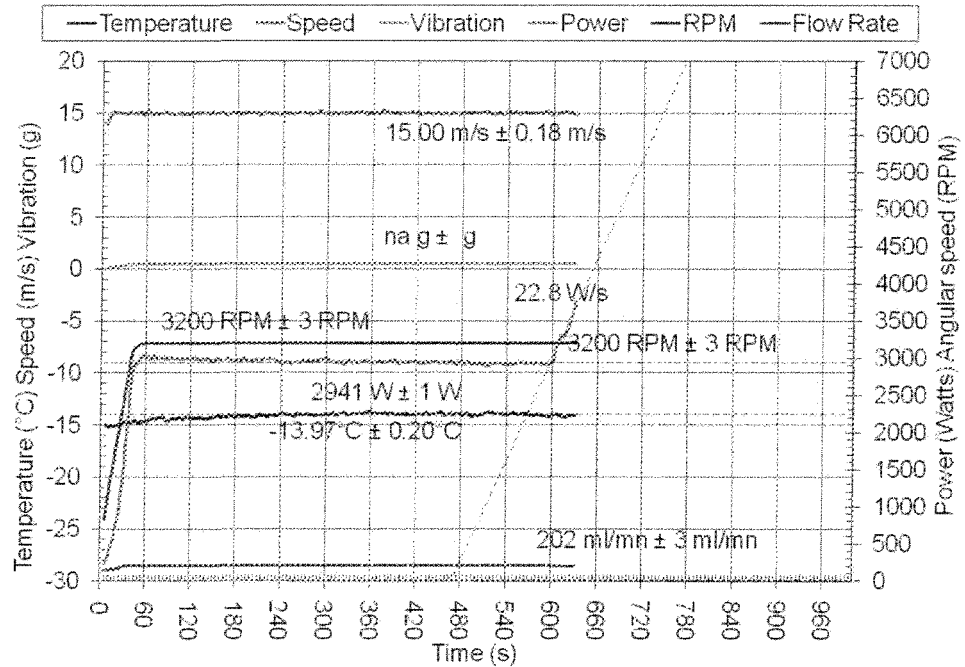
SRB-II 143



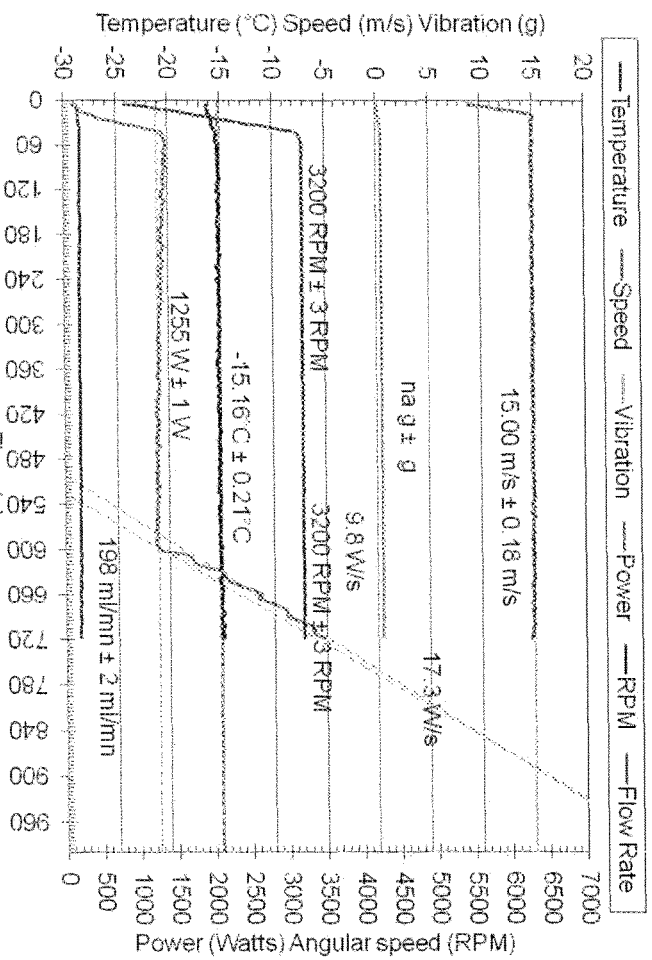
SRB-II 144



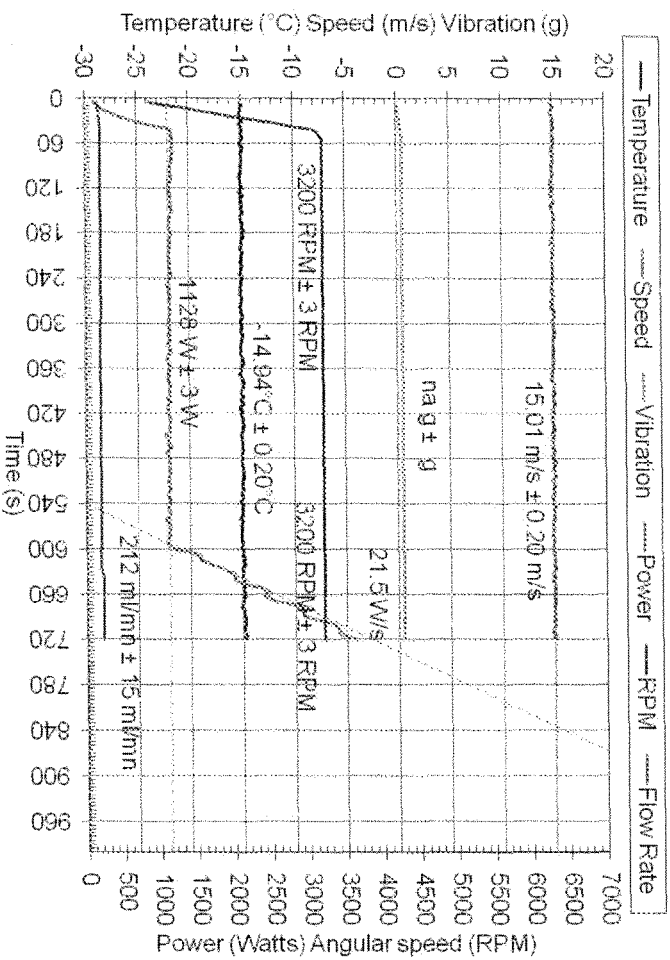
SRB-II 145



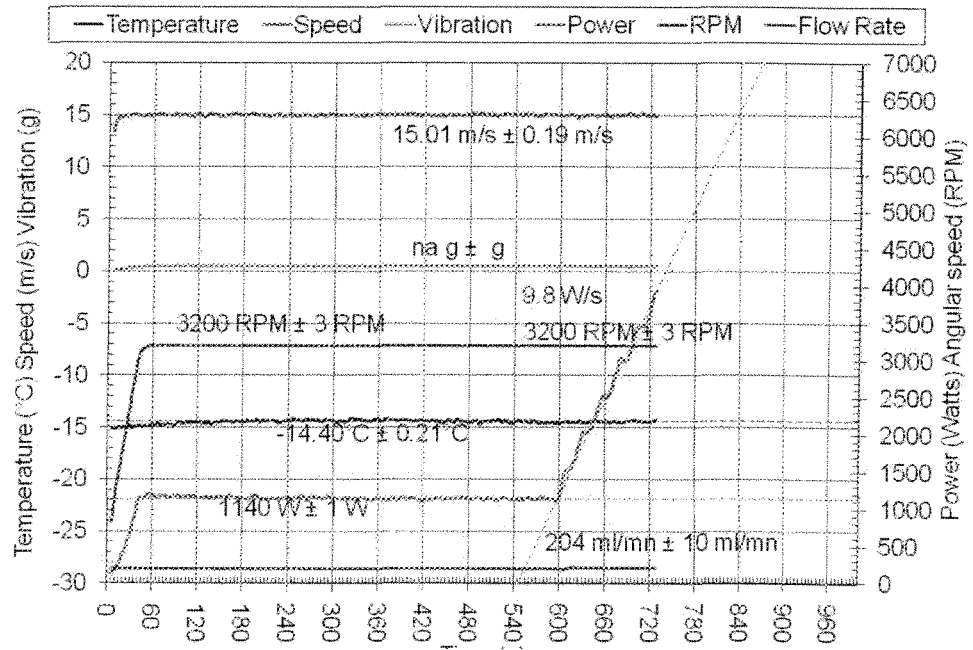
SRB-II 146



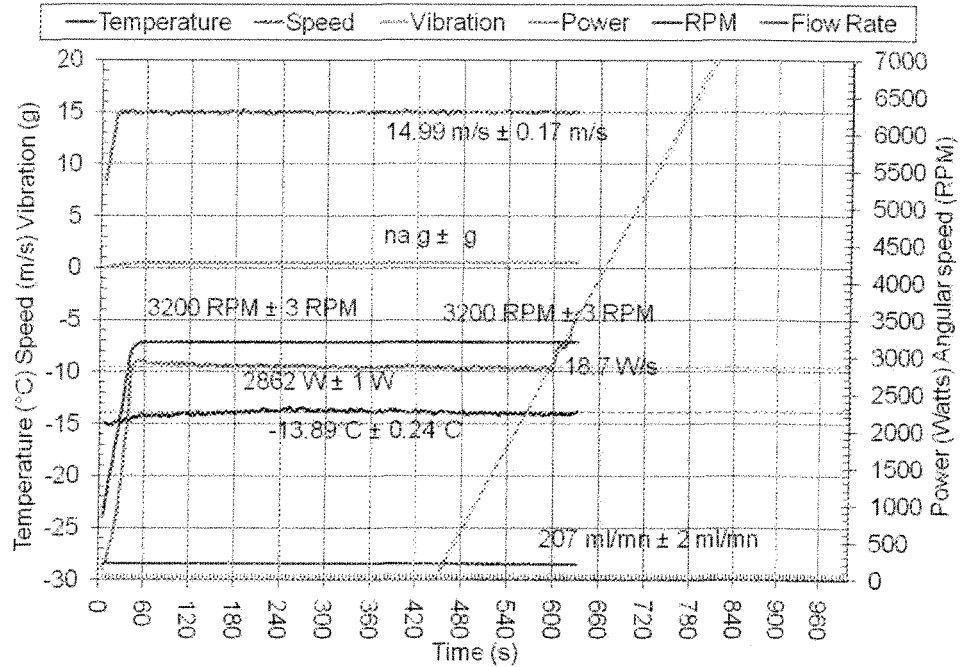
SRB-II 147



SRB-II 148



SRB-II 149



SRB-II 150