

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

PERTES ÉNERGÉTIQUES D'UNE ÉOLIENNE À PARTIR DES FORMES
DE GLACE SIMULÉES NUMÉRIQUEMENT

MÉMOIRE DE RECHERCHE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

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

PAR

MARIYA HRISTOVA DIMITROVA

17 Août 2009

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**PERTES ÉNERGÉTIQUES D'UNE ÉOLIENNE À PARTIR DES FORMES
DE GLACE SIMULÉES NUMÉRIQUEMENT**

MÉMOIRE DE RECHERCHE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**Comme exigence du programme de maîtrise en ingénierie
pour l'obtention du grade de maître en science appliquées (M. Sc. A.)**

PAR

MARIYA HRISTOVA DIMITROVA

17 Août 2009

RÉSUMÉ

Les milieux nordiques disposent généralement de régions très bien exposées au vent et ces régions semblent idéales pour l'exploitation des éoliennes. Malheureusement, les problèmes liés au givrage y sont fréquents et ont des sérieuses conséquences sur la production des éoliennes, leur maintenance et leur durée de vie.

Le givrage, qui est caractéristique des régions au climat froid, est le phénomène d'accumulation de glace sur les pales des éoliennes. Il est causé par la pluie verglaçante, la bruine et le brouillard givrant au niveau du sol ou le givrage dans les nuages en altitude, ou le gel, lorsque l'éolienne est installée à proximité des masses d'eau. Le givrage diminue les performances aérodynamiques en provoquant des pertes de puissance et par conséquent des pertes énergétiques.

L'impact du givrage est difficile à quantifier sans essais expérimentaux et simulations numériques en raison du manque de données réelles sur le terrain. Le coût des essais en soufflerie étant élevé, une approche par simulations numériques permet de fournir rapidement des informations sur les pertes de performances aérodynamiques et énergétiques dans différentes configurations d'éoliennes et de conditions météorologiques. Combiner des mesures météorologiques nombreuses à des modèles numériques puissants est essentiel pour évaluer adéquatement l'impact du givre sur le fonctionnement d'une éolienne et sa production annuelle.

Un modèle numérique, nommé PROICET, est développé pour calculer la production annuelle d'une éolienne lors de givrage et est présenté dans ce mémoire. Ce modèle, bon marché et relativement simple, simule la formation de glace sur les pales des éoliennes, calcule les coefficients de portance et de traînée et les courbes de puissance. Puis, lorsqu'il est couplé à des scénarios du vent et d'évènement givrant, il permet de quantifier les pertes de production annuelles d'une éolienne induites par la glace. L'originalité de ce modèle consiste en l'intégration de trois logiciels, à savoir CIRALIMA, XFOIL et PROPID, avec le modèle éolien générique, dans un processus séquentiel dans lequel les résultats du premier logiciel sont les entrées du deuxième et ainsi de suite. Ceci permet d'évaluer les pertes de performances aérodynamiques, les pertes de puissance et enfin les pertes de production annuelle d'une éolienne dues au givrage. De plus, c'est la première fois qu'une telle étude est produite pour prédire numériquement les pertes énergétiques d'une éolienne dues au givre.

Le modèle éolien générique MEG, intégré dans PROICET, est aussi présenté dans ce mémoire. Il est une représentation technique de la pale de l'éolienne qui se compose d'un profil aérodynamique NACA 63-415, d'un angle de calage et d'une distribution de l'angle de vrillage et de la corde le long de la pale. Dans la suite, l'éolienne MEG signifie une éolienne Vestas V80 1.8 MW qui est modélisée en utilisant le modèle éolien générique.

Les modèles numériques PROICET et MEG sont validés pour l'éolienne Vestas V80 de 1.8 MW non givrée et pour le site de Murdochville (Québec) aux conditions atmosphériques standards. PROICET a été utilisé pour calculer la production de l'éolienne MEG lors de précipitations givrantes légères. Des scénarios du vent et du givrage, basés sur

le site de Murdochville, ont été utilisés pour calculer les pertes annuelles induites par la glace. Les pertes de performances aérodynamiques et de puissance, induites par la glace, sont aussi estimées.

Les résultats de PROICET concernant les simulations des coefficients de portance et de traînée ont montré que les performances aérodynamiques sont globalement détériorées : les pertes du coefficient de portance ne dépassent pas 30 %, l'augmentation du coefficient de traînée ne dépasse pas 140 %.

Les résultats de PROICET concernant les simulations de la courbe de puissance ont montré que la détérioration des performances aérodynamiques conduit à des pertes de puissance de l'ordre de 3.4 %. Les pertes de puissance calculées pour des vitesses de vent de 5 m/s à 12 m/s, où l'éolienne est supposée opérer le plus souvent, sont de 1 %.

Les résultats de PROICET concernant les pertes de production annuelles du MEG sous précipitations givrantes calculées sont faibles, moins de 1 %. Ceci est dû aux conditions non sévères de givrage qui ont été modélisées et au faible nombre d'heures de givrage (74h) qui ont conduit à une faible quantité de glace accumulée sur les pales du MEG (1.33 kg/m au maximum en bout de pale). Les résultats obtenus se comparent avec ceux disponibles en littérature pour des sites à faible risque de givre mais seulement sous-estiment les pertes sur le site de Murdochville, caractérisé par des phénomènes plus sévères de givrage. Ces résultats confirment quand même le bon fonctionnement du modèle numérique PROICET lors de givrage léger. Par contre les résultats de modèle PROICET ne permettent pas de conclure que les pertes du site de Murdochville sont insignifiantes, car les conditions de givrage, simulées numériquement, sont basées sur des événements de

givrage léger observés à une altitude moins élevée que celle à laquelle les éoliennes sont installées. Pour avoir les vraies pertes pour ce site il est nécessaire de simuler l'ensemble des conditions givrantes qui apparaissent durant une année, une partie d'entre elles étant beaucoup plus sévères que celles simulées numériquement dans ce mémoire.

ABSTRACT

Generally, the northern regions benefit of a high wind potential and are ideal for the wind turbines operation. Unfortunately, the icing problems are common and have serious consequences on the wind turbines energy production and their maintenance and service life.

Icing, which is characteristic of cold regions, is caused by freezing rain, drizzle and freezing fog at ground level or by clouds at high altitudes, or by frost, when the turbine is installed near water bodies. The ice accumulation on the wind turbines blades reduces the aerodynamic performance and results in loss of power and therefore energy.

Impact of ice is difficult to quantify without experimental tests and numerical simulations due to the lack of real data from the field. The high cost of wind tunnel testing, conducted to the necessity to develop a numerical approach that can accurately evaluate the aerodynamic performance degradation and energy losses for different configurations of wind and weather conditions at lower cost and over a shorter period.

A numerical model, named PROICET, was developed to calculate the wind turbine annual energy production considering the impact of icing. The model, inexpensive and relatively simple to use, simulates the ice shape on the wind turbine blades, calculates the lift and drag coefficients and the power curves. Then, when coupled with wind and icing scenarios, it allows quantifying the annual production losses due to ice. The originality of

this numerical model is the combination of three softwares (CIRALIMA, XFOIL and PROPID) with a wind turbine generic model in a sequential process in which the results of the first software are the entries of the second and so on. This allows the evaluation of aerodynamic performance degradation, power loss and wind turbine production losses due to icing. Moreover, it is the first time such a study is made to predict numerically the wind turbine energy losses due to icing.

A wind turbine generic model MEG, integrated into PROICET and presented in this project, is a technical representation of the wind turbine blade which includes a NACA 63 415 airfoil, a chord, pitch angle and twist distribution along the blade. The MEG wind turbine has been build starting from the available information about the Vestas V80 1.8 MW wind turbine.

The numericals models PROICET and MEG are validated for the clean wind turbine Vestas V80 1.8 MW on Murdochville's site (Quebec) at the standard atmospheric conditions. PROICET is used to calculate the annual energy production of the MEG wind turbine during light precipitation icing. The wind and ice scenarios, based on data mesured at Murdochville site are used to calculate the annual energy losses caused by the ice. The loss of aerodynamic performance and power, induced by the light ice, is estimated.

The aerodynamic performance of the MEG wind turbine is generally deteriored by the light ice: the loss of the lift coefficient is 30 % and the drage coefficient increase by 140 %. The aerodynamic performance deterioration leads to approximately 3.4 % power loss. The annual energy production of the MEG wind turbine under light icing is estimated at less than 1 %. This is due to ice conditions, which are not severe, and the low duration of

icing (74h), which led to a small ice accumulation on the blades (1.33 kg/m maximum). These results are comparable to the ones available in the literature for the sites at lower risk of ice. However the real losses in Murdochville, characterized by more severe icing conditions will be higher. The results validate the functioning of PROICET in light icing.

À mon merveilleux époux

REMERCIEMENTS ET AVANT PROPOS

Les travaux de recherches effectués dans ce mémoire de maîtrise ont été réalisés au laboratoire de recherche en énergie éolienne (LREE) à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) et au laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA) à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC).

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à mon directeur de recherche Adrian Ilinca, professeur au département de mathématiques, d'informatique et de génie à l'UQAR et directeur du LREE, pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce sujet de recherche et pour sa confiance en moi. Malgré un emploi du temps très chargé, il a su me faire profiter de son expérience en prenant des décisions intelligentes pour faire avancer mon projet de façon réaliste. J'ai aussi été particulièrement sensible à l'aide indispensable qu'il m'a apportée en fin de rédaction de mémoire.

Je tiens à exprimer ma plus sincère gratitude et reconnaissance à mon co-directeur Jean Perron, professeur au département des sciences appliqués à l'UQAC et directeur du LIMA, qui a toujours eu pleinement confiance en mes capacités et n'a pas hésité à s'investir dans ce projet, qui a été d'un appui financier et moral inestimable pour moi. Je remercie également Jean Perron pour tout son soutien et ses conseils judicieux, pour son accueil chaleureux au sein de son laboratoire à Chicoutimi et pour son inquiétude de notre confort et aise au bureau.

J'exprime également mes profonds remerciements et reconnaissance à mon co-directeur de recherche Guy Fortin, professeur associé au département des sciences appliqués à l'UQAC et chercheur à LIMA, pour ses remarques pertinentes, ses conseils judicieux et son soutien indéfectible. Il a toujours pris le temps de répondre à mes questions et m'a permis de profiter de sa vaste expérience. J'ai été et je suis toujours admirative devant l'exigence et la qualité de son travail.

Je remercie toute l'équipe de LIMA pour leur accueil chaleureux à Chicoutimi, pour leur gentillesse et la bonne ambiance qu'ils savent entretenir au laboratoire.

Des remerciements aussi à mes collègues, les étudiants de maîtrise et de doctorat à l'UQAR ainsi qu'à l'UQAC, et à tous le personnel du département de mathématiques, d'informatique et de génie à l'UQAR, pour leur accueil, leur soutien et l'aide qu'ils ont su m'apporter.

Je termine en exprimant ma plus sincère gratitude et reconnaissance à ma famille (en Bulgarie, au Liban, en France, aux États-Uniens, au Koweït et au Canada) pour leur compréhension et leur soutien indéfectible (surtout aux parents), pour tout ce qu'ils ont fait et sacrifié pour moi, pour l'aide que chacun a su m'apporter, pour leur inquiétude, pour le bonheur et la joie inestimables qu'ils m'apportent dans ma vie.

Je ne voudrais surtout pas oublier et passer sous silence mon cher époux, Hussein Ibrahim, qui a su toujours me soutenir, pour ses conseils judicieux et ses remarques pertinentes. Je lui présente ma sincère gratitude et ma reconnaissance pour tout ce qu'il a fait et sacrifié pour moi, pour tout ce qu'il m'apporte chaque jour, surtout sa lumière et son espoir.

Enfin, toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce projet, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	II
ABSTRACT	VI
REMERCIEMENTS ET AVANT PROPOS.....	X
TABLE DES MATIÈRES.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XVI
LISTE DES TABLEAUX	XX
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS	XXII
CHAPITRE 1.....	1
INTRODUCTION.....	1
1.1. CONTEXTE DU PROJET	1
1.1.1. <i>Description des éoliennes à axe horizontal.....</i>	<i>2</i>
1.1.2. <i>Production annuelle d'une éolienne.....</i>	<i>4</i>
1.1.3. <i>Exploitation des éoliennes en milieu nordique.....</i>	<i>6</i>
1.2. PROBLÉMATIQUE	8
1.3. OBJECTIFS	10
1.3.1. <i>Objectif principal</i>	<i>10</i>
1.3.2. <i>Objectifs spécifiques.....</i>	<i>12</i>
1.4. LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU GIVRAGE ET SA MODÉLISATION	13
1.4.1. <i>Le givrage.....</i>	<i>13</i>
1.4.2. <i>Types et formes de glace.....</i>	<i>15</i>
1.4.3. <i>Modèles numériques de givrage.....</i>	<i>17</i>
1.4.4. <i>Résultats aérodynamiques des profils givrés</i>	<i>18</i>
1.4.4.1. <i>Impact de givrage et de la forme du dépôt de glace.....</i>	<i>19</i>
1.4.4.2. <i>Impact de la rugosité</i>	<i>23</i>
1.4.5. <i>Courbes de puissance des éoliennes givrées.....</i>	<i>25</i>
1.4.6. <i>Pertes de production annuelle dues au givrage</i>	<i>27</i>
1.5. CONTENU DU MÉMOIRE.....	28
CHAPITRE 2.....	29
MODÈLE NUMÉRIQUE DE PRODUCTION ANNUELLE D'UNE ÉOLIENNE À AXE HORIZONTAL.....	29
2.1. INTRODUCTION.....	29
2.2. CALCUL DE LA PRODUCTION ANNUELLE D'UNE ÉOLIENNE	30
2.2.1. <i>Calcul de l'énergie extraite par une éolienne</i>	<i>30</i>
2.2.2. <i>Production énergétique non corrigée.....</i>	<i>31</i>
2.2.2.1. <i>Distribution de la vitesse du vent.....</i>	<i>31</i>
2.2.2.2. <i>Courbe d'énergie.....</i>	<i>34</i>
2.2.2.3. <i>Production énergétique non corrigée</i>	<i>35</i>
2.2.3. <i>Production énergétique corrigée.....</i>	<i>36</i>
2.3. LOGICIEL PROPID	37

2.4. LOGICIEL XFOIL.....	40
2.4.1. Description générale.....	40
2.4.2. Modèle physique.....	41
2.4.3. Modèle numérique.....	41
2.4.4. Inconvénients de XFOIL.....	42
2.5. LOGICIEL CIRALIMA	43
2.6. CONCLUSION	45
CHAPITRE 3	46
MODÈLE ÉOLIEN GÉNÉRIQUE REPRÉSENTATIF D'UNE ÉOLIENNE VESTAS V80 1.8 MW...46	
3.1. INTRODUCTION.....	46
3.2. ÉOLIENNE VESTAS V80 1.8 MW	46
3.3. PALE DU MODÈLE ÉOLIEN GÉNÉRIQUE.....	48
3.3.1. Passage de la pale 3D au profil aérodynamique 2D.....	49
3.3.2. Vitesses et angles sur un élément de pale	50
3.3.3. Choix du profil. Distribution de l'épaisseur le long de la pale	52
3.3.4. Distribution de la corde le long de la pale.....	53
3.3.5. Distribution de l'angle de vrillage le long de la pale	54
3.3.6. Discrétisation de la pale	56
3.3.7. Synthèse	58
3.4. CALCUL DES COEFFICIENTS DE PORTANCE ET DE TRAÎNÉE.....	58
3.5. CALCUL DE LA COURBE DE PUISSANCE AUX CONDITIONS ATMOSPHÉRIQUES STANDARDS	60
3.6. VALIDATION DU MEG	62
3.7. CALCUL DE LA PRODUCTION ANNUELLE.....	62
3.7.1. Calcul de la production annuelle de la Vestas V80 1.8 MW	62
3.7.2. Calcul de la production annuelle du MEG.....	65
3.7.3. Validation de PROICET	67
3.8. CONCLUSION	67
CHAPITRE 4	68
SIMULATION NUMÉRIQUE DE LA COURBE DE PUISSANCE DU MEG ET CALCUL DE SA PRODUCTION ANNUELLE SOUS PRÉCIPITATIONS GIVRANTES.....68	
4.1. INTRODUCTION.....	68
4.2. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES AU SOL.....	68
4.3. CONDITIONS ATMOSPHÉRIQUES DE GIVRE	71
4.4. TEMPÉRATURE DE - 6 °C.....	72
4.4.1. Calcul des formes de glace	72
4.4.2. Calcul des coefficients de portance et de traînée	74
4.4.3. Calcul de la courbe de puissance.....	78
4.5. TEMPÉRATURE DE - 2° C.....	80
4.5.1. Calcul des formes de glace	80
4.5.2. Uniformisation de la surface de glace.....	82
4.5.3. Calcul des coefficients de portance et de traînée	82
4.5.4. Calcul de la courbe de puissance.....	86
4.6. CALCUL DE LA PRODUCTION ANNUELLE DU MEG SOUS PRÉCIPITATIONS GIVRANTES.....	88
4.7. CONCLUSION	93
CHAPITRE 5	95
CONCLUSION	95
TRAVAUX FUTURS.....	99

ANNEXE A	100
CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉOLIENNE VESTAS V80 1.8 MW	100
ANNEXE B	106
IMPACT DE LA TEMPÉRATURE SUR LA PUISSANCE ET LE COEFFICIENT DE PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE	106
B.1. INTRODUCTION	107
B.2. IMPACT DE LA TEMPÉRATURE	107
B.3. CONCLUSION	112
ANNEXE C	113
CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES D'UN PROFIL. PROFILS DE TYPE NACA	113
C.1. CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES D'UN PROFIL	114
C.2. PROFILS DE TYPE NACA	115
C.2.1. Famille de profils à quatre chiffres.....	116
C.2.2. Famille de profils à cinq chiffres.....	116
C.2.3. La série 6 de profils NACA.....	117
ANNEXE D	118
CALCUL DE LA PRODUCTION ANNUELLE D'UNE ÉOLIENNE AVEC LE LOGICIEL RETSCREEN	118
ANNEXE E	122
SIMULATION NUMÉRIQUE DES COEFFICIENTS DE PORTANCE ET DE TRAÎNÉE AVEC LE CODE COMMERCIAL XFOIL	122
E.1. INTRODUCTION	123
E.2. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ.....	123
E.2.1. Effet du nombre d'itération	123
E.2.2. Effet du nombre de Mach	125
E.2.3. Effet du nombre de Reynolds	127
E.2.4. Validation des résultats	129
F.3. IMPACT DE LA TEMPÉRATURE.....	132
E.4. CONCLUSION	135
ANNEXE F	136
SIMULATION NUMÉRIQUE DES COURBES DE PUISSANCE AVEC LE LOGICIEL PROPID	136
F.1. INTRODUCTION.....	137
F.2. IMPACT DE LA TEMPÉRATURE.....	138
F.2.1. Courbe de puissance	138
F.2.2. Validation des résultats	143
F.3. CONCLUSION.....	144
BIBLIOGRAPHIE	146

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal [3], [5]	3
Figure 2 : Pales d'éolienne givrées	6
Figure 3 : Schéma du modèle numérique PROICET	11
Figure 4 : Formation de givre sur un modèle réduit de pale d'hélicoptère [21]	15
Figure 5 : Formation de verglas sur un modèle réduit de pale d'hélicoptère [21]	16
Figure 6 : Formes de dépôt de glace et masse de glace accumulée à trois positions radiales sur la pale pour un évènement givrant en régime sec (le givre) [14]	20
Figure 7 : Formes de dépôt de glace et masse de glace accumulée à trois positions radiales sur la pale pour un évènement givrant en régime humide (le verglas) [14]	20
Figure 8 : Coefficients de portance et de traînée du profil NACA 63 415, mesurés pour un évènement givrant en régime sec (gauche) et un évènement givrant en régime humide (droite) [14]	21
Figure 9 : Propriétés aérodynamiques d'un profil NACA 4415 avec différentes formes de glace [32]	23
Figure 10 : Coefficients de portance et de traînée du profil NACA 63 415 avec des rugosités à différentes positions sur le bord d'attaque (0.05/0.10 correspond à une rugosité sur le nez du profil, s.s. correspond à une rugosité sur l'extrados et p.s. à une rugosité sur l'intrados) [34]	24
Figure 11 : Courbes de puissance calculées pour une éolienne de 600 kW à décrochage aérodynamique [16]	25
Figure 12 : Courbes de puissance calculées pour une éolienne de 500 kW givrée [37]	26
Figure 13 : Courbes de puissance calculées pour une éolienne de 300kW à pas variable avec différents types de forme de glace ([32], [33])	27
Figure 14 : Pertes de production d'une éolienne de 300 kW, dues au givrage du bord d'attaque : longueur de glace de 5% (à gauche) et de 22% (à droite) de la longueur de la corde [33]	28
Figure 15 : Distribution de la vitesse du vent et de l'énergie correspondante pour différents couples de paramètres de la distribution de Weibull [39]	33
Figure 16 : Exemple de la distribution de Rayleigh pour différents vitesses moyennes [38]	33
Figure 17 : Processus de calcul de la production annuelle non corrigée d'une éolienne [45]	34
Figure 18 : Schéma fonctionnel de PROPID en mode d'analyse	38
Figure 19 : Logiciel CIRALIMA 2D	44
Figure 20 : Puissance et coefficient de puissance de la Vestas V80 1.8 MW aux conditions atmosphériques standards pour la classe IEC 2A	48
Figure 21 : Division de la pale suivant la théorie de l'élément de pale [40]	50

Figure 22 : Section d'un élément de la pale à un rayon r . Vitesses et angles sur l'élément de pale [40]	50
Figure 23 : Profil aérodynamique NACA 63 415	52
Figure 24 : Distribution de la corde et de l'angle de vrillage le long de la pale du MEG....	54
Figure 25 : Pale générique du MEG divisée en 5 sections	56
Figure 26 : Masse de glace accumulée en fonction de la position radiale r selon Hochart [60]	57
Figure 27 : Distribution de la puissance extraite par une éolienne le long de la pale [40]...	57
Figure 28 : Coefficients de portance et de traînée du profil NACA 63 415 à cinq positions radiales sur la pale du MEG et aux conditions atmosphériques standards	59
Figure 29 : Courbes de puissance de PROPID pour le MEG aux conditions atmosphériques standards	60
Figure 30 : Courbe de puissance pour l'éolienne Vestas et MEG aux conditions atmosphériques standards	61
Figure 31 : Distribution statistique des vitesses du vent pour le site de Murdochville : facteur de forme de 2 et facteur d'échelle de 9.03 m/s.....	63
Figure 32 : Puissance de la Vestas V80 1.8 MW pour la classe IEC 2A aux conditions atmosphériques standards	63
Figure 33 : Courbe d'énergie de la Vestas V80 1.8 MW aux conditions standards de température et de pression atmosphérique.....	64
Figure 34 : Puissance du MEG pour la classe IEC 2A aux conditions atmosphériques standards	65
Figure 35 : Courbe d'énergie du MEG aux conditions standards de température et de pression atmosphérique	66
Figure 36 : Profils givrés pour la température de -6°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG	73
Figure 37 : Coefficients de portance et de traînée pour la température de -6°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG.....	75
Figure 38 : Pertes du coefficient de portance pour la température de -6°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG.....	77
Figure 39 : Augmentations du coefficient de traînée pour la température de -6°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG.....	77
Figure 40 : Courbe de puissance du MEG en fonction de l'angle de calage à la température de -6°C	78
Figure 41 : Courbe de puissance du MEG à la température de -6°C	79
Figure 42 : Pertes de puissance du MEG à la température de -6°C	79
Figure 43 : Profils givrés pour la température de -2°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG	81
Figure 44 : Lissage du bord d'attaque du profil givré à la position radiale de 36.5 m et à la température de -2°C	82
Figure 45 : Coefficients de portance et de traînée pour la température de -2°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG.....	84
Figure 46 : Pertes du coefficient de portance pour la température de -2°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG.....	85

Figure 47 : Augmentations du coefficient de traînée pour la température de -2°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG.....	86
Figure 48 : Courbe de puissance du MEG en fonction de l'angle de calage à la température de -2°C	87
Figure 49 : Courbe de puissance du MEG à la température de -2°C	87
Figure 50 : Pertes de puissance du MEG à la température de -2°C	88
Figure 51 : Courbe de puissance théorique à la température moyenne annuelle de -0.1°C	89
Figure 52 : Éolienne Vestas V80 1.8 MW [62].....	101
Figure 53 : Niveau sonore et vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent pour la Vestas V80 1.8 MW [52].....	102
Figure 54 : Pas de la pale en fonction du temps pour la Vestas V80 1.8 MW [52].....	102
Figure 55 : Courbe de puissance de la Vestas V80 1.8 MW aux conditions atmosphériques standards pour la classe IEC 1A et la classe IEC 2A.....	104
Figure 56 : Coefficient de puissance de la Vestas V80 1.8 MW pour la classe IEC 1A et la classe IEC 2A.....	105
Figure 57 : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique et du nombre de pales [9] (gauche) et de la vitesse spécifique pour différents angles de calage [8] (droite).....	107
Figure 58 : Courbe de puissance pour la classe IEC 2A de la Vestas V80 1.8 MW en fonction de la température.....	109
Figure 59 : Puissance pour la classe IEC 2A de la Vestas V80 1.8 MW en fonction de la température et de la vitesse du vent.....	110
Figure 60 : Coefficient de puissance pour la classe IEC 2A de la Vestas V80 1.8 MW en fonction de la température.....	111
Figure 61 : Coefficient de puissance pour la classe IEC 2A de la Vestas V80 1.8 MW en fonction de la température et de la vitesse du vent.....	111
Figure 62 : Caractéristiques géométriques d'un profil [66].....	115
Figure 63 : Modèle énergétique de RETScreen® [5].....	119
Figure 64 : Caractéristiques des équipements de RETScreen® [5].....	120
Figure 65 : Coefficient de portance du profil NACA 63 415 à un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ et en fonction de l'angle d'attaque et du nombre d'itération.....	124
Figure 66 : Coefficient de traînée du profil NACA 63 415 à un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ et en fonction de l'angle d'attaque et du nombre d'itération.....	125
Figure 67 : Coefficient de portance du profil NACA 63 415 à un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ et en fonction de l'angle d'attaque et du nombre de Mach.....	126
Figure 68 : Coefficient de traînée du profil NACA 63 415 à un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ et en fonction de l'angle d'attaque et du nombre de Mach.....	126
Figure 69 : Coefficient de portance du profil NACA 63 415 à un nombre de Mach de 0 en fonction de l'angle d'attaque et du nombre de Reynolds.....	128
Figure 70 : Coefficient de traînée du profil NACA 63 415 à un nombre de Mach de 0 en fonction de l'angle d'attaque et du nombre de Reynolds.....	128
Figure 71 : Comparaison des coefficients de portance du profil NACA 63 415 pour un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$	130
Figure 72 : Comparaison des coefficients de traînée du profil NACA 63 415 pour un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$	130

Figure 73 : Rapport des coefficients de portance sur traînée du profil NACA 63 415.....	133
Figure 74 : Impact de la température sur les coefficients de portance et traînée du profil NACA 63 415 de l'éolienne MEG.....	134
Figure 75 : Coefficients de portance du profil NACA 63 415 de l'éolienne MEG en fonction de l'angle d'attaque et de la position radiale à une température de 15°C.....	138
Figure 76 : Coefficients de traînée du profil NACA 63 415 de l'éolienne MEG en fonction de l'angle d'attaque et de la position radiale à une température de 15°C	139
Figure 77 : Courbes de puissance de l'éolienne MEG en fonction de l'angle de calage à une température de 5°C.....	139
Figure 78 : Courbes de puissance de l'éolienne MEG en fonction de l'angle de calage à une température de 15°C.....	140
Figure 79 : Courbes de puissance de l'éolienne MEG en fonction de l'angle de calage à une température de 33°C.....	140
Figure 80 : Courbes de puissance à la température de 5°C	141
Figure 81 : Courbes de puissance à la température de 15°C	142
Figure 82 : Courbes de puissance à la température de 33°C	142
Figure 83 : Courbes de puissance de l'éolienne MEG en fonction de la température	143

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Pertes de production moyennes annuelles dues au givrage [13], [17]	7
Tableau 2 : Pertes de performance aérodynamique des résultats de Hochart [14]	21
Tableau 3 : Caractéristiques essentielles de l'éolienne pour la simulation avec PROPID [46]	38
Tableau 4 : Hypothèses de calcul possible en mode d'analyse dans PROPID [46]	39
Tableau 5 : Résultats disponibles en mode d'analyse dans PROPID [46]	39
Tableau 6 : Données d'entrées du logiciel CIRALIMA.....	45
Tableau 7 : Conditions de calcul des angles de vrillage du MEG	55
Tableau 8 : Distribution de la corde et calcul des angles de vrillage du MEG.....	55
Tableau 9 : Cinématique de la pale du MEG pour les cinq positions radiales et pour un vent de 8 m/s.....	58
Tableau 10 : Puissance de Vestas V80 1.8 MW fournie par le fabricant et calculée pour le MEG	61
Tableau 11 : Production d'énergie annuelle de la Vestas V80 1.8 MW	64
Tableau 12 : Production d'énergie annuelle du MEG.....	66
Tableau 13 : Caractéristiques des brouillards givrants à Murdochville en 2005-2006.....	69
Tableau 14 : Caractéristiques des brouillards givrants équivalents	70
Tableau 15 : Caractéristiques des brouillards givrants équivalents corrigées	71
Tableau 16 : Paramètres des simulations numériques du givrage	72
Tableau 17 : Masse de glace accumulée pour cinq positions radiales sur la pale du MEG à la température de -6°C.....	74
Tableau 18 : Masse de glace accumulée pour cinq positions radiales sur la pale du MEG à la température de -2°C.....	80
Tableau 19 : Production d'énergie annuelle du MEG sous précipitation givrante	91
Tableau 20 : Caractéristiques de l'éolienne Vestas V80 1.8 MW	103
Tableau 21 : Puissance et coefficient de puissance de la Vestas V80 1.8 MW pour la classe IEC 1A et la classe IEC 2A	105
Tableau 22 : Puissance et coefficient de puissance en fonction de la température pour la classe IEC 2A de Vestas V80 1.8 MW.....	108
Tableau 23 : Entrées de RETScreen®	121
Tableau 24 : Sorties de RETScreen®	121
Tableau 25 : Paramètres d'entrées de XFOIL pour l'étude de sensibilité	124
Tableau 26 : Erreur relative des coefficients de portance et de traînée du profil NACA 63 415 pour un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$	131
Tableau 27 : Coefficient de portance maximal et rapport maximal des coefficients de portance et traînée du profil NACA 63 415 pour un nombre de Reynolds de $\Re = 3 \cdot 10^6$...	132

Tableau 28 : Nombres de Reynolds et de Mach à cinq positions radiales sur la pale de l'éolienne MEG pour deux températures.....	133
Tableau 29 : Erreurs relatives maximales des coefficients de portance et traînée à cinq positions radiales sur la pale de l'éolienne MEG.....	134
Tableau 30 : Paramètres d'entrées de PROPID pour l'étude de l'impact de la température	137
Tableau 31 : Stratégie de contrôle de l'angle de calage de l'éolienne MEG.....	141
Tableau 32 : Puissance théorique, de la Vestas et du MEG, et angle de calage du MEG en fonction de la vitesse de vent et de la température.....	144
Tableau 33 : Erreurs relatives de la puissance de l'éolienne MEG à trois températures ...	145

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

a	Facteur d'induction axial	-
a'	Facteur d'induction tangentiel	-
c	Corde d'un profil aérodynamique	m
A_c	Nombre adimensionnel d'accumulation de glace	-
C	Facteur d'échelle de la loi de Weibull	m/s
C_D	Coefficient de traînée	-
C_l	Coefficient des pertes	-
C_L	Coefficient de portance	-
C_P	Coefficient de puissance de l'éolienne	-
C_H	Coefficient de correction barométrique	-
C_T	Coefficient de correction thermique	-
e_{\max}	Épaisseur maximale d'un profil aérodynamique	m
E_C	Production énergétique corrigée	MWh
E_{rel}	Erreur relative	%
E_U	Production énergétique non corrigée	MWh
$E(V)$	Courbe d'énergie	MWh
$f(V)$	Densité de probabilité de Weibull	-
$g(V)$	Densité de probabilité de Rayleigh	-
H	Hauteur du moyeu	m
H_0	Hauteur de l'anémomètre	m
IEC	Commission Électrotechnique Internationale	-
k	Facteur de forme de la loi de Weibull	-
LWC	Teneur en eau liquide	g/m ³
Mach	Nombre de Mach	-
MVD	Diamètre volumétrique médiane des gouttelettes d'eau	μm

N	Nombre de pales	-
p	Moyenne annuelle de la pression atmosphérique sur un site	kPa
p_0	Pression atmosphérique standard (101.3 kPa)	kPa
P(V)	Puissance fournie par une éolienne à une vitesse du vent V	W
P_{rotor}	Puissance produite par le rotor de l'éolienne	W
P_{vent}	Puissance disponible dans le vent	W
r	Position radiale sur la pale	M
R	Rayon du rotor	M
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne	m ²
t	Durée de l'évènement du givrage	H
T	Moyenne annuelle de la température absolue d'un site	K
T_0	Température absolue standard (288.1 K)	K
T_{∞}	Température de l'air	°C
V	Vitesse du vent à la hauteur du moyeu H	m/s
V_0	Vitesse du vent à la hauteur de l'anémomètre H_0	m/s
V_{moy}	Moyenne de la vitesse du vent	m/s
V_{rel}	Vitesse relative du vent devant le profil	m/s
V_{tg}	Vitesse tangentielle due à la rotation de la pale	m/s
V_v	Vitesse du vent au niveau du plan rotor	m/s
V_{∞}	Vitesse de l'écoulement non perturbé	m/s
α	Angle d'attaque ou angle d'incidence (angle entre la corde du profil et V_{rel})	deg
α'	Coefficient de cisaillement du vent	-
β	Angle d'inclinaison (angle entre la corde du profil et le plan de rotation) : $\beta = \beta_P + \beta_T$	deg
β_P	Angle de calage ou pas de la pale au niveau du moyeu	deg
β_T	Angle de vrillage à la position radiale choisie	deg
Γ	Fonction gamma	-
φ	Angle d'écoulement (angle entre V_{rel} et le plan de rotation)	deg
λ	Vitesse spécifique (le rapport des vitesses en bout de pale : $\lambda = \Omega R / V_{\infty}$)	-

λ_a	Coefficient des pertes par effet de sillage	-
λ_e	Coefficient des pertes par encrassement des pales ou résultantes du verglas	-
λ_d	Coefficient des pertes pour causes d'arrêts	-
λ_m	Coefficient représentant des pertes diverses	-
μ	Rapport des rayons : $\mu=r/R$	-
μ_{air}	Viscosité dynamique de l'air	kg/m.s
ν_{air}	Viscosité cinématique de l'air	m ² /s
Ω, ω	Vitesse de rotation du rotor	rad/s
ρ_{air}	Densité de l'air	kg/m ³
ρ_{glace}	Densité de la glace accumulée	kg/m ³
Δt_{an}	Durée d'une année	h
Re	Nombre de Reynolds	-

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1. Contexte du projet

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années [1]. En effet, des moulins à vent à axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres afghanes, 7 siècles A.C. pour moudre du grain. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. C'est en 1891 que le Danois Poul Lacour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité [2].

Depuis, la technologie des aérogénérateurs a grandement évoluée, ce qui a permis à l'énergie éolienne de devenir, ces dernières années, une alternative aux sources d'énergie traditionnelles. Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, il leur reste encore une grande marge de progrès technologique à atteindre pour dépasser les sources traditionnelles. Il n'y a pas de doute que les aérogénérateurs évolueront encore, et la recherche a un rôle important à jouer dans ce sens [3].

1.1.1. Description des éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont mues par les mêmes forces aérodynamiques qui entrent en jeu dans le fonctionnement d'un aéronef. Les éoliennes modernes sont automatisées et asservies par des anémomètres et girouettes qui mesurent continuellement la vitesse et la direction du vent. Lorsque la vitesse est assez élevée pour compenser la friction du rotor, les mécanismes de commande démarrent l'éolienne qui produit une faible puissance. Cette vitesse, appelée vitesse de démarrage, est généralement de l'ordre de 4 m/s, soit la force d'une brise légère. La puissance produite croît rapidement à mesure que la force du vent augmente. Lorsqu'elle atteint le niveau maximum admissible pour l'éolienne installée, les mécanismes d'asservissement assurent la régulation à la puissance nominale. La vitesse du vent à laquelle une machine fournit sa puissance nominale est appelée vitesse nominale; en général, elle est approximativement de 15 m/s. Si la vitesse du vent continue à augmenter, le système de commande arrête le rotor pour éviter que des dommages ne soient causés à l'éolienne. Cette vitesse d'arrêt est généralement de 25 m/s.

Les principales composantes d'une éolienne à axe horizontal sont (Figure 1) :

- un rotor, bipale ou tripale, qui convertit l'énergie du vent en énergie mécanique par l'entraînement de son arbre ;
- une tour sur laquelle est fixé le rotor et qui est assez élevée pour exploiter les vents en altitude qui sont plus constants et forts ;
- une fondation solide qui assure la résistance de l'ensemble par grands vents et/ou dans des conditions de givrage [4] ;
- un multiplicateur (boîte de vitesses), qui relie le rotor au générateur ;
- une génératrice triphasée ;

- un dispositif d'interconnexion et un système de contrôle qui commande le démarrage et l'arrêt de l'éolienne et surveille son fonctionnement.

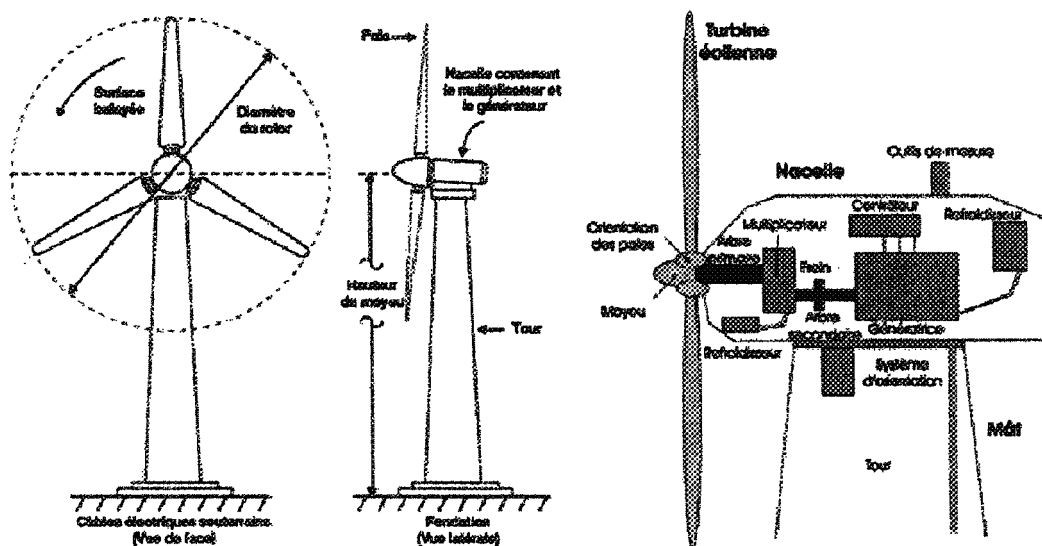


Figure 1 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal [3], [5]

La turbine peut être à vitesse constante ou à vitesse variable. Les anciens aérogénérateurs étaient à vitesse constante. Pour ceux-ci, des algorithmes de commande permettent de contrôler la vitesse de rotation du rotor à chaque instant [3]. Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite (tension et fréquence du courant), par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Les turbines à vitesse variable peuvent produire 8 à 15 % plus d'énergie que les turbines à vitesse constante, mais elles doivent être dotées d'un convertisseur d'électronique de puissance pour produire une tension et une fréquence fixe pour les charges [6].

1.1.2. Production annuelle d'une éolienne

La production annuelle d'une éolienne repose sur la courbe de puissance de l'éolienne, les vitesses de vent et le nombre d'heures de vent durant une année pour un site proposé. Les détails du calcul de la production annuelle d'une éolienne sont présentés dans la section 2.2 du chapitre 2, ici nous identifions les éléments les plus importants qui influencent sa valeur et leur lien avec le phénomène de givrage.

La puissance d'une éolienne est déterminée à partir de son coefficient de puissance, de la surface balayée par ses pales, de la densité de l'air et de la vitesse du vent au cube. La puissance dépend principalement de la vitesse du vent, mais est aussi légèrement affectée par la densité de l'air, cette dernière étant déterminée à son tour par la température et la pression barométrique ou par l'altitude [7]. Le coefficient de puissance dépend des caractéristiques des profils aérodynamiques composants la pale, de la vitesse du vent, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation ([8] et [9]).

Les vitesses de vent sont représentées par une fonction de distribution qui représente la probabilité d'avoir une certaine vitesse du vent pendant une période donnée. Le vent ayant un caractère aléatoire, son analyse est basée sur des méthodes statistiques. Le régime des vents sur un site se caractérise par la valeur de la vitesse moyenne du vent et les lois statistiques permettant de représenter sa variation temporelle [10]. Parmi ces lois, la loi de Weibull est souvent utilisée en génie éolien, car elle représente bien les vitesses du vent observées à long terme sur un grand nombre de sites [5] et prend en compte l'asymétrie des

données empiriques [11]. Un cas particulier de la distribution de Weibull est la distribution de Rayleigh. C'est la distribution de la vitesse de vent la plus simple pour représenter les ressources éoliennes, car elle exige seulement de connaître la vitesse moyenne du vent, l'asymétrie étant fixée à deux.

Le calcul de la production annuelle est basé sur une vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu pour le site étudié. En raison du phénomène de cisaillement du vent, la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est habituellement plus élevée que celle mesurée à la hauteur habituelle où sont installés les anémomètres. Pour cette raison une extrapolation verticale des vitesses du vent mesurées est effectuée, au moyen d'une loi de puissance appliquée à la hauteur [12].

Si les lois de Weibull et de Rayleigh permettent de déterminer le comportement statistique de la vitesse du vent dans le temps, la loi de puissance permet de mesurer la variabilité du vent au même endroit, au même moment mais à des hauteurs différentes.

Le calcul de la production annuelle, basé sur l'intégration du produit entre la puissance produite par l'éolienne à une vitesse de vent donnée et le nombre d'heures durant l'année pendant lesquelles le vent souffle à cette vitesse est valable pour des conditions standards de température et de pression atmosphérique. La production doit être corrigée en fonction de la pression atmosphérique, des conditions de température et des pertes inhérentes aux éoliennes telles que les pertes par effet de sillage, les pertes par encrassement des pales ou résultantes du verglas, les pertes pour causes d'arrêts et les autres pertes [5].

1.1.3. Exploitation des éoliennes en milieu nordique

En milieu nordique, les basses températures augmentent la densité de l'air. Une densité d'air plus élevée augmente l'énergie cinétique du vent et par conséquent la puissance captée par l'éolienne. L'air est par exemple 27 % plus dense à -33°C qu'à $+35^{\circ}\text{C}$. La puissance fournie par une éolienne, qui est directement proportionnelle à la densité de l'air, est donc 27 % plus importante à -33°C qu'à $+35^{\circ}\text{C}$ [13]. Les milieux nordiques disposent généralement de régions très bien exposées au vent et ces régions semblent idéales pour l'exploitation des éoliennes. Malheureusement, les problèmes liés au givrage et aux très basses températures y sont fréquents et ont de sérieuses conséquences sur la production des éoliennes, leur maintenance et leur durée de vie [14].

La présence de glace sur les pales d'éoliennes diminue considérablement les performances du rotor. Lors de conditions d'évènements givrants, un dépôt de glace se forme sur les pales (Figure 2), celles-ci perdent leurs caractéristiques aérodynamiques [15], le couple rotatif s'affaiblit et la puissance électrique fournie par l'éolienne diminue.

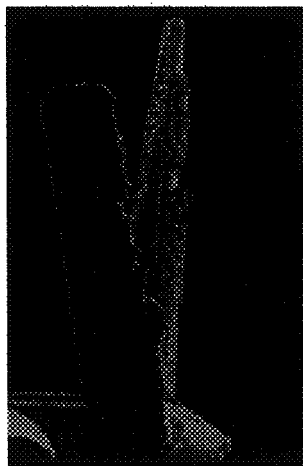


Figure 2 : Pales d'éolienne givrées

Lorsque l'évènement givrant est très sévère [13], la production électrique est interrompue en raison d'un couple rotatif nul qui conduit à l'arrêt de l'éolienne [14]. Le Tableau 1 présente un ordre de grandeur des valeurs moyennes annuelles des pertes de production dues au givrage pour un parc éolien [16]. Les pertes de production dépendent à la fois de l'intensité, de la longueur et de la fréquence des évènements givrants.

Tableau 1 : Pertes de production moyennes annuelles dues au givrage [13], [17]

Fréquence des évènements givrants (jours/année)	Pertes d'énergie annuelles (%)
< 1	Insignifiantes
1 - 10	Faibles
10 - 30	5 - 15 %
30 - 60	15 - 25 %
> 60	> 25%

Lors d'un évènement givrant assez important, la masse de glace accumulée peut augmenter considérablement le chargement radial sur les pales en raison de la force centrifuge. Le système de fixation des pales au moyeu doit alors être spécialement dimensionné pour supporter le surplus de contraintes et éviter tout bris mécanique. Les éoliennes peuvent aussi être arrêtées en raison de vibrations trop importantes qui apparaissent lorsque le dépôt de glace n'est pas réparti uniformément [18]. Ces vibrations favorisent l'expulsion dangereuse de morceaux de glace [19].

La présence de la glace sur les appareils de mesure d'une éolienne altère également le fonctionnement de ces appareils. Un anémomètre givré [15] ou une girouette givrée ne sont

pas en mesure de fournir des données cohérentes, le contrôle de l'éolienne devient alors difficile ou même impossible.

Sur certains sites éoliens à climat très froid (régions nordiques et/ou sites montagneux), les températures peuvent descendre en dessous des seuils de fonctionnement de certaines composantes, notamment électroniques, de l'éolienne. Pour éviter tout bris mécanique, l'huile des boîtes de vitesses est chauffée régulièrement. Enfin, à très basse température et pour des vitesses de vent favorable, une éolienne peut paradoxalement se retrouver en situation de surproduction à cause de la densité de l'air trop élevée. La génératrice doit alors être dimensionnée pour supporter ce surplus de puissance sans être endommagée [15].

Certaines adaptations sont obligatoires pour envisager d'exploiter des éoliennes en milieu nordique. Ces adaptations concernent à la fois la conception mécanique de l'éolienne (matériaux adaptés aux faibles températures, dimensionnement du moyeu adapté aux contraintes radiales supplémentaires dues à l'accumulation de glace sur les pales), le choix des équipements de l'éolienne (appareils de mesures météorologiques chauffés, boîtes électriques chauffées, mise en place de systèmes de dégivrage automatisés), et enfin l'entretien et la maintenance de l'éolienne (dégivrage manuel des pales, remplacement des pièces brisées ou usées par le froid et le givre, chauffage de l'huile des boîtes de vitesses).

1.2. Problématique

Les milieux nordiques disposent de régions à potentiel éolien élevé. Malheureusement, les problèmes liés au givrage y sont fréquents : la présence de glace sur

les pales détériore considérablement les performances du rotor, la puissance fournie par une éolienne givrée diminue et par conséquent la production annuelle baisse.

Il est difficile de tirer des conclusions générales sur le givrage des éoliennes en utilisant uniquement des expérimentations en laboratoire et des analyses sur le terrain. D'un site éolien à l'autre, les conditions météorologiques changent et les éoliennes sont différentes. Des mesures expérimentales sur des sites particuliers ne sont pas suffisantes pour quantifier les effets du givrage. Les essais en soufflerie sont le plus souvent inaccessibles et leur coût élevé. Une approche par simulations numériques sur ordinateur est indispensable et permet de fournir rapidement des informations sur la perte de performances aérodynamiques et la perte énergétique dans différentes configurations d'éoliennes et de conditions météorologiques. Combiner des mesures météorologiques nombreuses et précises à des modèles numériques performants est essentiel pour évaluer adéquatement l'impact du givrage sur le fonctionnement d'une éolienne et sa production annuelle.

Ce travail quantifie numériquement les effets des évènements givrants sur les pales d'éolienne à l'aide d'un simple outil numérique pour la simulation de la formation de glace sur les pales, le calcul des coefficients de portance et de traînée et des courbes de puissance. Cette méthode, couplée à un scénario de vent et d'évènement givrant, permet de quantifier les pertes énergétiques annuelles d'une éolienne induites par la glace.

1.3. Objectifs

1.3.1. Objectif principal

L'objectif principal de ce travail est de réaliser un simple modèle numérique, bon marché, permettant de quantifier les pertes énergétiques d'une éolienne à axe horizontal dues au givrage. Le givrage cause des pertes de performances aérodynamiques. Ces dernières provoquent des pertes de puissance et par conséquent des pertes énergétiques.

L'originalité de ce modèle numérique, nommé PROICET, consiste en l'intégration de trois logiciels dans un processus séquentiel dont les résultats du premier logiciel sont les entrées du deuxième et ainsi de suite. Ceci permet d'évaluer les pertes de performances aérodynamiques, les pertes de puissance et enfin les pertes de production d'une éolienne dues au givrage. La particularité de ce modèle numérique consiste dans le choix des trois logiciels qui se trouvent à la disposition de tout le monde (deux logiciels sont gratuits et l'accès au troisième est facile). L'ensemble du modèle numérique PROICET est présenté à la Figure 3.

Le premier logiciel utilisé par PROICET, est CIRALIMA, développé par le Laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA) de l'Université du Québec à Chicoutimi en collaboration avec le Centro Italiano Ricerche Aerospaziale (CIRA) en Italie. Il simule les formes de glace accumulée sur la pale d'une éolienne en fonction des conditions atmosphériques et météorologiques telles que la vitesse du vent, la température et la pression de l'air, ainsi que la teneur en eau liquide, le diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau surfondue et la durée de la précipitation givrante [20]. Ce logiciel

permet de prédire en 2D la forme des profils aérodynamiques après l'accumulation de glace et ce pour différentes positions radiales sur la pale.

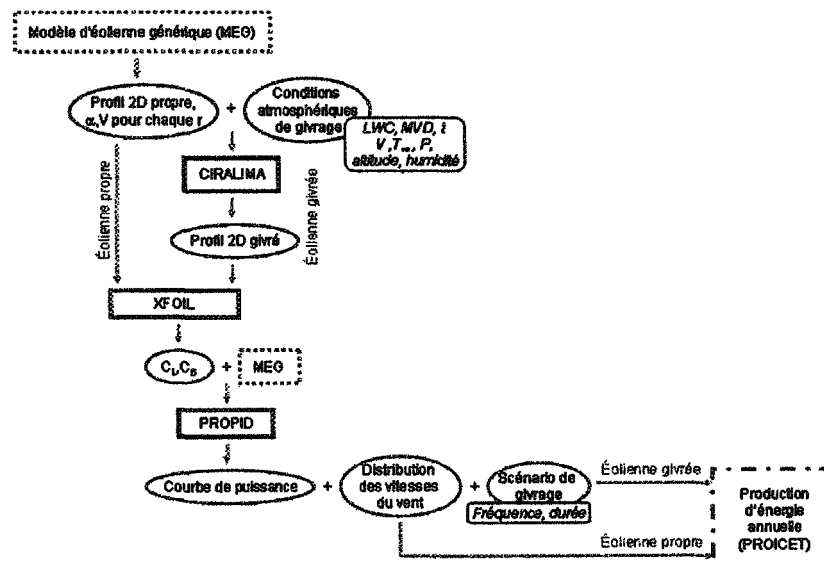


Figure 3 : Schéma du modèle numérique PROICET

À partir des formes de glace simulées, les coefficients de portance et de traînée des pales givrée et propre sont calculés avec le logiciel XFOIL. XFOIL est une véritable soufflerie numérique qui permet de modéliser l'aérodynamique d'un profil en 2D. Une fois les coefficients de portance et de traînée des pales propre et givrée connus, les courbes de puissance peuvent être calculées.

À partir des coefficients de portance et de traînée de la pale givrée et du modèle éolienne générique MEG, les courbes de puissance de l'éolienne MEG sont estimées avec le logiciel PROPID, en condition standard d'utilisation (propre) et givré.

Un modèle éolienne générique MEG est nécessaire car dans la documentation technique des éoliennes accessible au public, il manque souvent certaines

caractéristiques qui doivent être modélisées. Ce modèle est une représentation technique de la pale qui se compose d'un profil aérodynamique, d'un angle de calage et d'une distribution de l'angle de vrillage et de la corde le long de la pale. Les paramètres du MEG sont déterminés en fonction de l'éolienne qui doit être simulée.

Finalement, lorsque les courbes de puissance sont couplées à des scénarios de givrage et de distribution de la vitesse du vent pour un site donné, les pertes de production énergétiques d'une éolienne dues au givrage peuvent être quantifiées. Un scénario de vent et de givre sont utilisés pour représenter le site.

1.3.2. Objectifs spécifiques

Le modèle numérique de production énergétique d'une éolienne à axe horizontal PROICET doit répondre aux objectifs spécifiques suivants :

- le modèle s'applique au cas général d'une éolienne (givrée ou propre) à axe horizontal;
- le modèle s'applique au cas d'une éolienne à pas variable;
- le modèle est valable pour n'importe quel site et n'importe quelle éolienne à axe horizontal;
- le modèle nécessite que les résultats du premier logiciel soient les entrées du deuxième et les résultats du deuxième soient les entrées du troisième;
- le modèle doit fournir les résultats intermédiaires comme les formes des profils givrés, les coefficients de portance et de traînée correspondants, et les courbes de puissance.

Le modèle éolienne générique MEG doit répondre aux objectifs spécifiques suivants :

- le modèle s'applique au cas d'une éolienne tripales à axe horizontal;
- le modèle s'applique au cas d'une éolienne à pas variable;
- le modèle est valable pour n'importe quel profil aérodynamique de pale.

Le modèle numérique de production énergétique d'une éolienne à axe horizontal PROICET et le modèle éolienne générique MEG sont validés pour une éolienne Vestas V80 1.8 MW non givrée et pour le site de Murdochville (Québec) aux conditions atmosphériques standards¹. Les résultats de PROICET permettront l'étude des performances de l'éolienne Vestas V80 sous conditions de précipitations givrantes.

1.4. Les caractéristiques physiques du givrage et sa modélisation

1.4.1. Le givrage

Le givrage des éoliennes est un problème important qui ne peut être négligé car il est une source des pertes de production qui peuvent être importantes; il peut causer des dommages matériels, mettre en danger la sécurité du public, et dans des cas extrêmes conduire à l'effondrement des éoliennes [21].

Le givrage se produit lorsque l'éolienne est soumise à un hydrométéore givrant contenant des gouttelettes d'eau à l'état liquide à des températures inférieures au point de congélation (0°C). De telles gouttelettes d'eau sont nommées surfondues. Elles se retrouvent souvent en altitude, sous forme de nuages à des températures entre 0°C et- 40°C,

¹ Les conditions atmosphériques standards sont prises au niveau de la mer et correspond à une température de 15°C et une pression barométrique de 101.325 kPa ce qui correspond à une densité de l'air de 1.225 kg/m³

au sol, sous forme de brouillard givrant, de neige mouillée, de bruine ou de pluie verglaçante. Les gouttelettes d'eau en surfusion vont heurter la surface de l'objet ou la glace qui le recouvre. Sous l'impact, elles vont geler instantanément ou partiellement, se fragmenter ou s'unir et former des gouttes de surface plus ou moins grosses. Ces dernières gouttes vont s'écouler sous forme de ruisselets pour former un film liquide qui va geler partiellement, alors que la partie liquide continue à s'écouler [22].

Un paramètre fondamental de l'évaluation de l'importance du phénomène de givrage est la teneur en eau liquide. Elle indique la quantité de gouttelettes d'eau en surfusion contenue dans un volume d'air donné [21].

Par exemple, la sévérité du givrage des avions est classée en quatre catégories selon la teneur en eau liquide [21]. Le givrage est considéré comme « trace » lorsque la teneur en eau liquide est inférieure à 0.1 g/m^3 ; la glace est perceptible en raison d'un taux d'accumulation légèrement supérieur au taux de sublimation. Il est considéré comme « léger » lorsque la teneur en eau liquide est comprise entre 0.1 g/m^3 et 0.5 g/m^3 ; il devient alors dangereux si la durée de résidence dans cet environnement est supérieure à une heure. Il est considéré comme « modéré » lorsque la teneur en eau liquide est comprise entre 0.5 g/m^3 et 1.0 g/m^3 ; il devient alors potentiellement dangereux. Il est considéré comme « sévère » lorsque la teneur en eau liquide est supérieure à 1.0 g/m^3 ; il devient alors très dangereux. Malheureusement, ces catégories ne sont pas utilisables en éolien car le taux d'accumulation de la glace n'est pas seulement fonction de la teneur en eau liquide, mais il est aussi fonction du diamètre de gouttelettes d'eau, de la géométrie et de la vitesse des gouttelettes d'eau, de la température et de la durée de l'évènement [21].

1.4.2. Types et formes de glace

Deux types de glace se retrouvent principalement dans la nature. Ce sont le givre et le verglas. Le givre se forme lorsque les gouttelettes d'eau en surfusion gèlent instantanément en heurtant la surface. Les gouttelettes gèlent l'une sur l'autre, ce qui engendre une surface rugueuse. Le givre est une glace opaque de faible densité (comprise entre 250 kg/m^3 , pour le givre léger, et 850 kg/m^3 , pour le givre dur [21]). Il est caractérisé par une couleur laiteuse en raison de la présence des bulles d'air qui restent emprisonnées dans la structure cristalline durant le rapide processus de solidification [20]. Généralement, le givre épouse la forme du profil. La Figure 4 présente la forme de glace obtenue par le givre.

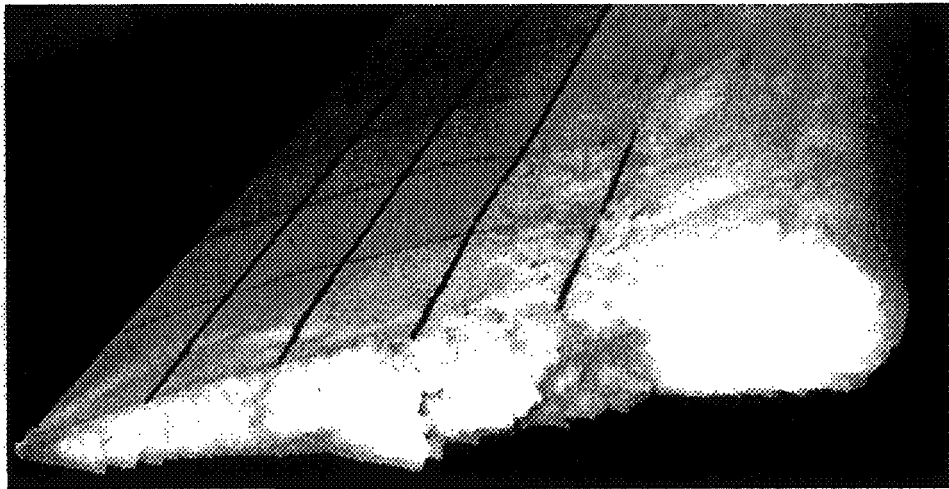


Figure 4 : Formation de givre sur un modèle réduit de pale d'hélicoptère [21]

Lorsque les gouttelettes d'eau ne gèlent pas instantanément à l'impact, elles vont s'unir pour former des gouttes de surface. Ces gouttes vont croître et se solidifier partiellement. Elles vont s'unir et ruisseler sur la surface du profil sous l'effet des forces aérodynamiques. Si la teneur en eau liquide est plus élevée, les gouttes d'eau vont s'unir et

s'écouler sous forme de ruisselets. Si la teneur en eau liquide augmente encore, les ruisselets vont s'unir et former des films d'eau. La glace ainsi formée, appelée verglas, possède une surface très peu rugueuse et une densité de 917 kg/m^3 [20]. Le verglas est clair et transparent en raison de la très faible quantité de bulles d'air emprisonnées à l'intérieur. Les formes résultantes sont très variables, soit des cornes simple ou double, soit de bec ou arrondi dus au ruissellement [22]. La Figure 5 présente la forme de glace obtenue par le verglas.

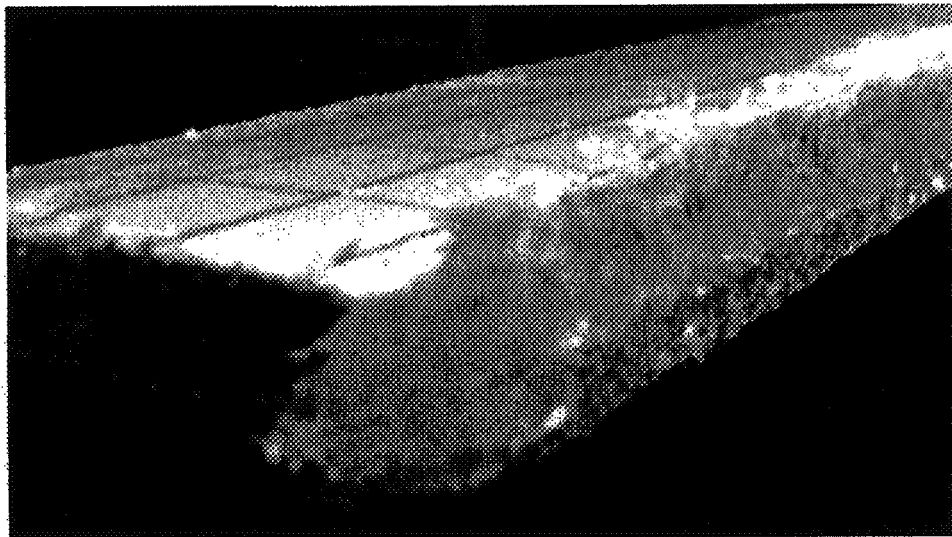


Figure 5 : Formation de verglas sur un modèle réduit de pale d'hélicoptère [21]

Le givre et le verglas ont des effets négatifs sur les caractéristiques aérodynamiques mais peuvent être enlevés à l'aide des systèmes antigivrant ou dégivrant. Le verglas a des conséquences nettement plus sévères que le givre sur les performances aérodynamiques. Ceci est dû à l'irrégularité et l'asymétrie des formes obtenues par le verglas, ce qui rend difficile la détermination du profil aérodynamique [22].

1.4.3. Modèles numériques de givrage

Plusieurs modèles numériques ont été développés pour simuler la formation de glace (le givrage) sur un profil aérodynamique en deux dimensions afin de prédire le type de glace, la forme et la location du dépôt, ainsi que leur effet sur l'aérodynamique des avions et des hélicoptères en fonction des conditions atmosphériques mesurées. Ils utilisent comme conditions d'entrée la température et l'humidité relative de l'air, la pression barométrique, la vitesse de vent, la teneur en eau liquide de l'air (LWC), le diamètre volumétrique médian (MVD) des gouttelettes d'eau en surfusion et la durée de l'évènement, et font des calculs successifs de l'écoulement autour du profil et des trajectoires des gouttelettes d'eau pour prédire l'efficacité de collection, la couche limite et les coefficients de transfert, du bilan de masse et transfert de chaleur à la surface de l'objet pour prédire la masse de glace accumulée, et des changements de géométrie pour prédire la forme de dépôt de glace. Les codes validés pour l'aéronautique, en deux dimensions, sont LEWICE développé aux États-Unis par Wright [23] en 1995, ONERA développé en France par Gent [24] en 1990, TRAJICE2D développé en Grande-Bretagne par Guffond [25] en 1992, CANICE développé au Canada (École polytechnique) par Paraschivoiu [26] en 1994, CIRA développé en Italie par Mingione [27] en 1996, CIRALIMA développé au Québec par G. Fortin [20] en 2003. Le code FENSAPICE 3D, développé au Canada (Université McGill) par Habashi [28] en 2002, est le seul qui peut prédire la formation de glace sur un avion en 3D. Ces différents codes sont décrits et comparés plus en détail dans la thèse de doctorat de G. Fortin [20].

L'Institut technique de la recherche en Finlande (Technical Research Institute of Finland VTT) a développé le code TURBICE pour la modélisation de l'accrétion de glace sur les pales d'éolienne. La version initiale a été établie en 1992 par Finstand et Makkonnen [29] et a été amélioré par la suite [30].

Le code CANICE-WT a été développé à l'École polytechnique de Montréal (Canada) pour la simulation et l'analyse de la formation de glace (givre et verglas) sur les éoliennes à axe horizontal. Le code est capable de prédire la masse et la forme de glace se déposant le long d'une pale d'éolienne connaissant la géométrie de l'éolienne, les conditions d'opération et les conditions atmosphériques [22].

Étant donné que l'accès du code CIRALIMA était facile et que ses résultats sont fiables et précis comparés aux autres logiciels, ce code est utilisé dans ce travail. CIRALIMA permet de prédire en 2D la forme des profils aérodynamiques après l'accumulation de glace, en régime sec (givre) et humide (verglas), et ce pour différentes conditions atmosphériques et différentes positions sur la pale.

1.4.4. Résultats aérodynamiques des profils givrés

L'un des principaux inconvénients de l'accumulation de glace sur les pales d'éolienne est la détérioration des propriétés aérodynamiques de la pale, qui se traduit par une diminution de la portance et un accroissement de la traînée. Plusieurs références traitent de ce point ([14], [31 - 35]) et leurs résultats sont résumés dans cette section.

1.4.4.1. Impact de givrage et de la forme du dépôt de glace

L'étude expérimentale de l'impact du givrage sur les propriétés aérodynamiques d'une pale d'éolienne a débuté il y a cinq ans au Laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA) de l'UQAC, en collaboration avec le Laboratoire de recherche en énergie éolienne (LREE) de l'UQAR. C. Hochart [14] a simulé la formation de glace pour deux régimes d'accrétion, sec et humide, sur une pale d'éolienne dans la soufflerie réfrigérée du LIMA. La pale était composée d'un profil NACA 63 415 usiné dans une pièce monobloc d'aluminium 6061-T6 avec une corde de 0.2 m et une largeur de 0.5 m.

Les formes de dépôt de glace obtenues ainsi que la quantité de la masse de glace accumulée sont présentées à la Figure 6 pour le régime sec (le givre) et à la Figure 7 pour le régime humide (le verglas). Il est simple à constater que plus la position radiale augmente, plus la quantité de glace accumulée augmente.

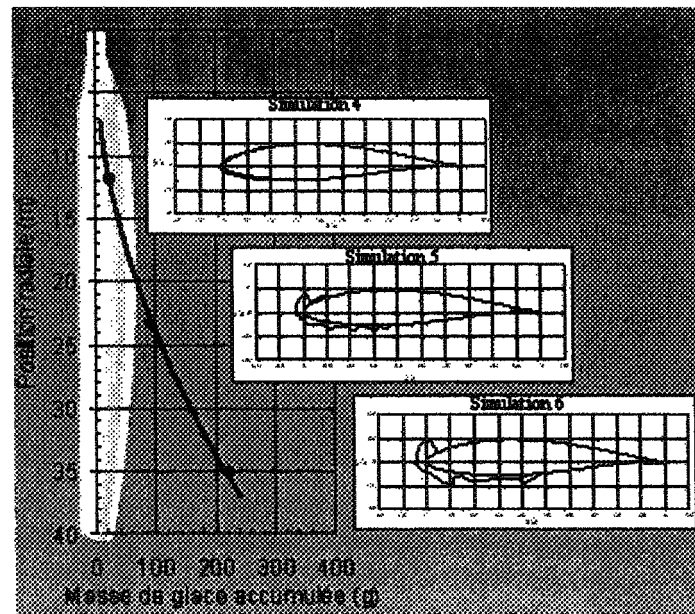


Figure 6 : Formes de dépôt de glace et masse de glace accumulée à trois positions radiales sur la pale pour un évènement givrant en régime sec (le givre) [14]

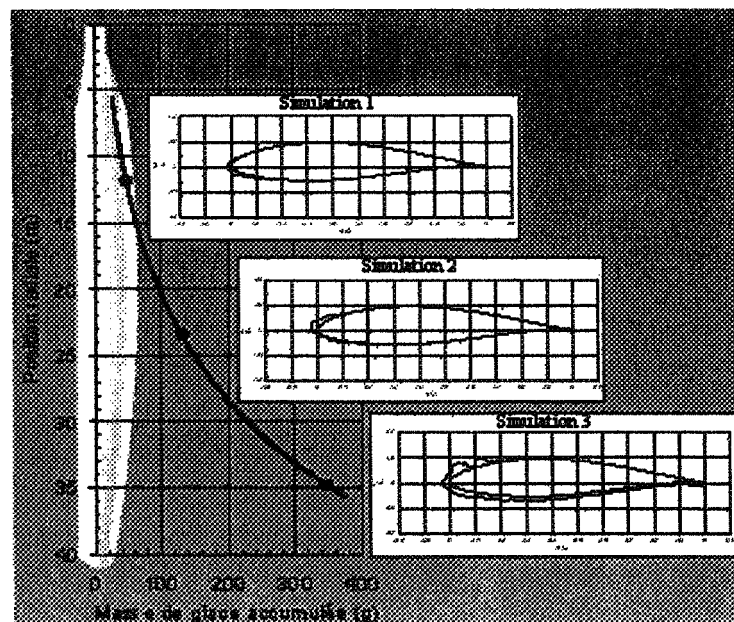


Figure 7 : Formes de dépôt de glace et masse de glace accumulée à trois positions radiales sur la pale pour un évènement givrant en régime humide (le verglas) [14]

Hochart a mesuré expérimentalement, à l'aide d'une balance aérodynamique la portance et la traînée de ces profils givrés. L'analyse des courbes de coefficients de portance et de traînée en fonction de la position radiale sur la pale (Figure 8) montre qu'avec l'augmentation de la position radiale, pour les deux événements givrants, le coefficient de portance décroît d'environ 27 % et le coefficient de traînée augmente considérablement (220 %) (Tableau 2).

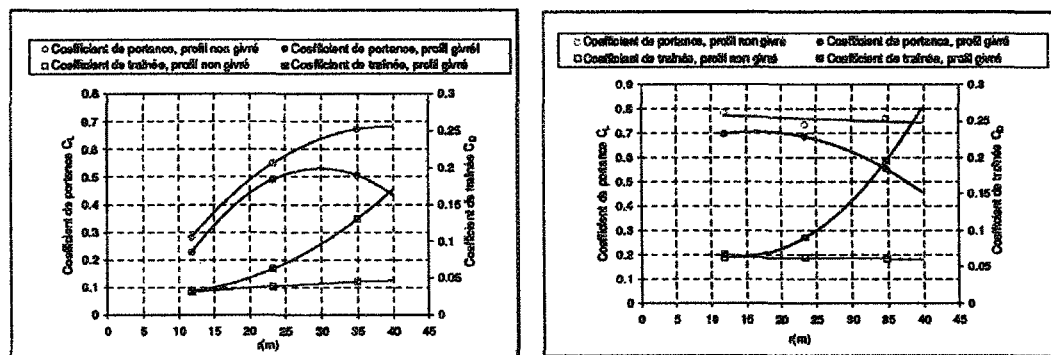


Figure 8 : Coefficients de portance et de traînée du profil NACA 63 415, mesurés pour un évènement givrant en régime sec (gauche) et un évènement givrant en régime humide (droite) [14]

Tableau 2 : Pertes de performance aérodynamique des résultats de Hochart [14]

Type de glace	Position radiale (m)	Pertes de portance (%)	Augmentation de traînée (%)
Givre	12	20	5
	23	11	61
	35	25	190
Verglas	12	11	8
	23	7	46
	35	27	220

Seifert [31] expliquait en 1992, d'après une étude expérimentale en soufflerie, que la portance est beaucoup moins perturbée par le givre que la traînée. La traînée subit une augmentation dramatique sous l'effet de la glace accumulée, ce qui est normal car le design aérodynamique du profil minimise la traînée et, si le design est altéré, la performance aérodynamique décroît.

Des profils de pale dont le bord d'attaque a été recouvert de glace (longueur de glace de 2.5 à 44 % de la longueur de corde) ont été testés en soufflerie. Les formes simulées provenaient de moulage de forme de glace sur des pales d'éoliennes givrées. Des données en deux dimensions de coefficients de portance, traînée et moment ont été obtenues dans une soufflerie en boucle ouverte pour des angles d'attaque de -10 à 30° (profil en mouvement et fixe). Les résultats de ces études sont donnés dans plusieurs articles ([32] et par exemple [33]).

La Figure 9 présente les résultats de Seifert et Richert [32]. Les courbes sont tracées à partir de résultats expérimentaux. Lors des essais, le nombre de Reynolds était de 630 000 et le profil NACA 4415 utilisé avait une corde de 225 mm et une largeur de 500 mm. L'impact des différentes formes de glace peut être comparé avec les courbes du profil propre et montre bien que la rugosité et la dimension de l'accumulation de glace ont un effet significatif sur les propriétés aérodynamiques du profil. Il y a une différence notable entre les formes B et C, respectivement avec un ratio d'accumulation de glace de 22 et 44 % (longueur de glace sur corde).

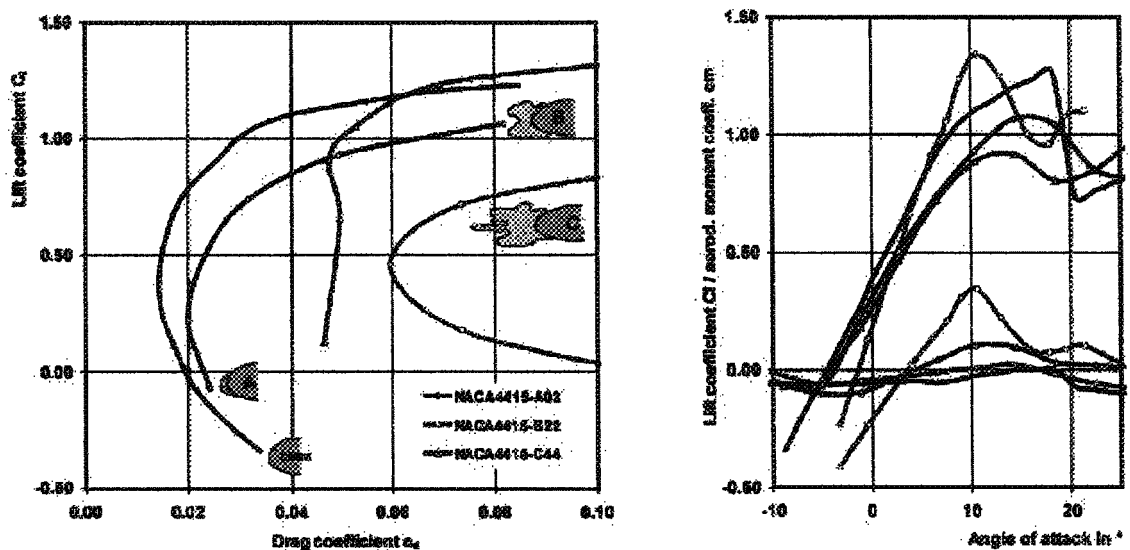


Figure 9 : Propriétés aérodynamiques d'un profil NACA 4415 avec différentes formes de glace [32]

La forme de l'accrétion de glace entre également en jeu. Lorsque la forme de glace devient trop complexe, il est difficile de prévoir l'évolution des portances et traînées. Cependant cette figure montre bien que globalement les performances aérodynamiques sont diminuées et que cette diminution augmente avec l'importance de la glace accumulée.

1.4.4.2. Impact de la rugosité

La formation de glace engendre une surface rugueuse. Rong et Bose [36] ont démontré que même des faibles dépôts, comme la gelée, peuvent modifier la rugosité de surface suffisamment pour réduire la production d'énergie éolienne d'au moins 20 %.

Les résultats du Laboratoire Risø [34] (Figure 10) démontrent la sensibilité du profil NACA 63 415 aux rugosités. Il compare les coefficients de portance et de traînée du profil lorsqu'il est lisse et lorsqu'il a été recouvert de différents éléments rugueux. A titre

d'exemple, la Figure 10 présente les résultats pour le profil propre (Smooth) et avec l'application du collant antidérapant avec zigzag à 90° (ZZ90°) à différentes positions sur le profil. La diminution de la portance est visible à partir de 8° d'angle d'attaque.

La rugosité sur le bord d'attaque affecte significativement l'écoulement à partir d'un angle d'attaque de 8° réduisant ainsi la valeur du coefficient de portance. Toujours sur le bord d'attaque, la rugosité qui s'étend vers l'extrados diminue davantage le coefficient de portance et augmente davantage le coefficient de traînée que celle qui s'étend vers l'intrados. Par ailleurs, plus la rugosité est importante, plus le coefficient de portance diminue et le coefficient de traînée augmente.

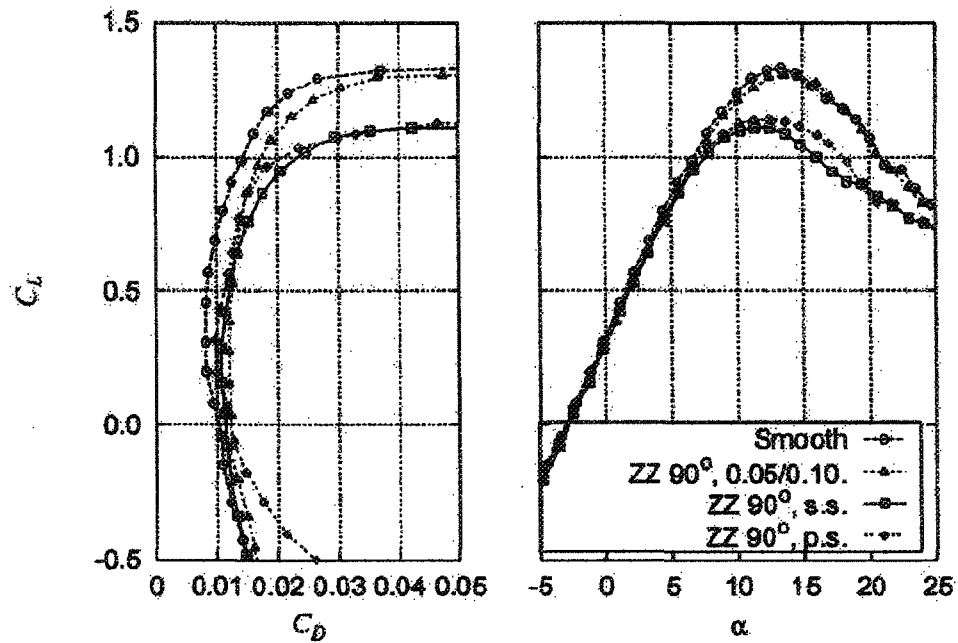


Figure 10 : Coefficients de portance et de traînée du profil NACA 63 415 avec des rugosités à différentes positions sur le bord d'attaque (0.05/0.10 correspond à une rugosité sur le nez du profil, s.s. correspond à une rugosité sur l'extrados et p.s. à une rugosité sur l'intrados) [34]

En résumé l'ensemble de ces recherches ont démontré que l'accumulation de glace sur les pales d'éolienne détériore les propriétés aérodynamiques de la pale : le givrage, ainsi que la rugosité de surface, diminuent la portance et augmentent la traînée du profil.

1.4.5. Courbes de puissance des éoliennes givrées

Plusieurs articles évoquent les pertes de puissances des éoliennes givrées ([16], [32], [33], [35] et [37]). Les données chiffrées ne sont pas toujours identiques mais des pertes de puissance sont observées dès le démarrage de l'éolienne givrée (Figure 11, Figure 12 et Figure 13) et ce, même si la couche de givre est mince.

La Figure 11 présente les résultats de Laakso [16] de la puissance produite par une éolienne de 600 kW, propre et givrée, à décrochage aérodynamique. Les baisses de productions sont remarquables.

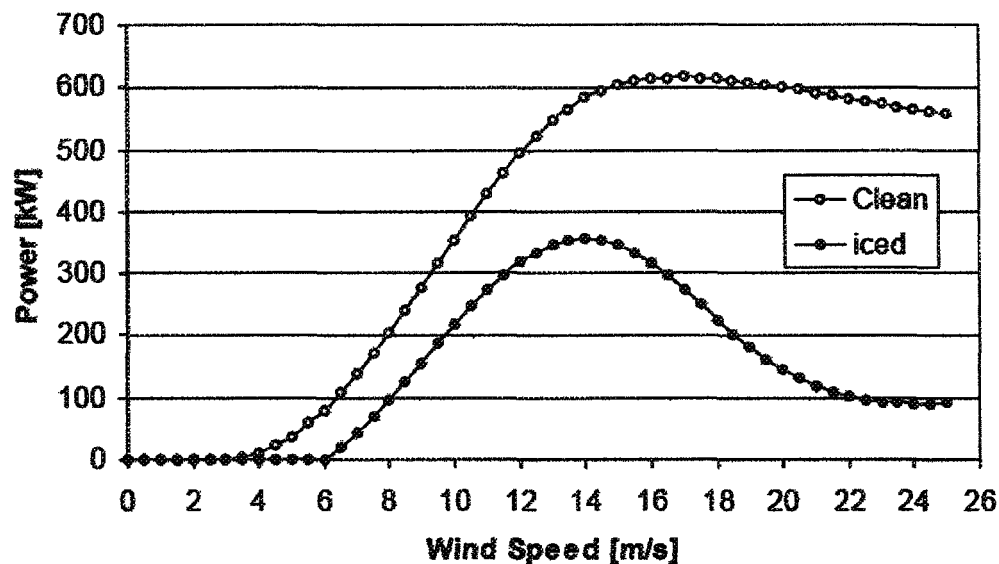


Figure 11 : Courbes de puissance calculées pour une éolienne de 600 kW à décrochage aérodynamique [16]

Le projet WECO (Wind Energy production in Cold climate [13]) utilise les caractéristiques aérodynamiques estimées en soufflerie pour différentes sections de pale givrées sur différentes éoliennes. Par exemple, la Figure 12 présente les résultats de calculs réalisés pour une éolienne de 500 kW à décrochage aérodynamique avec différentes quantités de givre sur le bord d'attaque.

Les baisses de production augmentent à mesure que la quantité de glace sur le bord d'attaque est accrue. Elles sont significativement plus importantes à partir de 14 m/s de vitesse de vent.

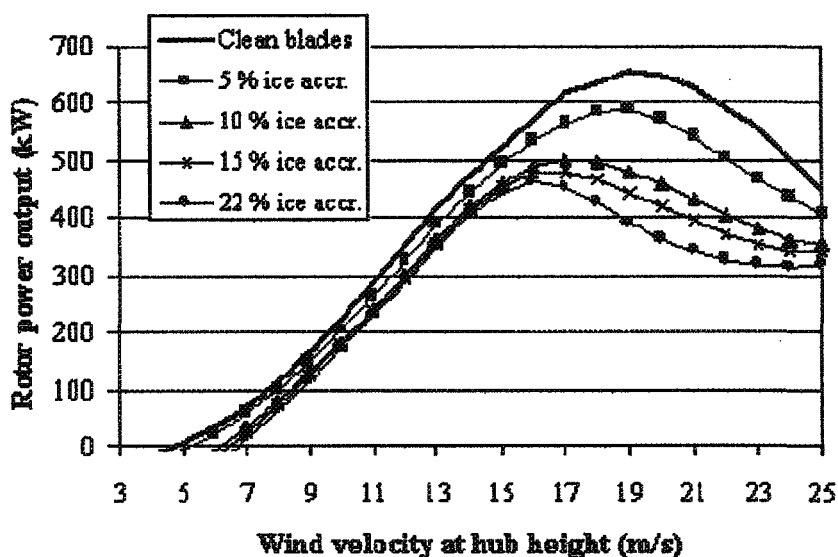


Figure 12 : Courbes de puissance calculées pour une éolienne de 500 kW givrée [37]

La Figure 13 présente une estimation de la puissance produite selon le type d'accumulation de glace tel qu'illustré en légende (résultats de Seifert et Richert [32], [33]). Les calculs sont réalisés pour une éolienne de 300 kW à calage variable.

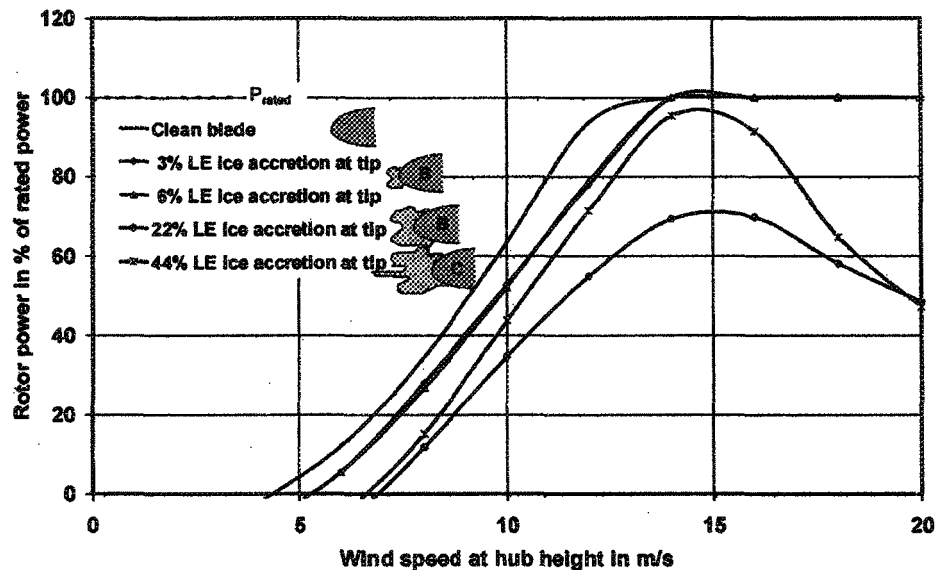


Figure 13 : Courbes de puissance calculées pour une éolienne de 300kW à pas variable avec différents types de forme de glace ([32], [33])

Les trois études ci-dessus démontrent que les pertes de production peuvent aller jusqu'à 50 % et plus de la capacité de l'éolienne pour les plus grandes vitesses de vent. Pour les plus petites vitesses de vent, les pertes atteignent 20 à 30 %.

1.4.6. Pertes de production annuelle dues au givrage

La Figure 14 présente les résultats obtenus par Seifert et Richert [33] concernant les pertes de production annuelle dues au givrage d'une éolienne de 300 kW. La durée de givrage est de un jour à trois mois. Les pertes de production sont directement reliées à la quantité de glace accumulée sur la pale ainsi qu'à la durée de l'évènement givrant. Lorsque la longueur de la glace accumulée sur le bord d'attaque est de 22% de la longueur de la corde et la durée de l'évènement est de 3 mois, les pertes de production sont estimées à

20 %. Pour une durée d'une semaine les pertes de production sont estimées à 1.5 %. Pour une longueur de la glace accumulée sur le bord d'attaque de 5% de la longueur de la corde et une durée de l'évènement de 3 mois, les pertes de production sont estimées à 6 % (Figure 14).

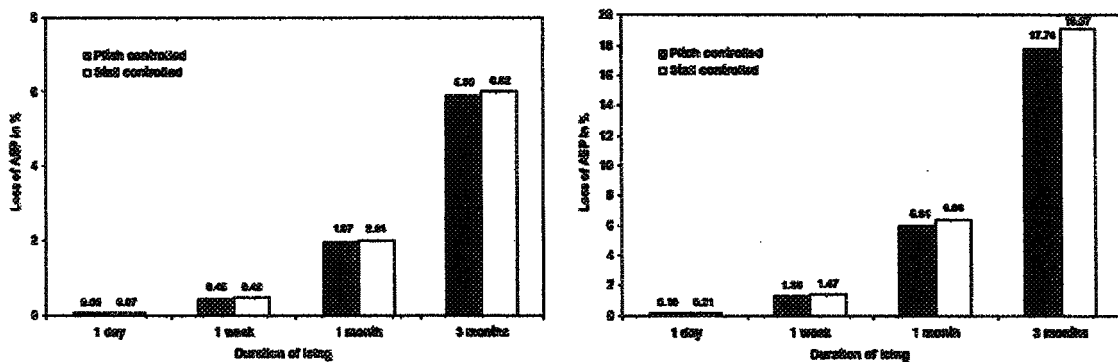


Figure 14 : Pertes de production d'une éolienne de 300 kW, dues au givrage du bord d'attaque : longueur de glace de 5% (à gauche) et de 22% (à droite) de la longueur de la corde [33]

1.5. Contenu du mémoire

La suite de ce mémoire est divisée en quatre chapitres. La théorie relative au modèle numérique de production énergétique d'une éolienne PROICET est décrite de façon générale dans le Chapitre 2. Le modèle éolienne générique MEG est présenté au Chapitre 3 où il est validé avec le modèle PROICET aux conditions atmosphériques standards. Au Chapitre 4 le modèle PROICET est évalué qualitativement en comparant la production de l'éolienne propre et givrée. Finalement, les conclusions et recommandations sont présentées aux Chapitre 5. Six annexes complètent les différents chapitres.

CHAPITRE 2

MODÈLE NUMÉRIQUE DE PRODUCTION ANNUELLE D'UNE ÉOLIENNE À AXE HORIZONTAL

2.1. Introduction

Ce chapitre décrit la théorie relative au modèle numérique PROICET de production énergétique d'une éolienne. La particularité de ce modèle consiste en l'intégration de trois logiciels, à savoir CIRALIMA, XFOIL et PROPID, dans un processus séquentiel dans lequel les résultats du premier logiciel sont les entrées du deuxième et ainsi de suite. Ceci permet d'évaluer les pertes de performances aérodynamiques, les pertes de puissance et enfin les pertes de production d'une éolienne dues au givrage. L'originalité de ce modèle numérique consiste dans le choix de ces trois logiciels, bon marché, qui utilisent des méthodes numériques simples mais avec une bonne précision.

La production annuelle d'une éolienne repose sur l'agrégation entre la courbe de puissance de la turbine éolienne et le nombre d'heures pendant lesquelles le vent souffle à une vitesse donnée durant l'année. Cette fréquence d'occurrence d'une vitesse de vent donnée est caractérisée par une fonction de distribution, la distribution de Weibull. Elle représente la probabilité d'avoir une certaine vitesse du vent pendant une période donnée. La courbe de puissance éolienne est calculée à l'aide du logiciel PROPID. Ce logiciel nécessite la connaissance des coefficients de portance et de traînée pour les profils propres

ou givrés. Ces coefficients sont calculés à l'aide du logiciel XFOIL. Les profils givrés sont obtenus à l'aide du logiciel CIRALIMA. Les profils givrés sont lissés à l'aide de XFOIL en ajoutant plus de points ou en augmentant le nombre de panneaux au bord d'attaque du profil. Le schéma fonctionnel du modèle PROICET est présenté à la Figure 3 du chapitre 1.

2.2. Calcul de la production annuelle d'une éolienne

2.2.1. Calcul de l'énergie extraite par une éolienne

Par définition, l'énergie éolienne est l'énergie cinétique présente dans l'air en mouvement. La quantité d'énergie produite dépend principalement de la vitesse du vent, mais elle est aussi légèrement affectée par la densité de l'air, cette dernière étant déterminée à son tour par la température, la pression barométrique et l'altitude [7]. La théorie de Betz permet d'expliquer simplement le processus d'extraction de l'énergie cinétique de l'air qui traverse une surface S :

$$P_{\text{rotor}} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho_{\text{air}} \cdot S \cdot V_{\infty}^3 \quad (2-1)$$

où V_{∞} est la vitesse du vent en amont (m/s), C_p est le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale 0.593), ρ_{air} est la masse volumique de l'air (kg/m^3), et S est la section balayée par les pales (m^2) de rayon R (m). Le coefficient C_p dépend des caractéristiques des profils aérodynamiques composant la pale, de la vitesse du vent en amont V_{∞} , du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage β_p et de leur vitesse de rotation. En pratique, des valeurs de C_p 0.45 à 0.5 sont atteintes pour les éoliennes disponibles actuellement.

2.2.2. Production énergétique non corrigée

Le calcul de la production énergétique non corrigée donne l'énergie produite par une ou plusieurs éoliennes dans des conditions standards¹ de température et de pression atmosphérique. Le calcul repose sur la courbe de production énergétique des éoliennes présélectionnées et sur la distribution des vitesses du vent à la hauteur du moyeu pour le site proposé.

2.2.2.1. Distribution de la vitesse du vent

L'analyse de la vitesse du vent sur un site permet d'estimer la capacité de production de ce dernier. Comme le vent présente un caractère aléatoire, son analyse doit se baser sur des méthodes statistiques. Le régime des vents sur un site se caractérise par la valeur de la vitesse moyenne du vent et les lois statistiques permettant de représenter sa variation temporelle [10].

Parmi ces lois, la *loi de Weibull* est souvent utilisée car elle représente bien la fréquence d'occurrence des vitesses du vent observées à long terme sur un grand nombre de sites [5] et prend en compte l'asymétrie des données empiriques [11]. Dans certains cas, la distribution de Rayleigh de la vitesse du vent est également utilisée. C'est un cas particulier de la distribution de Weibull, avec un facteur de forme (décrit ci-dessous) égal à 2.

¹ Les conditions atmosphériques standards de température et de pression correspondent à une température de 15°C et une pression barométrique de 101.325 kPa.

La fonction de la *densité de probabilité de Weibull* représente la probabilité $f(V)$ d'avoir une vitesse du vent V pendant l'année, comme le montre l'expression suivante [38] :

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \quad (2-2)$$

où :

- k est le *facteur de forme*, généralement compris entre 1 et 3. Pour une vitesse moyenne du vent donnée, un faible facteur de forme indique que la distribution des vitesses du vent est relativement large de part et d'autre de la moyenne, alors qu'un facteur de forme élevé indique que la distribution des vitesses du vent est relativement étroite de part et d'autre de la moyenne. Pour une vitesse moyenne du vent donnée, un faible facteur de forme conduira normalement à une production d'énergie plus élevée [5] (Figure 15) ;
- C , en m/s, est le *facteur d'échelle*. Le facteur d'échelle est directement proportionnel à la vitesse moyenne sur le site et une grande valeur de C dénote un site avec un potentiel énergétique éolien élevé (Figure 15).

Le facteur d'échelle est calculé à partir de l'équation suivante ([5] et [38]) :

$$C = V_{\text{moy}} / \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2-3)$$

où :

- V_{moy} est la valeur moyenne de la vitesse du vent ;
- Γ est la fonction gamma, définie [38] comme : $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt$.

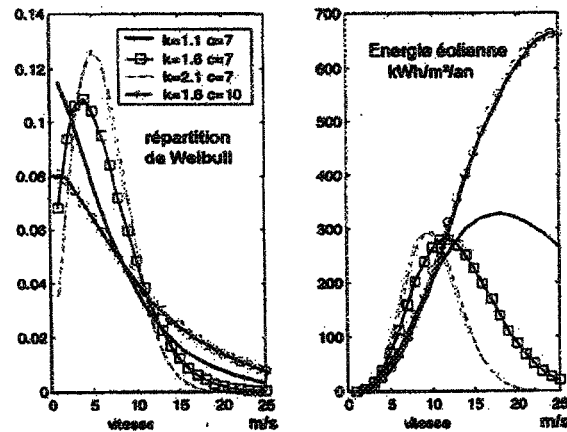


Figure 15 : Distribution de la vitesse du vent et de l'énergie correspondante pour différents couples de paramètres de la distribution de Weibull [39]

Un cas particulier de la distribution de Weibull est la *distribution de Rayleigh* où le facteur de forme k est égale à 2. C'est la distribution de la vitesse de vent la plus simple pour représenter la ressource éolienne, car il exige seulement la connaissance de la vitesse moyenne du vent. Donc elle recourt à un seul paramètre et est établie par l'équation (2-4) [38]. La Figure 16 illustre la distribution de Rayleigh pour différentes vitesses moyennes.

$$g(V) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{V}{V_{moy}^2} \right) \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{moy}} \right)^2 \right] \quad (2-4)$$

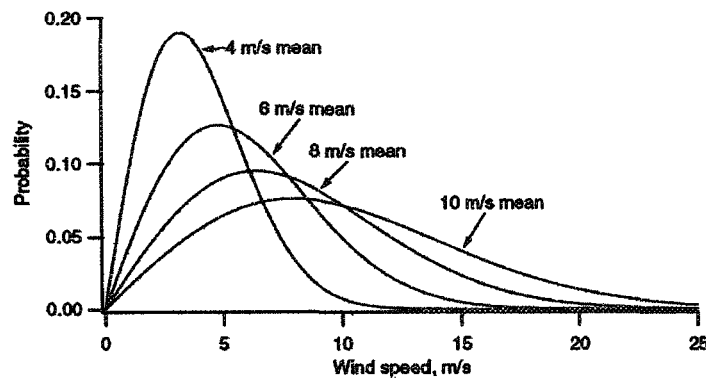


Figure 16 : Exemple de la distribution de Rayleigh pour différentes vitesses moyennes [38]

Dans le cas de Rayleigh le facteur $\Gamma(1+1/k)$ a la valeur de $\pi/2 = 0.886$ [40]. Donc, l'expression $C=V_{moy}/0.886$, permet de calculer le facteur d'échelle.

L'analyse de deux paramètres, C et k , qui caractérisent la loi de Weibull, est à l'origine de nombreuses études (par exemple [41-44]). En effet, ces deux paramètres qui dictent la manière dont la vitesse du vent varie statistiquement durant une période donnée, sont caractéristiques de chaque site et permettent d'estimer la production d'énergie éolienne sur ce site.

2.2.2.2. Courbe d'énergie

La quantité totale d'énergie produite par une éolienne, dans une gamme de vitesses moyennes annuelles du vent, peut être obtenue en intégrant la courbe d'énergie (Figure 17 en bas).

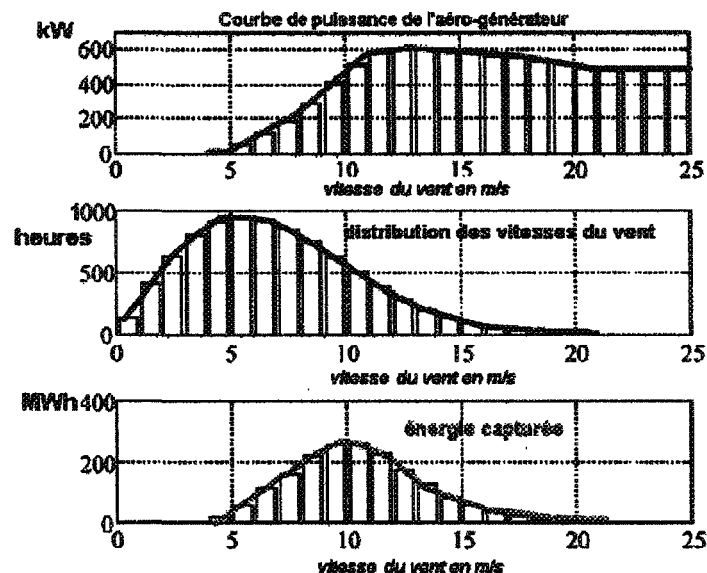


Figure 17 : Processus de calcul de la production annuelle non corrigée d'une éolienne [45]

Cette courbe est définie comme le produit entre la courbe de puissance et la fonction de densité de probabilité de Weibull ou Rayleigh ([5], [45]). Chaque point de la *courbe d'énergie* $E(V)$ est calculé par :

$$E(V) = \Delta t_{an} \cdot P(V) \cdot f(V) \quad (2-5)$$

où $P(V)$ est la puissance de l'éolienne à la vitesse du vent V obtenue à partir de la courbe de puissance, Δt_{an} est la durée d'une année, à savoir 8760 h, et $f(V)$ est la fonction de densité de probabilité de Weibull pour la vitesse du vent V .

À titre d'exemple, la Figure 17 montre l'énergie récupérée avec une machine de 600 kW en fonction de la distribution des vitesses de vent et de la courbe de puissance de l'éolienne.

2.2.2.3. Production énergétique non corrigée

Si les lois de Weibull et de Rayleigh nous permettent de déterminer le comportement statistique de la vitesse du vent dans le temps, d'autres lois nous permettent de mesurer la variabilité du vent au même endroit, au même moment mais à des hauteurs différentes. Cette variation verticale de la vitesse du vent est dictée par la variation typique de la couche limite atmosphérique dans le voisinage du sol. Des lois, dites de cisaillement vertical, permettent d'évaluer cette variabilité. Elles sont d'une importance particulière et croissante car la nécessité de produire plus d'énergie engendre une nécessité d'élévation de la hauteur des éoliennes au dessus de celle des appareils de mesures qui est en général moindre [10].

La *loi de puissance*, donnée par [12], est couramment utilisée comme relation entre les vitesses du vent à deux hauteurs différentes :

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{\alpha'} \quad (2-6)$$

où V est la vitesse du vent à la hauteur du moyeu H , V_0 est la vitesse du vent à la hauteur de l'anémomètre H_0 et α' est le *coefficient de cisaillement du vent* compris entre 0.1 et 0.4 (0.1 correspond à la mer, 0.16 à une plaine, 0.28 à une forêt et 0.4 à une zone urbaine [12]).

Une fois calculée la vitesse du vent à la hauteur du moyeu il est possible de calculer la production énergétique non corrigée E_U comme l'intégrale de la relation (2-5) :

$$E_U = \Delta t_{an} \cdot \int_0^{V_{max}} P(V) \cdot f(V) dV \quad (2-7)$$

2.2.3. Production énergétique corrigée

L'énergie éolienne captée est égale à la quantité d'énergie produite par le système éolien, corrigée en fonction de la pression atmosphérique, des conditions de température et des pertes des équipements. Elle est définie par [5]:

$$E_C = E_U C_H C_T C_l \quad (2-8)$$

où E_C est la production énergétique corrigée. C_H et C_T sont respectivement les coefficients de correction barométrique et thermique définis par :

$$C_H = p/p_0 \quad (2-9)$$

$$C_T = T_0/T \quad (2-10)$$

où p est la moyenne annuelle de la pression atmosphérique sur le site, p_0 est la pression atmosphérique standard de 101.3 kPa, T est la moyenne annuelle de la température

absolue du site et T_0 est la température absolue standard de 288.1 K. C_l est le coefficient des pertes définie par :

$$C_l = (1 - \lambda_a)(1 - \lambda_e)(1 - \lambda_d)(1 - \lambda_m) \quad (2-11)$$

Où λ_a est le coefficient de pertes par effet de sillage, λ_e est le coefficient de pertes par encrassement des pales ou résultant du verglas, λ_d est le coefficient des pertes pour causes d'arrêts et λ_m est un coefficient représentant des pertes diverses.

2.3. Logiciel PROPID

Le calcul de la production annuelle d'une éolienne nécessite la connaissance de la courbe de puissance. Cette courbe sera construite à l'aide du logiciel PROPID présenté dans cette section.

PROPID est un logiciel gratuit conçu pour le design et l'analyse des éoliennes à axe horizontal. En mode analyse, c'est-à-dire en utilisant la vitesse du vent, la vitesse de rotation du rotor et les caractéristiques géométriques de la pale (longueur de la pale, distribution des angles de vrillage et des cordes le long de la pale et les propriétés aérodynamiques du profil) comme paramètres d'entrée, PROPID peut fournir la courbe de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent et pour différents angles de calage.

Seul le mode d'analyse de PROPID est utilisé dans le présent mémoire et est présenté. La Figure 18 illustre le fonctionnement de PROPID en mode analyse. À partir des caractéristiques connues de l'éolienne, il est facile d'obtenir la courbe de puissance et la courbe du coefficient de puissance.

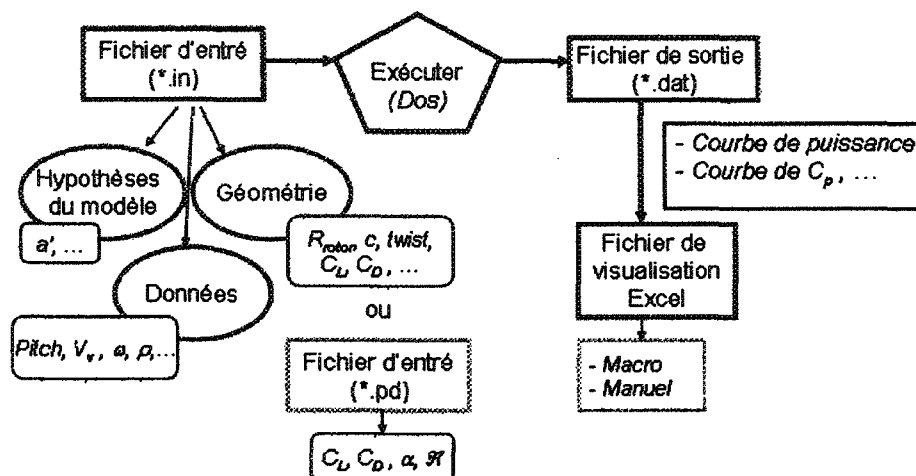


Figure 18 : Schéma fonctionnel de PROPID en mode d'analyse

Le Tableau 3 résume les paramètres nécessaires pour la simulation, le Tableau 4 présente le choix des hypothèses de calcul et le Tableau 5 résume les résultats disponibles et ceux utilisées.

Tableau 3 : Caractéristiques essentielles de l'éolienne pour la simulation avec PROPID [46]

- Rayon du rotor	- Vitesse de démarrage
- Rayon du moyeu	- Vitesse d'arrêt
- Hauteur du moyeu	- Exposant du profil de vent
- Angle de cône du rotor	- Angle de calage
- Nombre de pales	- Longueur de la corde par section
- Densité de l'air	- Angle de vrillage par section
- Vitesse de rotation	- Polaires des profils par section

Pour le modèle d'éolienne MEG, présenté dans le chapitre 3, les pertes en bout de pale, les pertes au niveau du moyeu, les effets du mouvement de « balancier » de l'arbre de transmission et les effets du sillage n'ont pas été considérés (Tableau 4). Le modèle Viterna a été retenu pour simuler le décrochage.

Tableau 4 : Hypothèses de calcul possible en mode d'analyse dans PROPID [46]

Hypothèse	Alternatives
Pertes en bout de pale	- Ignorer - Modèle de Prandtl (approche de Wilson) - Modèle de Prandtl (approche original)
Pertes au niveau du moyeu	- Ignorer - Modèle de Prandtl
Effet du mouvement de « balancier » de l'arbre de transmission	- Ignorer - Inclure les vibrations de l'arbre
Modèle après décrochage	- Plaque plane - Viterna
Effets du sillage	- Ignorer
Modèle de section de pale	- Nombre de sections de pales

Tableau 5 : Résultats disponibles en mode d'analyse dans PROPID [46]

- Courbe de puissance : fichier « ftn040.dat »	- Coefficient de puissance versus vitesse spécifique : fichier « ftn045.dat »
- Coefficient de puissance versus vent : fichier « ftn050.dat »	- Distribution de puissance le long de la pale : fichier « ftn060.dat »
- Distribution du coefficient de puissance le long de la pale : fichier « ftn065.dat »	- Distribution du ratio portance/trainée le long de la pale : fichier « ftn075.dat »
- Distribution de l'angle d'attaque le long de la pale : fichier « ftn080.dat »	- Distribution du coefficient de portance le long de la pale : fichier « ftn085.dat »
- Facteur d'induction axiale le long de la pale : fichier « ftn090.dat »	- Distribution de la corde le long de la pale : fichier « ftn095.dat »
- Distribution de l'angle de vrillage le long de la pale : fichier « ftn0100.dat »	

Une fois que toutes les hypothèses, paramètres et caractéristiques nécessaires sont définies, PROPID calcule la courbe de puissance.

Les coefficients de portance et de traînée sont parmi les paramètres nécessaires pour le calcul de la courbe de puissance. Ces coefficients sont calculés, pour les profils propres et givrés, avec XFOIL, présenté dans la section suivante.

2.4. Logiciel XFOIL

Cette section présente le logiciel XFOIL qui permet de calculer les coefficients de portance et de traînée d'un profil aérodynamique 2D. XFOIL, développé par Mark Drela du MIT aux Etats-Unis, est dans le domaine public depuis 2001. Il s'agit d'une soufflerie numérique qui permet de modéliser les effets aérodynamiques le long de profils d'ailes.

2.4.1. Description générale

XFOIL est un programme interactif pour la conception et l'analyse des profils isolés subsoniques [47]. Il se compose d'une collection d'applications qui effectuent différentes fonctions utiles telles que :

- L'analyse visqueuse ou non-visqueuse d'un profil aérodynamique ;
- La conception d'un profil aérodynamique ;
- La modification de la géométrie d'un profil aérodynamique ;
- L'assemblage des profils ;
- Calcul des coefficients de portance et de traînée pour un nombre de Reynolds ou/et un nombre de Mach fixes ou variables ;
- L'écriture et la lecture de la géométrie du profil et la sauvegarde des fichiers des coefficients de portance et de traînée ;
- L'affichage de la géométrie, de la distribution de pression et des coefficients de portance et de traînée.

La façon d'interagir avec XFOIL est de lui envoyer des commandes textuelles à partir d'une ligne de commande. Il s'apparente plus à DOS qu'à Windows. Néanmoins, si les

entrées sont textuelles, XFOIL est capable de restituer la plupart des résultats de façon graphique.

2.4.2. Modèle physique

XFOIL calcule les caractéristiques aérodynamiques d'un profil bidimensionnel (2D). Le logiciel permet de choisir un écoulement non-visqueux ou visqueux, avec dans ce dernier cas, la prise en compte d'une couche limite et le calcul de l'emplacement de la transition laminaire-turbulent qui est essentiel pour établir le coefficient de traînée. Une description générale de la méthodologie de XFOIL est décrite par M. Drela dans l'article [48]. La formulation de la couche limite utilisée par XFOIL est décrite dans l'article [49].

2.4.3. Modèle numérique

Le modèle numérique 2D développé dans XFOIL ([47], [48] et [49]) utilise la méthode des panneaux qui consiste à distribuer des sources et des tourbillons, appelés singularités, sur la surface du profil 2D afin d'en déduire le champ de vitesse satisfaisant à des conditions aux limites prédéfinies. Le profil 2D étant divisé en un certain nombre de segments afin d'en approcher le mieux possible le contour. La référence [48] contient une explication plus détaillée de la méthode. La méthode des panneaux considère le fluide étant non-visqueux. Elle est généralement suivie d'un calcul de couche limite : zone très mince localisée le long de la surface du corps où les effets de la viscosité sont importants [14]. Le calcul des paramètres de la couche limite se fait par la méthode intégrale de Karman-Tsien. La correction de Karman-Tsien ([47] et [48]) étant intégrée pour améliorer les prédictions

en régime compressible. Le couplage visqueux/non-visqueux se fait à l'aide de la vitesse de transpiration (modèle de transpiration superficielle) [47]. Le modèle utilisé pour déterminer le point de transition est la formulation de type e^9 décrit plus en détail dans la référence [48].

2.4.4. Inconvénients de XFOIL

Un des inconvénients de XFOIL est qu'il ne traite pas les configurations multi-profiles comme les profils équipés de becs de bord d'attaque. Un autre inconvénient est que XFOIL ne calcule que les profils ressemblants à des ailes, les profils fins et les profils épais ne sont pas calculables avec XFOIL. De plus, la saisie du fichier de profil demande de respecter certaines règles, notamment une bonne définition géométrique au bord d'attaque par une densité des points et une régularité de la variation de la courbure. Pour les profils pour lesquels la définition est insuffisante, le calcul ne converge pas. Ceci peut être corrigé, mais pas toujours, par un lissage mathématique dans XFOIL ou par un lissage graphique.

La limitation la plus importante provient de l'utilisation par XFOIL d'un modèle de couplage entre un calcul non-visqueux par la méthode des panneaux et d'une correction visqueuse à l'aide d'un calcul intégral de la couche limite et l'utilisation d'une vitesse de transpiration. Aussi, les écoulements avec des zones de séparation importantes comme les profils à grands angles d'incidence ou les profils givrés sont très difficiles à modéliser et requièrent une attention particulière.

Le nombre des panneaux par défaut dans XFOIL est 140 et le nombre maximal des panneaux est 280. XFOIL nécessite aussi un certain niveau de connaissance en aérodynamique.

Le logiciel XFOIL a été utilisé pour calculer les coefficients de portance et de traînée pour les profils propres et les profils givrés. Les profils givrés sont simulés avec le logiciel CIRALIMA, présenté dans la suite. Une fois les profils givrés obtenus, il est nécessaire d'amoindrir les angles entre les panneaux avant de les entrer dans XFOIL et faciliter les calculs avec ce logiciel. La surface de glace est alors uniformisée à l'aide de XFOIL en ajoutant plus de points au bord d'attaque du profil givré. Lorsque la forme givrée est trop complexe le lissage de XFOIL devient impossible. Un lissage manuel est alors nécessaire pour diminuer les angles entre les panneaux et faciliter les calculs avec XFOIL.

2.5. Logiciel CIRALIMA

Le LIMA (Laboratoire international des matériaux antigivre) en collaboration avec le CIRA (Italian Aerospace Research Centre) a développé un logiciel, nommé CIRALIMA 2D (Figure 19), simulant l'accrétion de la glace en régime sec et humide sur un objet bidimensionnel fixe. Ce logiciel est la combinaison de l'algorithme CIRA-2D qui calcule les écoulements potentiels, les trajectoires et le coefficient de collection et de LIMA-2D qui calcule le coefficient de transfert de chaleur par convection, la hauteur des rugosités, la masse de glace accumulée, ainsi que la nouvelle géométrie. Le logiciel CIRALIMA 2D est en mesure de générer les formes complexes de glace observées, comme les cornes et les cannelures. Les particularités du modèle développé font qu'il peut être appliqué aux cas où

les vitesses sont faibles ou élevées, ou encore pour les objets tournants par rapport au sol comme pour les pales d'éoliennes ou d'hélicoptères [20].

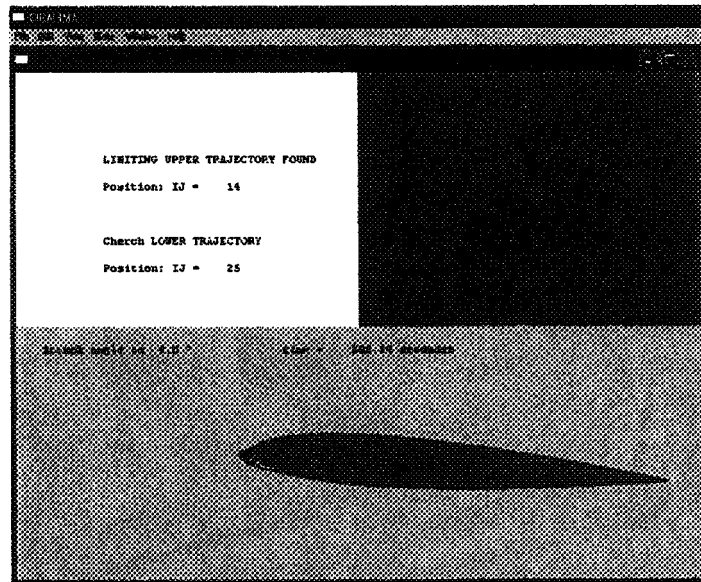


Figure 19 : Logiciel CIRALIMA 2D

Le logiciel CIRALIMA permet de prédire en 2D la forme des profils aérodynamiques après l'accumulation de glace, en régime sec (givre) et humide (verglas), et ce pour différentes conditions atmosphériques et différentes positions sur la pale.

Les données d'entrées de CIRALIMA pour simuler la formation de glace sur un profil aérodynamique sont répertoriées dans le Tableau 6. Ce sont des conditions atmosphériques de givrage et la géométrie du profil aérodynamique.

Tableau 6 : Données d'entrées du logiciel CIRALIMA

Conditions atmosphériques de givrage	Géométrie du profil aérodynamique
Température de l'air (°C)	Angle d'attaque (deg)
Humidité relative de l'air (%)	Nombre de profils
Pression barométrique (Pa)	Chorde de chaque profil (m)
Vitesse de vent (m/s)	Épaisseur de chaque profil (m)
Teneur en eau liquide de l'air (kg/m ³)	Nombre des panneaux (-)
Diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau en surfusion (m)	Coordonnées (x_i , y_i) de profil aérodynamique
Durée de l'évènement givrant (s)	

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre il a été présenté la théorie relative au modèle numérique PROICET, développé pour simuler la production énergétique d'une éolienne lors du givrage. Les trois logiciels intégrés dans ce modèle ont été également présentés. Le modèle PROICET est validé pour les conditions atmosphériques standards dans le chapitre 3.

CHAPITRE 3

MODÈLE ÉOLIEN GÉNÉRIQUE REPRÉSENTATIF D'UNE ÉOLIENNE VESTAS V80 1.8 MW

3.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de valider le modèle éolien générique MEG aux conditions atmosphériques standards ainsi que le modèle pour le calcul de la production annuelle PROICET, présenté au chapitre 2. Le MEG est un modèle générique utilisé pour représenter l'éolienne Vestas V80 1.8 MW pour la classe de vent IEC 2A. Certaines caractéristiques de l'éolienne n'étant pas disponibles, des approximations concernant notamment la géométrie de la pale, sont effectuées.

3.2. Éolienne Vestas V80 1.8 MW

Soixante éoliennes de type Vestas V80 1.8 MW sont en service depuis 2004-2005 à Murdochville en Gaspésie. Cet endroit possède un fort potentiel éolien, mais il est régulièrement soumis à des brouillards givrants (section 4.2). En raison de son utilisation dans ce parc, l'éolienne Vestas V80 1.8 MW est choisie pour la modélisation numérique. Cette section présente les données techniques de la Vestas V80 1.8 MW, extraites de rendues publiques de Vestas ([51], [52]), pour une classe du vent IEC 2A dont la vitesse moyenne ne dépasse pas 8.5 m/s [53].

L'éolienne V80 1.8 MW possède une hauteur de moyeu de 67 m et un diamètre de rotor de 80 m pour une surface de capture de 5 027 m². La vitesse de rotation nominale du rotor est de 15.5 tours/min. La vitesse de démarrage est de 4 m/s, la vitesse nominale du vent est de 16 m/s et la vitesse de coupure est de 25 m/s. La vitesse de rotation de l'éolienne varie de 15 tours/min pour de vent de 4 m/s à 15.5 tours/min pour des vents de 9 m/s à 11 m/s (Figure 53 de l'Annexe A).

L'éolienne Vestas V80 est une éolienne à pas variable. Elle dispose d'un système de calage des pales nommé OptiTip®. Ce système gère par microprocesseurs la rotation de la pale autour de son axe longitudinal, assurant un réglage continu qui permet de conserver un angle de pale optimal en fonction des vents dominants [54]. Le pas de la pale varie de 10° à 20° (Figure 54 de l'Annexe A) avec un pas initial de 11.75°.

La pale de l'éolienne Vestas V80 1.8 MW est composée simplement de deux profils aérodynamiques, sont le NACA 63 XXX et le FFA W3 XX. Les rendues publiques de Vestas ne donnent pas des détails techniques en ce qui concerne le profil exact composant la pale. La corde des profils varie le long de la pale de 3.52 m à la racine de la pale à 0.48 m en bout de pale. L'angle de vrillage varie le long de la pale de 13° à la racine de la pale à 0° en bout de pale.

La courbe de puissance de l'éolienne Vestas V80 1.8 MW, aux conditions atmosphériques standards, est présentée à la Figure 20. Les conditions atmosphériques standards sont prises au niveau de la mer et correspondent à une température de 15°C et une pression barométrique de 101.325 kPa ce qui correspond à une densité de l'air de

1.225 kg/m³. Le coefficient de puissance, qui représente l'efficacité de l'éolienne ou sa capacité d'extraire l'énergie de l'air, est présenté à la Figure 20.

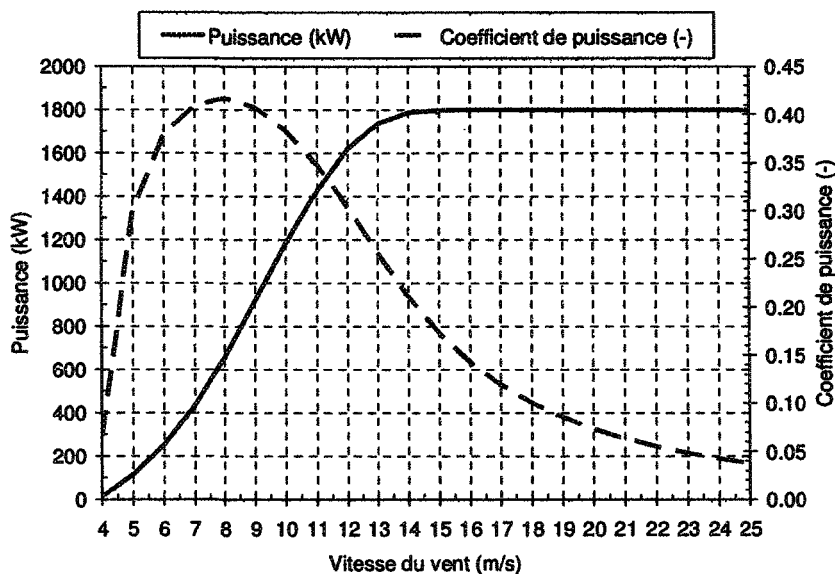


Figure 20 : Puissance et coefficient de puissance de la Vestas V80 1.8 MW aux conditions atmosphériques standards pour la classe IEC 2A

Aux conditions atmosphériques standards, l'éolienne démarre lorsque le vent est de 4 m/s avec un coefficient de puissance de 0.0655, elle s'arrête lorsque le vent est de 25 m/s avec un coefficient de puissance de 0.0374. Le coefficient de puissance maximal est de 0.4168 et est atteint lorsque le vent est de 8 m/s (Tableau 21 de l'Annexe A).

3.3. Pale du modèle éolien générique

La pale du rotor est l'élément clé dans l'éolienne pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie mécanique développée par l'éolienne dépend de son efficacité et de sa stabilité structurelle et son efficacité dépend de la géométrie de la pale.

La conception optimale de la pale est un compromis entre la performance aérodynamique et la résistance de la structure. Tout d'abord, différents profils sont distribués le long de la pale ce qui permet d'extraire des puissances aussi élevées que possible de l'air, en tenant compte des distributions de la longueur de la corde, de l'épaisseur et de l'angle de vrillage et par la suite, la résistance de la structure doit être vérifiée [55].

La conception d'une pale du rotor consiste également à prendre en considération certains critères comme le rapport des coefficients de portance et de traînée (C_l/C_d) qui doit être aussi élevé que possible et la vitesse spécifique λ , choisie de sorte que le coefficient de puissance C_p , qui représente les performances aérodynamiques, soit assez élevé [55]. Toutes ces considérations sont prises en compte lors de la modélisation de la géométrie de la pale de MEG.

3.3.1. Passage de la pale 3D au profil aérodynamique 2D

La pale d'éolienne (3D) est divisée dans sa longueur en plusieurs sections faisant apparaître à chaque fois un profil 2D parallèle à la direction du vent relatif (Figure 21 et section C.1). Le passage du 3D au 2D se fait selon la théorie de l'élément de pale telle que présentée dans le livre *Wind Energy HandBook* [40].

Chaque profil est caractérisé par un angle de vrillage β_T par rapport à l'axe de la pale. L'angle de vrillage est une donnée intrinsèque à la pale et permet de maximiser la puissance produite à une vitesse particulière. Par ailleurs, la pale tourne autour de son axe

avec un angle de calage β_P qui peut varier en cours de fonctionnement pour le cas des éoliennes à calage variables, comme la Vestas V80 1.8 MW.

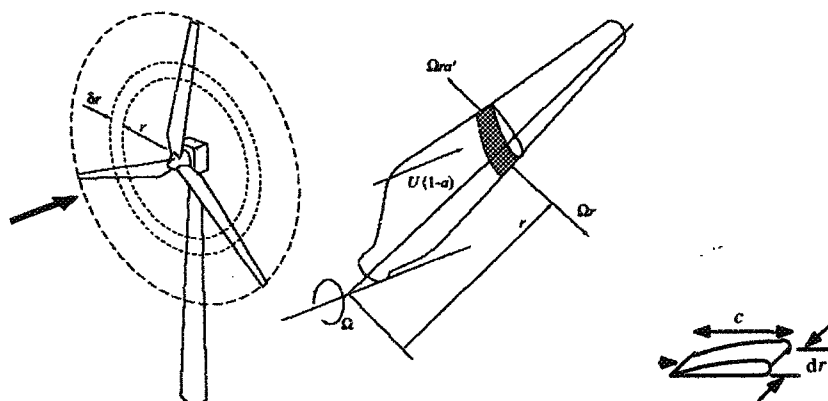


Figure 21 : Division de la pale suivant la théorie de l'élément de pale [40]

3.3.2. Vitesses et angles sur un élément de pale

La Figure 22 présente les vitesses et les angles sur une section d'un élément de pale.

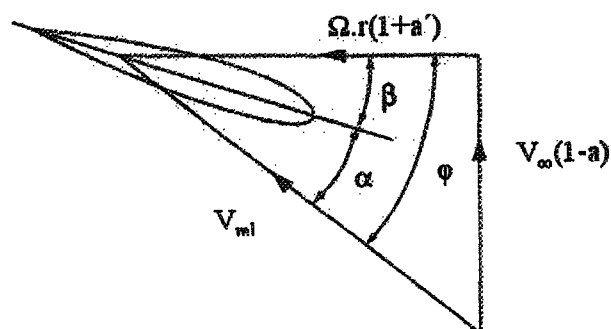


Figure 22 : Section d'un élément de la pale à un rayon r . Vitesses et angles sur l'élément de pale [40]

La vitesse relative V_{rel} est la combinaison de la vitesse du vent V_v et la vitesse due à la rotation de la pale V_{tg} :

$$V_{rel} = \sqrt{V_v^2 + V_{tg}^2} \quad (3-1)$$

La vitesse du vent V_v qui arrive sur la pale est exprimée, d'après la théorie du disque actuateur [40], comme une fonction de la vitesse de l'écoulement non perturbé V_∞ et du facteur d'induction axial a :

$$V_v = V_\infty (1 - a) \quad (3-2)$$

La vitesse tangentielle V_{tg} , d'après la théorie du disque rotor [40], dépend de la distance r de la section analysée par rapport au moyeu de la pale. Elle dépend aussi de la vitesse de rotation de la pale ω et du facteur d'induction tangentiel a' :

$$V_{tg} = \omega r (1 + a') \quad (3-3)$$

Les significations physiques du facteur d'induction axial a et du facteur d'induction tangentiel a' proviennent de la théorie du disque actuateur avec sillage décrite dans [40].

L'angle d'attaque relatif (ou l'angle d'incidence) α , qui est l'angle entre la corde du profil et la vitesse relative V_{rel} , peut être exprimé comme suit :

$$\alpha = \varphi - \beta = \arctg\left(\frac{V_v}{V_{tg}}\right) - \beta \quad (3-4)$$

Où β est l'angle d'inclinaison. Il correspond à l'angle de calage β_P de la pale au niveau du moyeu auquel on ajoute l'angle de vrillage β_T à la position radiale choisie. φ est l'angle d'écoulement qui est l'angle entre la vitesse relative V_{rel} et le plan de rotation.

3.3.3. Choix du profil. Distribution de l'épaisseur le long de la pale

Selon la documentation de Vestas, les profils aérodynamiques qui composent la pale de l'éolienne V80 1.8 MW sont le NACA 63 XXX et le FFA W3 XXX (section 3.2). Le profil exact étant inconnu, un profil aérodynamique NACA 63 415 (Figure 23) est choisi tout au long de la pale car c'est un profil souvent utilisé pour la confection des pales d'éoliennes et plusieurs données sont disponibles dans la littérature ([32], [34], [56] et [57]). De plus, la série des profils NACA 63 XXX ont des bonnes performances aérodynamiques [55].

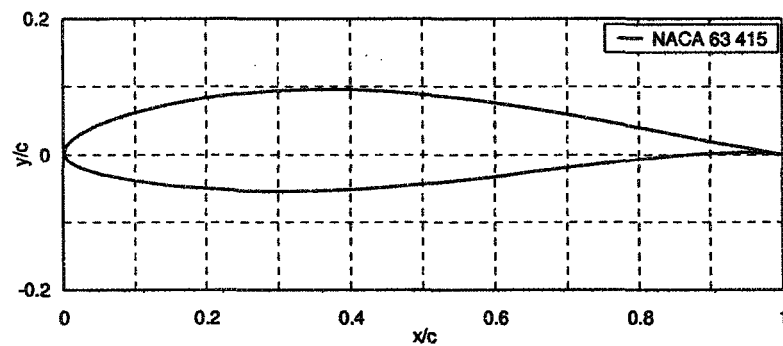


Figure 23 : Profil aérodynamique NACA 63 415

Il est à noter que le choix du même profil tout au long de la pale entraîne une épaisseur relative maximale de 15 % pour tous les profils composants la pale. Étant donné que la distribution de la corde le long de la pale est supposée linéaire (section 3.3.4), il en résulte que la distribution de l'épaisseur le long de la pale est aussi linéaire (Tableau 9). La signification du profil NACA 63 415 et la notion de l'épaisseur relative sont présentées en Annexe dans la section C.2.3.

3.3.4. Distribution de la corde le long de la pale

Selon la théorie de l'élément de pale [40], la distribution de la corde pour obtenir une performance aérodynamique optimale, est calculée avec l'équation suivante :

$$c_{opt}(r) = \frac{16\pi R}{9C_L\lambda^2 N} \frac{1}{\left(\frac{r}{R}\right)} \quad (3-5)$$

où C_L est pris pour le rapport maximal des coefficients de portance et traînée et λ est la vitesse spécifique optimale.

Malheureusement cette distribution hyperbolique n'est pas pratique pour la fabrication de la pale et sa connexion dans le moyeu. Le compromis entre les performances aérodynamiques et le coût de fabrication est, selon les références [40] et [55], de remplacer la distribution hyperbolique de la corde (équation (3-5)) par une droite. Donc, la distribution de la corde le long de la pale est supposée linéaire et suit l'équation suivante :

$$c(r) = k_1.r + k_2 \quad (3-6)$$

où les constants k_1 et k_2 sont trouvées en appliquant $c(r=5)=3.52$ et $c(r=40)=0.48$ (section 3.2). Il est à noter que le changement de section cylindrique à un profil aérodynamique s'effectue sur le premier 10 % de la pale [58]. Finalement, la distribution de la corde suit l'équation :

$$c(r) = -0.086857r + 3.954285 \quad (3-7)$$

La Figure 24 présente la distribution de la corde le long de la pale de l'éolienne MEG.

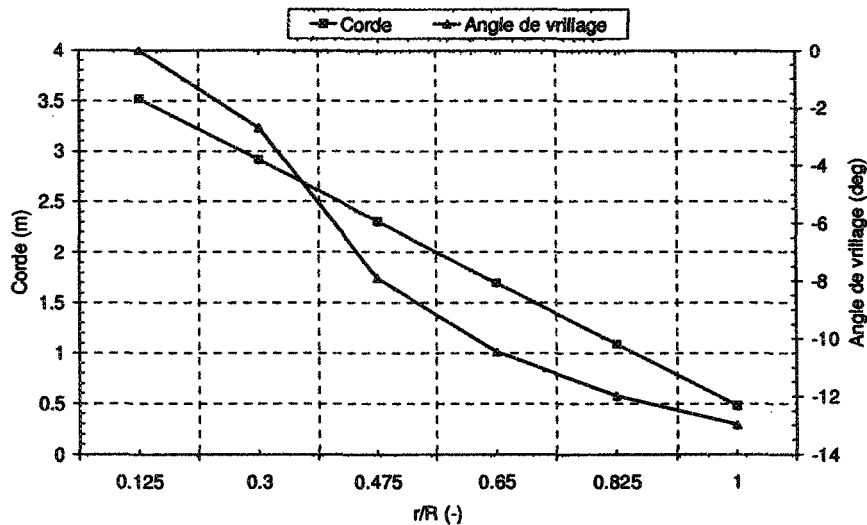


Figure 24 : Distribution de la corde et de l'angle de vrillage le long de la pale du MEG

3.3.5. Distribution de l'angle de vrillage le long de la pale

L'angle de vrillage de la pale de la Vestas V80 1.8 MW varie de 13° et 0° (section 3.2) sur une longueur approximative de 35 mètres [58]. Des valeurs précises de la distribution du vrillage le long de la pale ne sont pas disponibles dans la documentation de Vestas. Les angles de vrillage β_T ont donc été calculés, d'après les références [55] et [59], en choisissant pour angle d'incidence en toutes les sections, l'incidence optimale correspondant à la finesse maximale (c.à.d. $\max(C_I/C_D)$) du profil. Pour le profil NACA 63 415 la finesse maximale correspond à l'angle d'incidence de 6° selon la référence [9]. L'angle d'écoulement φ est calculé dans des conditions optimales de fonctionnement selon les références [13] et [14]. La vitesse du vent pour le design est de 8 m/s ce qui correspond au coefficient de puissance maximale (Tableau 21). La vitesse de rotation correspondante est de 15.2 tours/min (Figure 53). La connaissance de l'angle

d'écoulement φ , de l'angle d'incidence α et de l'angle de calage β_P entraîne immédiatement, d'après l'équation (3-4), celle de l'angle de vrillage.

Le calcul des angles et des vitesses se fait de la même façon que présenté dans la section 3.3.2. Les conditions de calcul des angles de vrillage sont présentées au Tableau 7.

Tableau 7 : Conditions de calcul des angles de vrillage du MEG

Vitesse du vent à l'infini	8	(m/s)
Vitesse du vent sur le rotor	5.3	(m/s)
Vitesse de rotation	15.2	(tours/min)
Angle d'attaque optimal	6.0	(deg)
Angle de calage initial	11.75	(deg)

Les valeurs des angles de vrillage sont répertoriées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Distribution de la corde et calcul des angles de vrillage du MEG

r (m)	$\mu=r/R$	c (m)	a'	V_{tg} (m/s)	V_{rel} (m/s)	α (deg)	β_T (deg)
5	0.125	3.520	0.2245	9.8	11.1	6	0
12	0.300	2.912	0.0390	19.9	20.6	6	-2.7
19	0.475	2.304	0.0155	30.7	31.2	6	-7.9
26	0.650	1.696	0.0083	41.7	42.1	6	-10.5
33	0.825	1.088	0.0052	52.8	53.1	6	-12.0
40	1.000	0.480	0.0035	63.9	64.1	6	-13.0

Il est à noter que, d'après la théorie du disque rotor, que lorsque l'air est considéré comme un gaz parfait, les performances optimales sont obtenues quand les facteurs d'induction axial a et tangentiel a' sont :

$$a = \frac{1}{3} \text{ et } a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \quad (3-8)$$

où λ et μ sont respectivement le rapport des vitesses en bout de pale : $\lambda = \Omega R / V_\infty$ et le rapport des rayons : $\mu = r / R$.

De plus, selon la théorie du disque actuateur [40], la valeur du facteur d'induction axial égal à $a=1/3$ optimise le coefficient de puissance C_P de l'éolienne.

Les angles de vrillage calculés varient de 0° à -13° au lieu de 13° à 0° comme indiqué dans les données techniques du Tableau 20 (Annexe A). L'ordre de grandeur est conservé ce qui justifie la cohérence du modèle. La Figure 24 présente la distribution du vrillage le long de la pale de l'éolienne MEG.

3.3.6. Discrétisation de la pale

La pale de l'éolienne MEG est divisée dans sa longueur en 5 sections de 7 m chacune comme montré à la Figure 25. Le passage de la section cylindrique au profil aérodynamique s'effectue sur le premier 10 % de la pale [58].

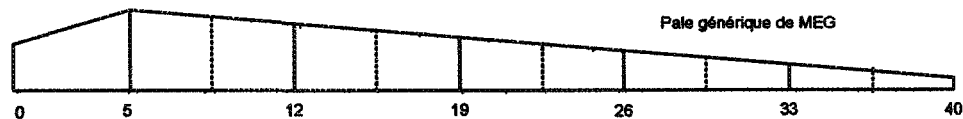


Figure 25 : Pale générique du MEG divisée en 5 sections

Cinq positions radiales au milieu de chaque section ont été choisies. Ceci permet d'obtenir des forces aérodynamiques moyennes de chaque section. Les positions radiales choisies se situent à 8.5 m, 15.5 m, 22.5 m, 29.5 et 36.5 m du moyeu.

Les résultats de la simulation de givrage, réalisées par C. Hochart sur un profil NACA 63 415 dans la soufflerie réfrigérée du LIMA [60], ont montré que c'est près du milieu de la pale que la glace s'accumule en plus grande quantité (Figure 26).

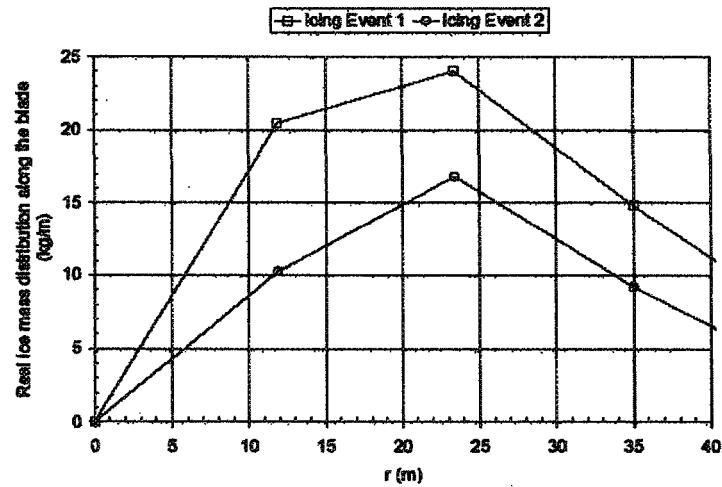


Figure 26 : Masse de glace accumulée en fonction de la position radiale r selon Hochart [60]

De plus, selon Wind Energy Handbook [40] la section de la pale située proche du moyeu contribue faiblement à la puissance totale obtenue (Figure 27) et généralement les premiers 15 % de rayon de la pale proche du moyeu ne sont pas considérés dans les calculs. Dans le cas du MEG, le 15 % de rayon de la pale proche de moyeu correspond à 6 m de rayon.

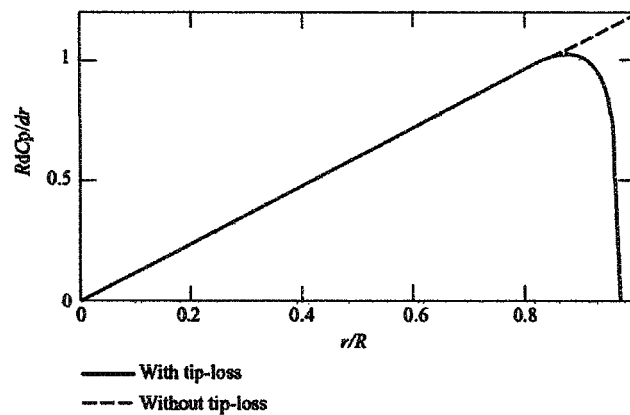


Figure 27 : Distribution de la puissance extraite par une éolienne le long de la pale [40]

3.3.7. Synthèse

La cinématique de la pale du MEG pour les cinq positions radiales et pour un vent de 8 m/s est présentée au Tableau 9. La Figure 28 illustre le profil à chaque position radiale.

Tableau 9 : Cinématique de la pale du MEG pour les cinq positions radiales et pour un vent de 8 m/s

Radius r (m)	$\mu=r/R$	Chorde (m)	e_{\max}	Vrillage (deg)	α_{rel} (deg)	V_{tg} (m/s)	V_{rel} (m/s)	Re^1	$Mach^1$
8.5	0.213	3.22	0.48	0	6	14.6	15.5	$3.4 \cdot 10^6$	0.05
15.5	0.388	2.61	0.39	-5.8	6	25.3	25.8	$4.6 \cdot 10^6$	0.08
22.5	0.563	2.00	0.30	-9.4	6	36.2	36.6	$5.0 \cdot 10^6$	0.11
29.5	0.738	1.39	0.21	-11.3	6	47.3	47.6	$4.5 \cdot 10^6$	0.14
36.5	0.913	0.78	0.12	-12.5	6	58.3	58.6	$3.1 \cdot 10^6$	0.17

Selon le mode d'opération, les angles d'attaque sont compris entre 5 et 21 degrés, les nombres de Reynolds entre $2.1 \cdot 10^6$ et $7.3 \cdot 10^6$ et les nombres de Mach entre 0.03 et 0.2. Cependant, en se limitant à des vitesses de vent raisonnables (inférieures à 20 m/s), les angles d'attaques relatifs varient toujours de 5 à 21 degrés. Dans ces mêmes conditions, les nombres de Reynolds varient de $2.1 \cdot 10^6$ à $5.4 \cdot 10^6$ et les nombres de Mach varient de 0.06 à 0.19. Le nombre de Mach étant inférieur à 0.3, l'écoulement reste toujours subsonique incompressible.

3.4. Calcul des coefficients de portance et de traînée

Les coefficients de portances et de traînée, présentés à la Figure 28, sont calculés à l'aide du logiciel XFOIL pour les cinq positions radiales retenues et aux conditions atmosphériques standards. Les simulations ont été effectuées dans le mode visqueux avec

¹ Les nombres de Reynolds et de Mach sont calculés aux conditions atmosphériques standards

140 panneaux. Les nombres de Reynolds et les nombres de Mach, à chaque position radiale, sont répertoriés au Tableau 9.

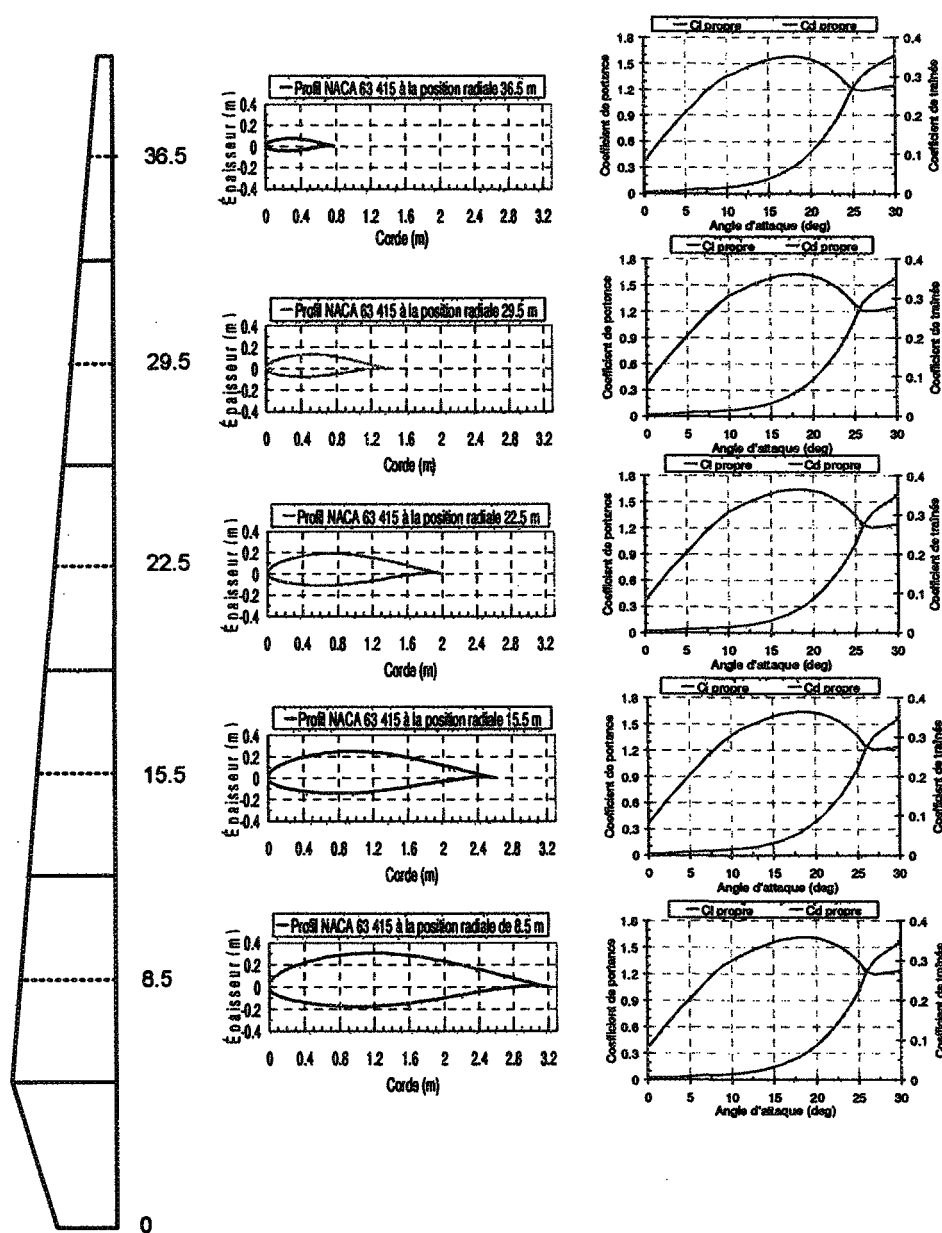


Figure 28 : Coefficients de portance et de traînée du profil NACA 63 415 à cinq positions radiales sur la pale du MEG et aux conditions atmosphériques standards

3.5. Calcul de la courbe de puissance aux conditions atmosphériques standards

Les courbes de puissance de l'éolienne MEG pour différents angles de calage sont obtenues à l'aide du logiciel PROPID aux conditions atmosphériques standards. Elles sont présentées à la Figure 29.

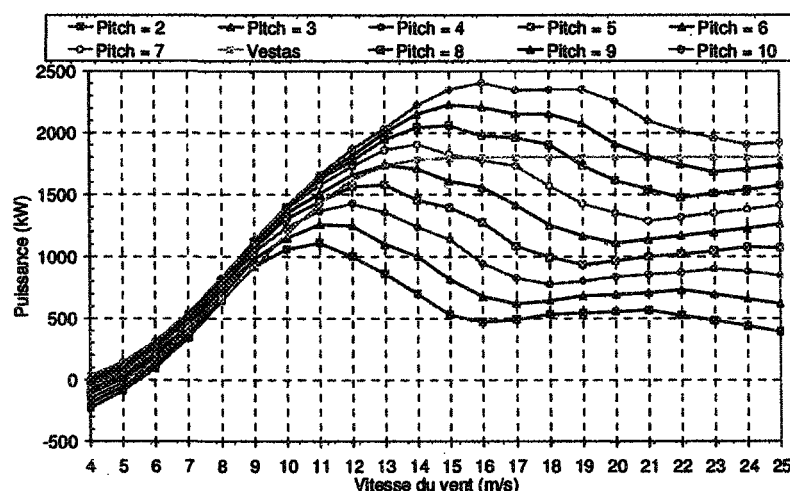


Figure 29 : Courbes de puissance de PROPID pour le MEG aux conditions atmosphériques standards

Étant donné qu'il s'agit d'une éolienne à pas variable, la courbe de puissance du MEG est obtenue à partir des courbes de la Figure 29 en appliquant la stratégie de contrôle de l'angle de calage du MEG présentée au Tableau 31 dans l'Annexe F. La courbe de puissance résultante est présentée à la Figure 30.

Les valeurs de la puissance fournie par la documentation de Vestas, de la puissance calculée du MEG ainsi que de l'erreur relative correspondante, sont répertoriées dans le Tableau 10.

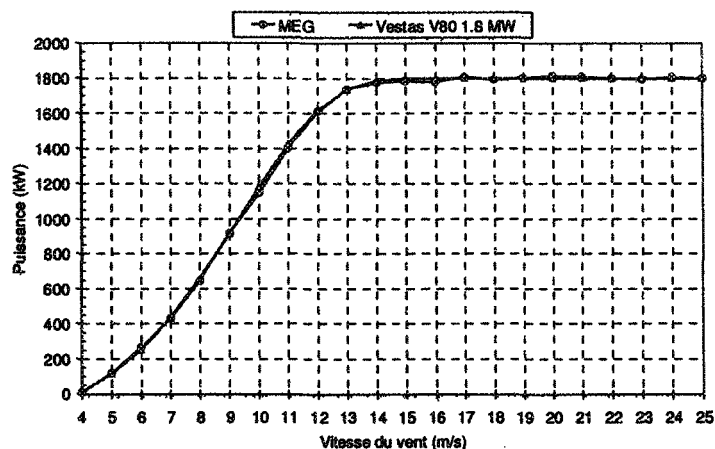


Figure 30 : Courbe de puissance pour l'éolienne Vestas et MEG aux conditions atmosphériques standards

Tableau 10 : Puissance de Vestas V80 1.8 MW fournie par le fabricant et calculée pour le MEG

V_{∞} (m/s)	Puissance (kW)		Erreur relative (%)
	Vestas	MEG	
4	12.9	10.5	18.98
5	116	119	2.34
6	252	263	4.47
7	432	429	0.60
8	657	643	2.09
9	914	918	0.46
10	1179	1147	2.73
11	1424	1403	1.46
12	1619	1612	0.44
13	1735	1738	0.19
14	1784	1775	0.51
15	1797	1784	0.71
16	1800	1777	1.28
17	1800	1808	0.45
18	1800	1792	0.43
19	1800	1803	0.17
20	1800	1812	0.67
21	1800	1810	0.55
22	1800	1798	0.10
23	1800	1794	0.35
24	1800	1807	0.36
25	1800	1798	0.11

3.6. Validation du MEG

Les courbes de puissance de l'éolienne correspondant à la Vestas V80 1.8 MW et au MEG, qui sont présentés à la Figure 30, sont presque confondues. L'erreur relative moyenne est moins de 2%. Pour des vents compris de 4 à 6 m/s l'erreur relative maximale, obtenue pour la vitesse de démarrage de l'éolienne, est de 19% avec une erreur moyenne de 8.6%. Pour des vitesses de vent supérieures à 6 m/s l'erreur relative maximale ne dépasse pas 3% avec une erreur moyenne de 0.7% validant le modèle d'éolienne générique MEG aux conditions atmosphériques standards.

3.7. Calcul de la production annuelle

3.7.1. Calcul de la production annuelle de la Vestas V80 1.8 MW

La production annuelle d'une Vestas V80 1.8 MW, installée à Murdochville, est calculée selon la procédure présentée dans la section 2.2. La distribution de la vitesse du vent, pour une période d'un an, est celle de Weibull (Figure 31) avec un facteur de forme $k=2$ (section 2.2 et [61]) et un facteur d'échelle $C=9.03$ qui correspond à une vitesse moyenne de 8 m/s (section 4.2).

La Figure 32 présente la puissance fournie par le constructeur de l'éolienne pour une classe IEC 2A de vent et aux conditions atmosphériques standards. La Figure 33 montre l'énergie récupérée avec la machine de 1.8 MW. Il s'agit de la production énergétique non corrigée qui donne l'énergie produite par l'éolienne dans des conditions standards de température et de pression atmosphérique. Pour obtenir la production énergétique corrigée

de l'éolienne, il faut faire une correction en fonction de la pression atmosphérique, des conditions de température et des pertes des équipements. Le coefficient de correction barométrique C_H est obtenu pour une valeur de la pression annuelle de 94.26 kPa (section 4.2). Le coefficient de correction thermique C_T est obtenu pour une valeur de température annuelle de -0.10°C (section 4.2). Le coefficient des pertes C_l est pris égal à 1 car les pertes des équipements n'ont pas été considérées.

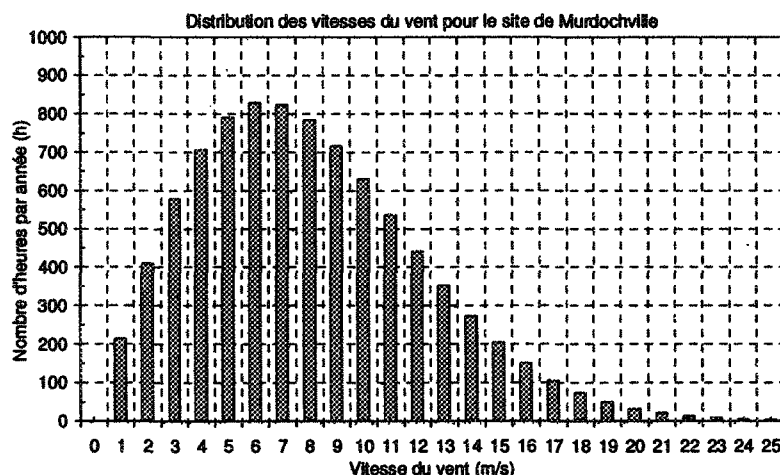


Figure 31 : Distribution statistique des vitesses du vent pour le site de Murdochville : facteur de forme de 2 et facteur d'échelle de 9.03 m/s

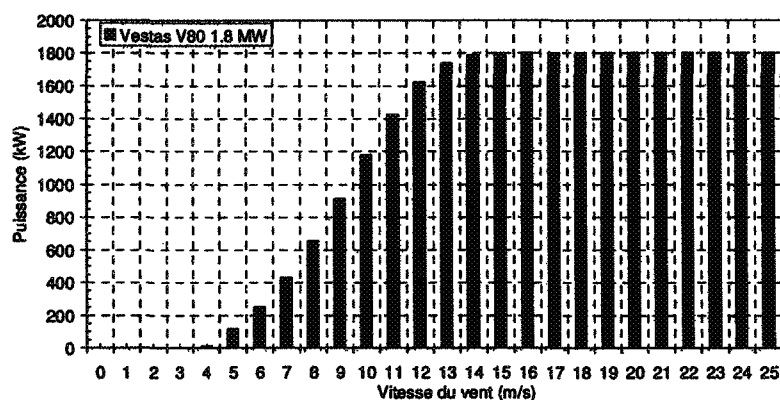


Figure 32 : Puissance de la Vestas V80 1.8 MW pour la classe IEC 2A aux conditions atmosphériques standards

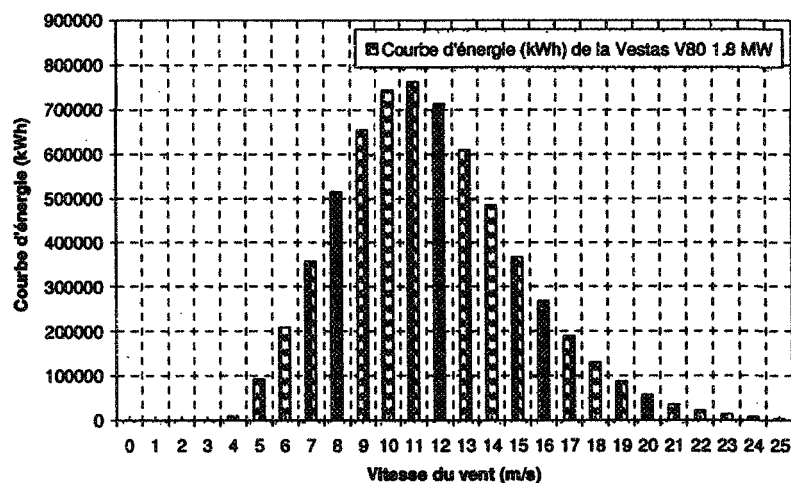


Figure 33 : Courbe d'énergie de la Vestas V80 1.8 MW aux conditions standards de température et de pression atmosphérique

Le Tableau 11 résume la production énergétique annuelle (non corrigée et corrigée) et le facteur d'utilisation de la Vestas V80 1.8 MW. La production énergétique et le facteur d'utilisation de référence sont ceux du RETScreen International.

Tableau 11 : Production d'énergie annuelle de la Vestas V80 1.8 MW

Outils	Production énergétique non corrigée (MWh)	Production énergétique corrigée (MWh)	Facteur d'utilisation (%)
PROICET	6336	6224	39.5
RETScreen	6337	6247	40
E_{rel} (%)	0.02	0.37	1.25

RETScreen, présenté en Annexe D, est un logiciel d'analyse de projets éoliens qui permet d'évaluer la production d'énergie, la viabilité financière et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre et ceci pour des centrales éoliennes raccordées à un réseau isolé ou à un réseau central d'électricité. Ces projets vont des vastes parcs composés

de plusieurs éoliennes jusqu'aux petites éoliennes individuelles. RETScreen est offert en plusieurs langues gratuitement et il peut être utilisé partout à travers le monde [5].

Il est facile de constater, d'après le Tableau 11, que les résultats obtenus par le modèle PROICET concordent quasi-parfaitement, moins de 1.3% de différence, avec les résultats obtenus à l'aide du logiciel RETScreen.

3.7.2. Calcul de la production annuelle du MEG

La Figure 34 présente la puissance du MEG, calculée aux conditions atmosphériques standards à l'aide de PROPID. La Figure 35 montre l'énergie récupérée avec le MEG. Il s'agit de la production énergétique non corrigée qui donne l'énergie produite par l'éolienne dans des conditions standards de température et de pression atmosphérique. Pour obtenir la production énergétique corrigée de l'éolienne, une correction en fonction de la pression atmosphérique, des conditions de température et des pertes des équipements est effectuée comme calculé dans la section 3.7.1.

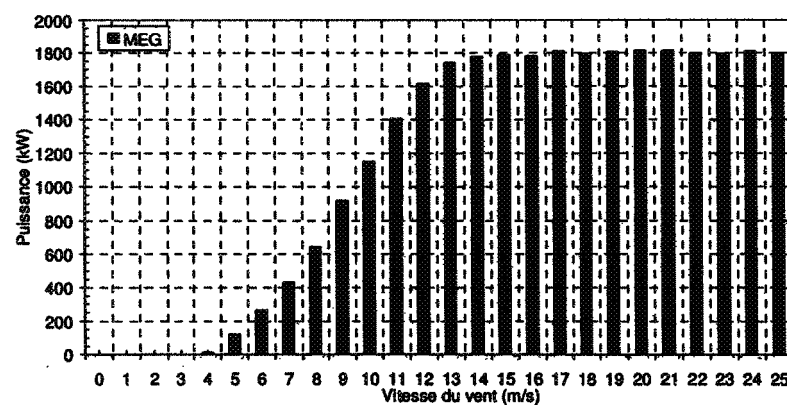


Figure 34 : Puissance du MEG pour la classe IEC 2A aux conditions atmosphériques standards

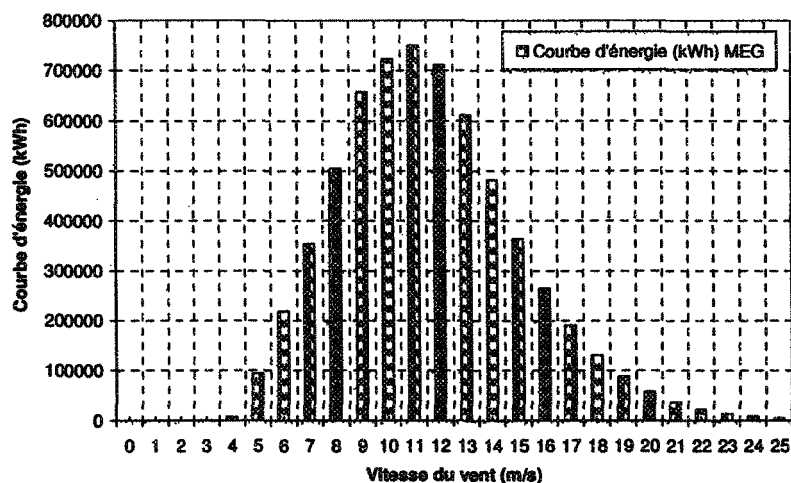


Figure 35 : Courbe d'énergie du MEG aux conditions standards de température et de pression atmosphérique

Le Tableau 12 résume la production énergétique annuelle (non corrigée et corrigée) et le facteur d'utilisation du MEG. La production énergétique et le facteur d'utilisation de référence sont ceux du RETScreen International. Il est facile de constater, d'après le Tableau 12, que les résultats obtenus par notre modèle concordent quasi-parfaitement, avec 0.5% de différence, avec les résultats obtenus à l'aide du logiciel RETScreen.

Tableau 12 : Production d'énergie annuelle du MEG

Outils	Production énergétique non corrigée (MWh)	Production énergétique corrigée (MWh)	Facteur d'utilisation (%)
PROICET	6295	6183	39.2
RETScreen	6296	6206	39
E_{rel} (%)	0.02	0.37	0.51

3.7.3. Validation de PROICET

La production énergétique corrigée du MEG est comparée à la production énergétique corrigée de la Vestas V80 1.8 MW (les valeurs respectives sont illustrées dans les Tableau 11 et Tableau 12). Une différence de 0.7% est obtenue, validant, aux conditions atmosphériques standards, le modèle d'éolienne MEG et le modèle de production annuelle PROICET.

3.8. Conclusion

Dans ce chapitre, il a été démontré que le modèle éolienne générique MEG, développé pour simuler une éolienne Vestas V80 1.8 MW pour une classe du vent IEC 2A, est représentatif de celle-ci. En dépit du fait que certaines caractéristiques de l'éolienne n'étaient pas disponibles, les approximations effectuées concernant notamment la géométrie de la pale, n'ont pas altéré la validation du MEG. Le MEG ainsi que le PROICET ont été validés aux conditions atmosphériques standards avec une erreur relative moyenne de moins de 2% pour la courbe de puissance et une erreur relative de moins de 0.7% pour la production énergétique annuelle corrigée.

CHAPITRE 4

SIMULATION NUMÉRIQUE DE LA COURBE DE PUISSANCE DU MEG ET CALCUL DE SA PRODUCTION ANNUELLE SOUS PRÉCIPITATIONS GIVRANTES

4.1. Introduction

Ce chapitre décrit le calcul de la courbe de puissance du MEG, ainsi que sa production annuelle, lors des précipitations givrantes. La courbe de puissance est obtenue en effectuant les quatre étapes suivantes :

- simulations de givrage réalisées sur un profil aérodynamique NACA 63 415 à l'aide du logiciel CIRALIMA ;
- uniformisation de la surface de glace si nécessaire ;
- calcul des coefficients de portance et de traînée des profils givrés à l'aide du logiciel XFOIL ;
- simulation numérique des courbes de puissance du MEG sous précipitation givrante à l'aide du logiciel PROPID.

Finalement, la production annuelle du MEG dans des conditions givrantes est calculée à l'aide de PROICET.

4.2. Conditions météorologiques au sol

Les simulations numériques sont basées sur des données météorologiques réelles, recueillies lors de la campagne de mesure de 2005-2006, sur le site de l'ancienne Mine

Gaspé de Noranda située dans la ville de Murdochville au Québec [61]. Le site, situé à une altitude de 610 m et cerné sur trois côtés par le fleuve Saint-Laurent [62], dispose d'un fort potentiel éolien (moyenne des vents de 7 à 8 m/s selon la référence [63]) et d'un potentiel élevé de brouillard givrant [62]. D'après les campagnes de mesure de 2004-2005 et 2005-2006, 13 à 16 évènements de brouillard givrant se sont produit durant chaque hiver ([58], [61], [62]). Ce site est considéré comme un exemple représentatif de la sévérité du climat nordique en altitude sur les éoliennes.

Selon les données mesurées à Murdochville [61], la température moyenne annuelle est de -0.1°C , la pression moyenne annuelle est de 94.26 kPa et la vitesse moyenne annuelle du vent au niveau de la station météorologique est de 6.33 m/s.

Le Tableau 13 présente le nombre d'évènements givrants, enregistré lors des campagnes de mesure à Murdochville de 2005-2006 [61], par mois avec ses caractéristiques de valeurs moyennes : la teneur en eau liquide LWC (g/m^3), le diamètre volumétrique médian MVD (μm) des gouttelettes d'eau en surfusion, la vitesse du vent V_{∞} (m/s), la température de l'air T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$) et la durée de la précipitation givrant t (h).

Tableau 13 : Caractéristiques des brouillards givrants à Murdochville en 2005-2006

Brouillard	Mois	Nombre	LWC (g/m^3)	MVD (μm)	V_{∞} (m/s)	T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)	t (h)
1	01	5	0.050	18.1	4	-8	11.7
2	02	2	0.041	15.5	8.1	-6	3
3	03	3	0.067	19.5	4.4	-4	7.4
4	11	4	0.055	18.7	8.2	-2	3
5	12	2	0.018	21.1	5.5	-2	10.4

Les valeurs moyennes de MVD , V_{∞} , T_{∞} et t ont été idéalisées pour chaque mois afin de réduire le nombre de cas à simuler. La teneur en eau liquide idéalisée a été calculée à l'aide du nombre adimensionnel d'accumulation, défini par $A_c = LWC \cdot V \cdot t / \rho_{glace} \cdot c$ selon la référence [64]. Ce paramètre a été utilisé pour la mise à l'échelle des événements givrants. Les valeurs de la vitesse du vent ont été obtenues en effectuant une corrélation linéaire entre la station de mesure et le parc éolien permettant de passer à une vitesse moyenne de 8 m/s qui donne un facteur d'utilisation de 40% pour le site étudié selon la référence [65]. Après avoir apporté ces corrections, dans le but d'avoir le même LWC , MVD et V_{∞} pour les 5 mois givrants, les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 14. Il s'agit de cas équivalents en termes d'accumulation de glace.

Tableau 14 : Caractéristiques des brouillards givrants équivalents

Brouillard	Mois	Nombre	LWC (g/m ³)	MVD (μm)	V_{∞} (m/s)	T_{∞} (°C)	t (h)
1	01	5	0.05	20.0	8	-8	6.0
2	02	2	0.05	20.0	8	-6	3
3	03	3	0.05	20.0	8	-4	5.0
4	11	4	0.05	20.0	8	-2	4
5	12	2	0.05	20.0	8	-2	2.5

La température pour les brouillards 1 et 3 a été ramenée à -6°C. La durée du brouillard 2 a été corrigée à 6h et le nombre de répétition à 1 au lieu de 2. La durée du brouillard givrant 5 a été ramenée à 4h et le nombre de répétition à 1 au lieu de 2. Les caractéristiques idéalisées des brouillards givrants sont présentés au Tableau 15. Seulement deux conditions givrantes sont retenues pour la simulation.

Tableau 15 : Caractéristiques des brouillards givrants équivalents corrigées

Brouillard	Mois	Nombre	LWC (g/m ³)	MVD (μm)	V _∞ (m/s)	T _∞ (°C)	t (h)
1	01	5	0.05	20	8	-6	6
2	02	1	0.05	20	8	-6	6
3	03	3	0.05	20	8	-6	6
4	11	4	0.05	20	8	-2	4
5	12	1	0.05	20	8	-2	4

Il faut noter que les cas idéalisés, présentés au Tableau 15, sont des événements givrants de Murdochville représentatifs de la masse de givre accumulée, mais peuvent avoir une certaine différence avec le régime d'accrétion et la forme de glace, car seulement le paramètre d'accrétion a été utilisé dans le calcul.

4.3. Conditions atmosphériques de givre

Les simulations numériques de givrage reproduisent deux conditions de précipitation givrantes, présentées au Tableau 15 de la section 4.2 sur le profil NACA 63 415. Ils sont caractérisés par la teneur en eau liquide *LWC*, le diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau en surfusion *MVD*, la vitesse du vent *V_∞*, la température de l'air *T_∞*, ainsi que par la durée *t* de l'évènement.

Les simulations sont réalisées à cinq positions radiales distinctes sur la pale, soit 8.5 m, 15.5 m, 22.5 m, 29.5 et 36.5 m. Chacune des simulations est caractérisée par deux paramètres importants qui sont la vitesse et l'angle d'attaque relatif. Pour calculer ces paramètres, la géométrie du rotor de l'éolienne, modélisée dans la section 3.3, est utilisée. Les conditions pour les 10 simulations sont présentées au Tableau 16. Elles sont caractérisées par la position radiale *r*, la corde du profil *c*, son épaisseur maximale *e_{max}*,

l'angle d'attaque α , la teneur en eau liquide LWC , le diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau en surfusion MVD , la vitesse relative V_{rel} , la température de l'air T_{∞} et la durée t de l'évènement.

Tableau 16 : Paramètres des simulations numériques du givrage

Simulation	Condition	r (m)	c (m)	e_{max} (m)	α (deg)	LWC (g/m^3)	MVD (μm)	V_{rel} (m/s)	T_{∞} ($^{\circ}C$)	t (s)
1	1	8.5	3.216	0.48	6	0.05	20	15.5	-6	21600
2	1	15.5	2.608	0.39	6	0.05	20	25.8	-6	21600
3	1	22.5	2.000	0.30	6	0.05	20	36.6	-6	21600
4	1	29.5	1.393	0.21	6	0.05	20	47.6	-6	21600
5	1	36.5	0.784	0.12	6	0.05	20	58.6	-6	21600
6	2	8.5	3.216	0.48	6	0.05	20	15.5	-2	14400
7	2	15.5	2.608	0.39	6	0.05	20	25.8	-2	14400
8	2	22.5	2.000	0.30	6	0.05	20	36.6	-2	14400
9	2	29.5	1.393	0.21	6	0.05	20	47.6	-2	14400
10	2	36.5	0.784	0.12	6	0.05	20	58.6	-2	14400

4.4. Température de $-6^{\circ}C$

4.4.1. Calcul des formes de glace

Les profils givrés pour la température de $-6^{\circ}C$, à cinq positions radiales sur la pale du MEG, sont obtenus à l'aide du logiciel CIRALIMA. Les formes des profils givrés sont présentées à la Figure 36. Le type de glace obtenu pour les cinq cas est le givre qui se caractérise par une fraction solide égale à 1 et une température de surface inférieure à $0^{\circ}C$.

La vitesse est un des paramètres qui caractérise la formation de glace sur un objet et plus elle augmente, plus la quantité de glace accrétée augmente (Tableau 17 et Figure 36).

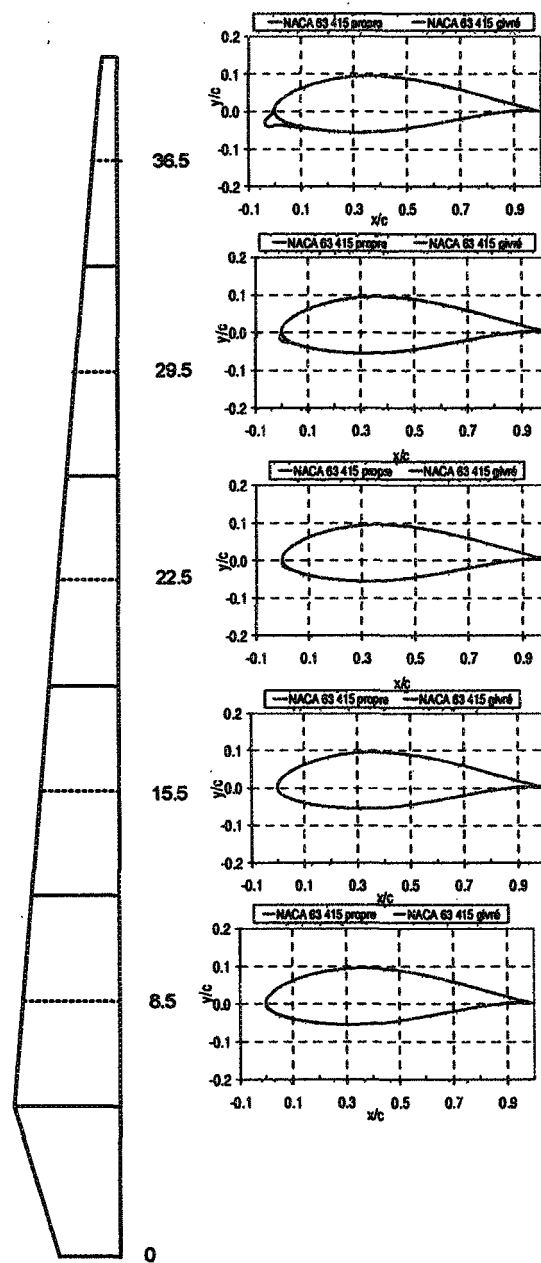


Figure 36 : Profils givrés pour la température de -6°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG

Étant donné que la teneur en eau liquide est faible et considérée comme trace, la quantité de glace accumulée est faible et varie de 0.24 kg/m pour la position radiale proche du moyeu de 8.5 m à 1.33 kg/m en bout de pale (position de 36.5 m).

Tableau 17 : Masse de glace accumulée pour cinq positions radiales sur la pale du MEG à la température de -6°C

r (m)	V_{rel} (m/s)	LWC (g/m ³)	MVD (μm)	T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)	t (h)	Masse de glace accumulée (kg/m)
8.5	15.5	0.05	20	-6	6	0.235
15.5	25.8	0.05	20	-6	6	0.272
22.5	36.6	0.05	20	-6	6	0.560
29.5	47.6	0.05	20	-6	6	0.958
36.5	58.6	0.05	20	-6	6	1.332

4.4.2. Calcul des coefficients de portance et de traînée

Les coefficients de portance et de traînée, pour les cinq profils givrés à la température de -6°C , sont obtenus à l'aide du logiciel XFOIL et sont présentés à la Figure 37 où ils sont comparés aux coefficients pour les profils propres. Il est à noter que l'utilisation de XFOIL pour calculer les caractéristiques aérodynamiques des profils givrés a été faite sous toute réserve. En effet, la méthode des panneaux utilisée comme modèle numérique par XFOIL n'est pas la plus appropriée pour la simulation des écoulements avec des larges zones de séparation comme c'est le cas pour les profils givrés. Des pertes de performance aérodynamique sont quand même constatées avec le modèle utilisé. Les coefficients de portance et de traînée des profils givrés suivent ceux des profils propres pour des petits angles d'attaque (Figure 37).

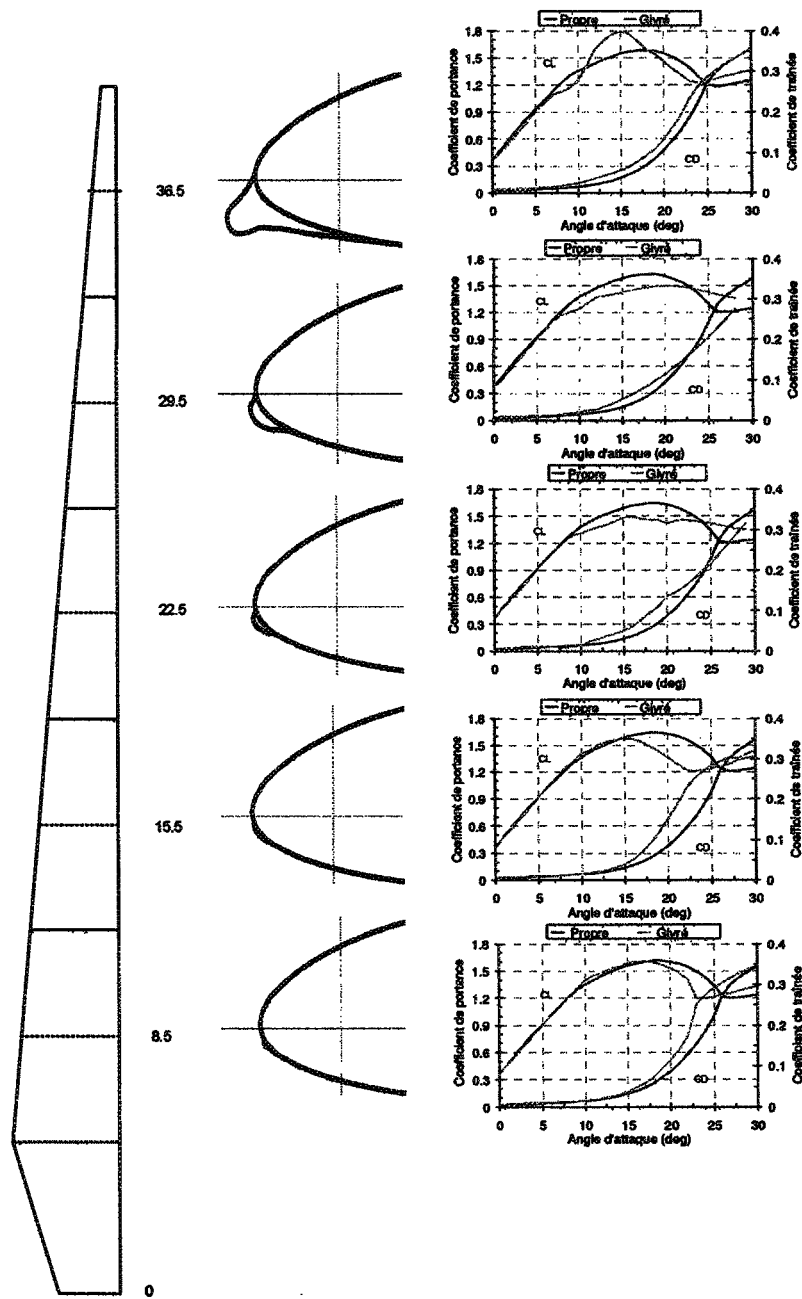


Figure 37 : Coefficients de portance et de traînée pour la température de -6°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG

Les pertes du coefficient de portance apparaissent à partir des angles d'attaque de 7° à 10° (Figure 37), selon la position radiale sur la pale, mais ne dépassent pas 22 % (Figure 38). L'augmentation du coefficient de traînée apparaît à partir des angles d'attaque de 7° à 12° (Figure 37), selon la position radiale sur la pale, et ne dépassent pas 120 % (Figure 39). Pour un angle d'attaque entre 10° et 15° (Figure 37) les coefficients de portance pour les profils givrés, situés aux positions radiales de 8.5 m et 15.5 m, sont légèrement supérieurs à ceux des profils propres. Étant donné que ces profils se situent proche du moyeu, leur impact sur la puissance sera minime, comme montré dans la section 3.3.6. Pour un angle d'attaque entre 11° et 17° (Figure 37), le coefficient de portance pour le profil givré à 36.5 m (en bout de pale) est supérieur à celui du profil propre. Ce résultat ainsi que les résultats cités ci-dessus ne sont pas réalistes et confirment que XFOIL ne donne pas des résultats fiables quand les zones de séparation de l'écoulement sont importantes. Même s'il y a des résultats disponibles dans la littérature, comme les résultats expérimentaux de la référence [32] (Figure 9 de la section 1.4.4.1), qui montrent le même type de comportement, les résultats obtenus avec XFOIL ont un degré d'incertitude et il est recommandé de remplacer le logiciel XFOIL par un autre.

Le décrochage pour les profils givrés apparaît bien avant le décrochage pour les profils propres (Figure 37). Par exemple, l'angle de décrochage pour le profil givré, situé à 15.5 m, est de 15° , bien avant l'angle de décrochage pour le profil propre qui est de 20° . Ceci est dû à la forme des profils aérodynamiques modifiés par la glace accumulée. Étant donné que XFOIL utilise la méthode des panneaux et cette méthode ne tient pas compte de la turbulence et de la rugosité de surface [21], la rugosité de surface n'a pas été considérée

lors de calcul des coefficients de portance et de traînée. Ceci surévalue le coefficient de portance et sous-évalue le coefficient de traînée.

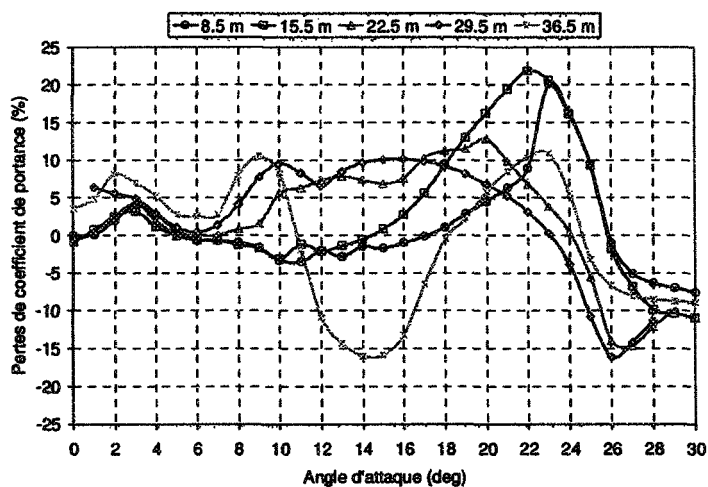


Figure 38 : Pertes du coefficient de portance pour la température de -6°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG

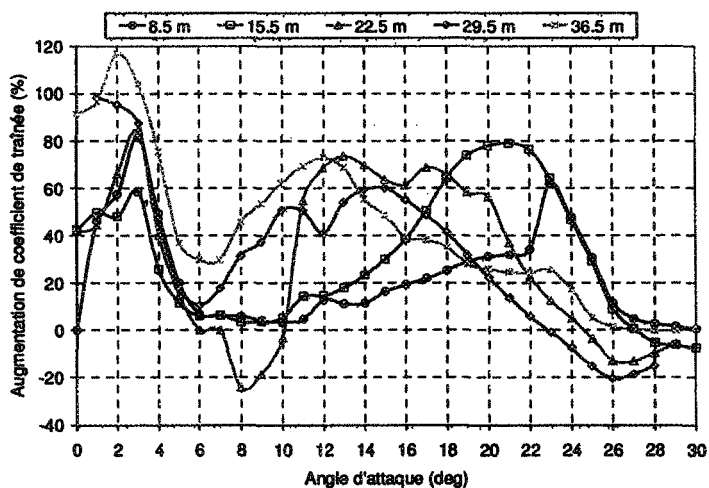


Figure 39 : Augmentations du coefficient de traînée pour la température de -6°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG

Il est important de souligner l'incapacité de XFOIL à traiter adéquatement ces profils givrés surtout quand il y a de larges zones de séparation. À partir de ce point les résultats

obtenus sont un ordre de grandeur des vrais résultats et sous estime leur valeur; ils servent uniquement à appliquer la procédure du calcul de PROICET.

4.4.3. Calcul de la courbe de puissance

Les courbes de puissance du MEG givré à la température de -6°C et en fonction de l'angle de calage sont obtenues à l'aide de PROPID et sont présentées à la Figure 40. Après application de la stratégie de contrôle de l'angle de calage du MEG, présentée au Tableau 31 de l'Annexe F, la courbe de puissance obtenue est présentée à la Figure 41.

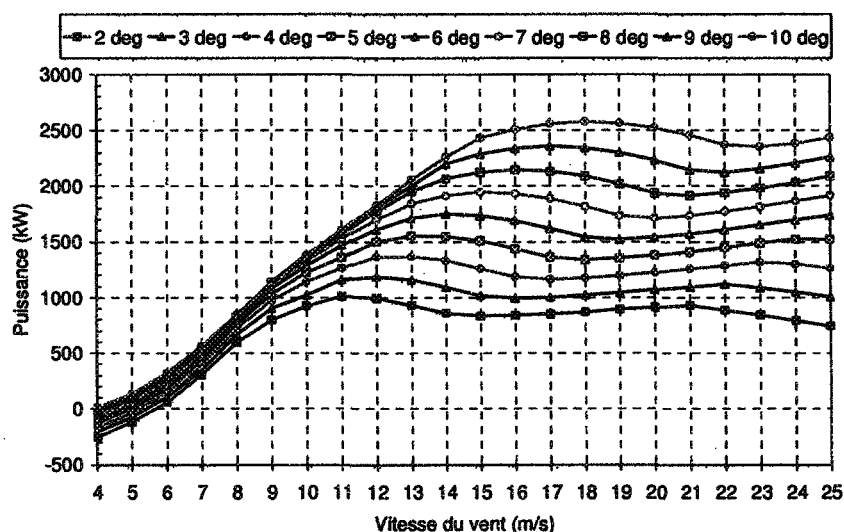


Figure 40 : Courbe de puissance du MEG en fonction de l'angle de calage à la température de -6°C

Cette courbe de puissance simulée est comparée à la courbe de puissance théorique. Les pertes de puissance obtenues sont de 9 % à 4 m/s (Figure 42), soit la vitesse de démarrage de l'éolienne MEG. Pour des vitesses de vent de 5 m/s à 25 m/s les pertes de puissance du MEG sont faibles et ne dépassent pas 1 %. Il est à noter que ces résultats sont basés sur les valeurs des coefficients de portance et de traînée des profils givrés obtenus

avec XFOIL dans la section 4.4.2 et comme expliqué plus tôt la diminution du coefficient de portance et l'augmentation du coefficient de traînée sont sous-évaluées.

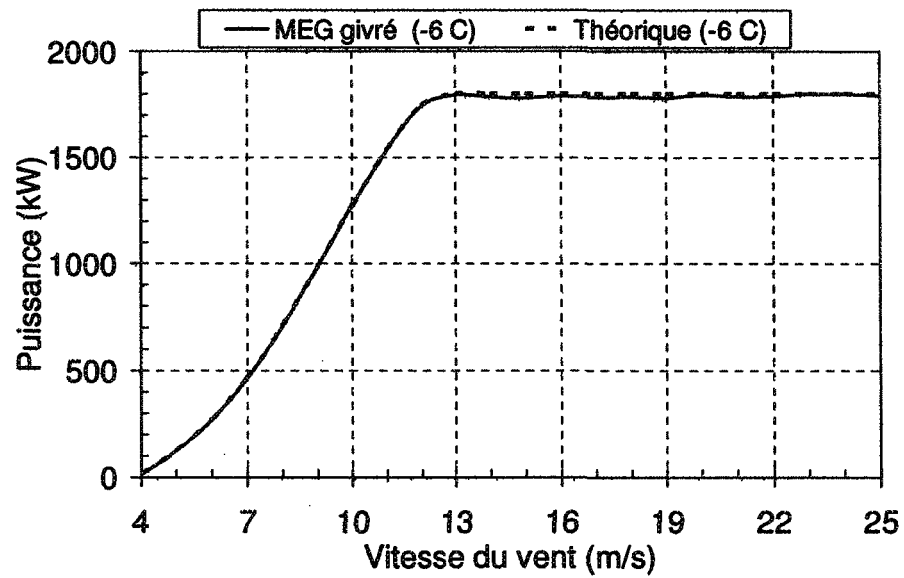


Figure 41 : Courbe de puissance du MEG à la température de -6°C

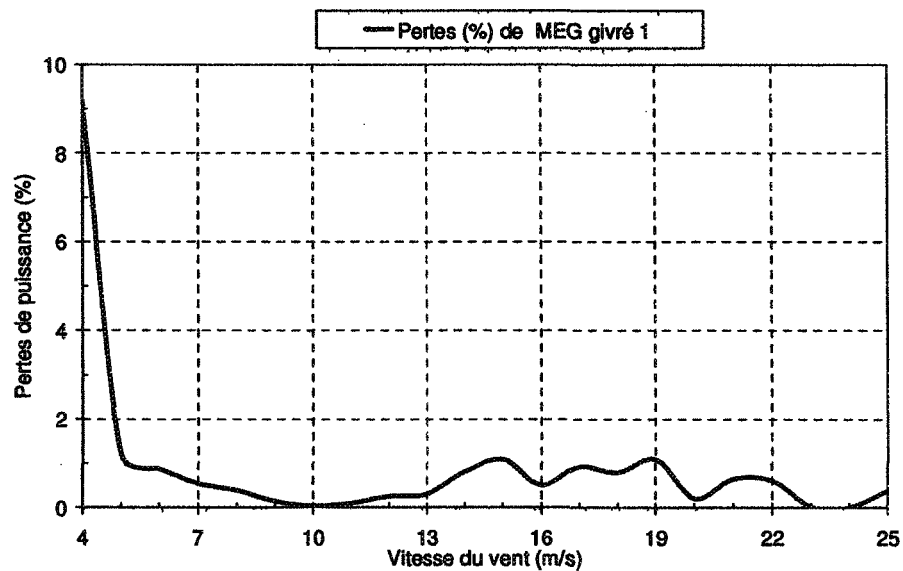


Figure 42 : Pertes de puissance du MEG à la température de -6°C

4.5. Température de -2°C

4.5.1. Calcul des formes de glace

Les profils givrés pour la température de -2°C , à cinq positions radiales sur la pale du MEG, sont obtenus à l'aide du logiciel CIRALIMA. Les formes des profils givrés sont présentées à la Figure 43. Le type de glace obtenu pour les positions radiales de 8.5 m et 15.5 m est le givre. Pour les trois positions restantes il y a mélange entre le givre et le verglas (régime mixte). Le givre est caractérisé par une fraction solide égale à 1 et une température de surface inférieure à 0°C . Le verglas est caractérisé par une fraction solide comprise entre 0 et 1 et une température de surface égale à 0°C .

Plus la vitesse augmente, plus la quantité de glace accrétée augmente (Tableau 18 et Figure 43). Étant donné que la teneur en eau liquide est faible, la quantité de glace accumulée est faible et varie de 0.09 kg/m pour la position radiale proche du moyeu de 8.5 m à 0.77 kg/m en bout de pale (position de 36.5 m).

Tableau 18 : Masse de glace accumulée pour cinq positions radiales sur la pale du MEG à la température de -2°C

r (m)	V_{rel} (m/s)	LWC (g/m ³)	MVD (μm)	T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)	t (h)	Masse de glace accumulée (kg/m)
8.5	15.5	0.05	20	-2	4	0.091
15.5	25.8	0.05	20	-2	4	0.190
22.5	36.6	0.05	20	-2	4	0.347
29.5	47.6	0.05	20	-2	4	0.633
36.5	58.6	0.05	20	-2	4	0.768

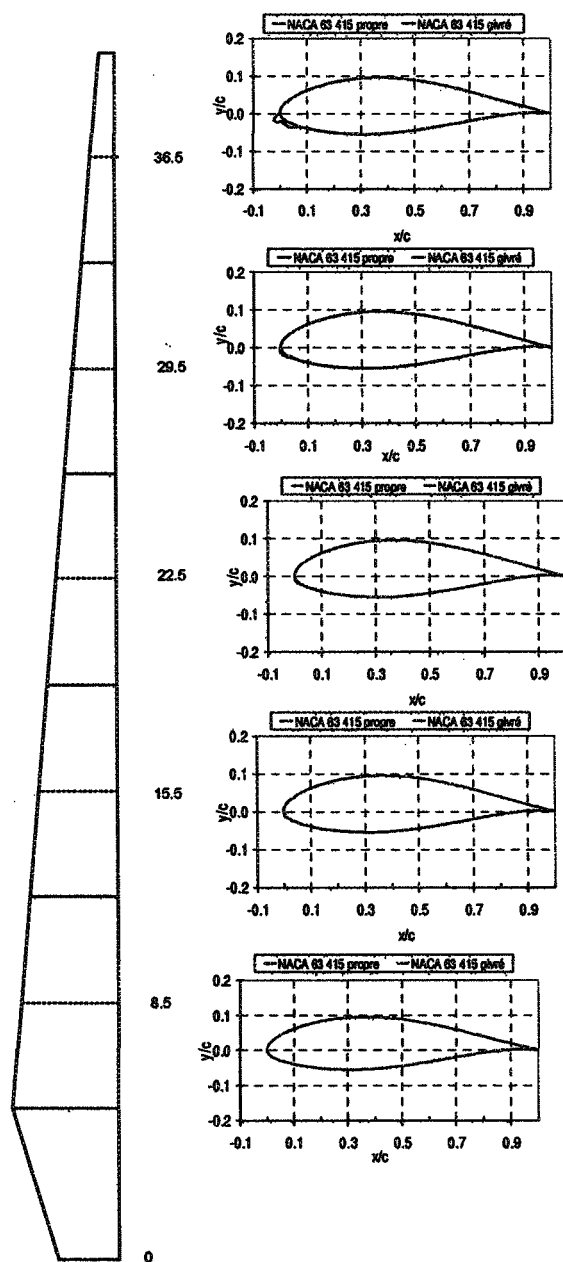


Figure 43 : Profils givrés pour la température de -2°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG

La masse de glace accumulée à la température de -2°C est inférieure à celle accumulée à la température de -6°C . Ceci est dû à la durée de l'évènement givrant : plus l'évènement givrant est long, plus de glace s'accumule sur les pales (Tableau 17 et Tableau 18).

4.5.2. Uniformisation de la surface de glace

La forme de glace du profil givré à la position radiale de 36.5 m contient des discontinuités de la courbure au bord d'attaque qui cause des grands angles entre les panneaux et par conséquent les calculs de XFOIL ne convergent pas (section 2.4.4). Ceci est corrigé par un très fin lissage du bord d'attaque (Figure 44). Le nombre de points et le nombre des panneaux sont également augmentés dans cette zone à l'aide de XFOIL.

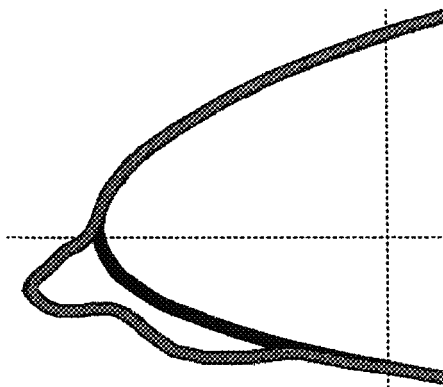


Figure 44 : Lissage du bord d'attaque du profil givré à la position radiale de 36.5 m et à la température de -2°C

4.5.3. Calcul des coefficients de portance et de traînée

Les coefficients de portance et de traînée, pour les cinq profils givrés à la température de -2°C , sont obtenus à l'aide du logiciel XFOIL et sont présentés à la Figure 45 où ils sont

comparés aux coefficients pour les profils propres. Comme noté dans la section 4.4.2, l'utilisation de XFOIL pour calculer les caractéristiques aérodynamiques des profils givrés a été faite sous toute réserve. La méthode des panneaux utilisée comme modèle numérique par XFOIL n'est pas la plus appropriée pour la simulation des écoulements avec des larges zones de séparation comme c'est le cas pour les profils givrés. Des pertes de performance aérodynamique sont quand même constatées avec le modèle utilisé. Les coefficients de portance et de traînée des profils givrés suivent ceux des profils propres pour des petits angles d'attaque. Les pertes du coefficient de portance apparaissent à partir des angles d'attaque de 12° à 15° (Figure 45), selon la position radiale sur la pale, mais ne dépassent pas 30 % (Figure 46). L'augmentation du coefficient de traînée apparaît à partir des angles d'attaque de 7° à 16° (Figure 45), selon la position radiale sur la pale, et ne dépassent pas 140 % (Figure 47). Pour un angle d'attaque entre 12° et 18° (Figure 45) les coefficients de portance pour le profil givré, situé à la position radiale de 8.5 m, sont légèrement supérieurs à ceux du profil propre. Étant donné que ce profil se situe proche du moyeu, son impact sur la puissance sera minime, comme montré dans la section 3.3.6. Pour un angle d'attaque entre 10° et 15° (Figure 45), le coefficient de portance pour le profil givré à 36.5 m (en bout de pale) est supérieur à celui du profil propre. Ce résultat ainsi que le résultat cité ci-dessus ne sont pas réalistes et confirment que XFOIL ne donne pas des résultats fiables quand les zones de séparation de l'écoulement sont importantes. Même s'il y a des résultats disponibles dans la littérature, comme les résultats expérimentaux de la référence [32] (Figure 9 de la section 1.4.4.1), qui montrent le même type de comportement, les résultats

obtenus avec XFOIL ont un degré d'incertitude et il est recommandé de remplacer le logiciel XFOIL par un autre.

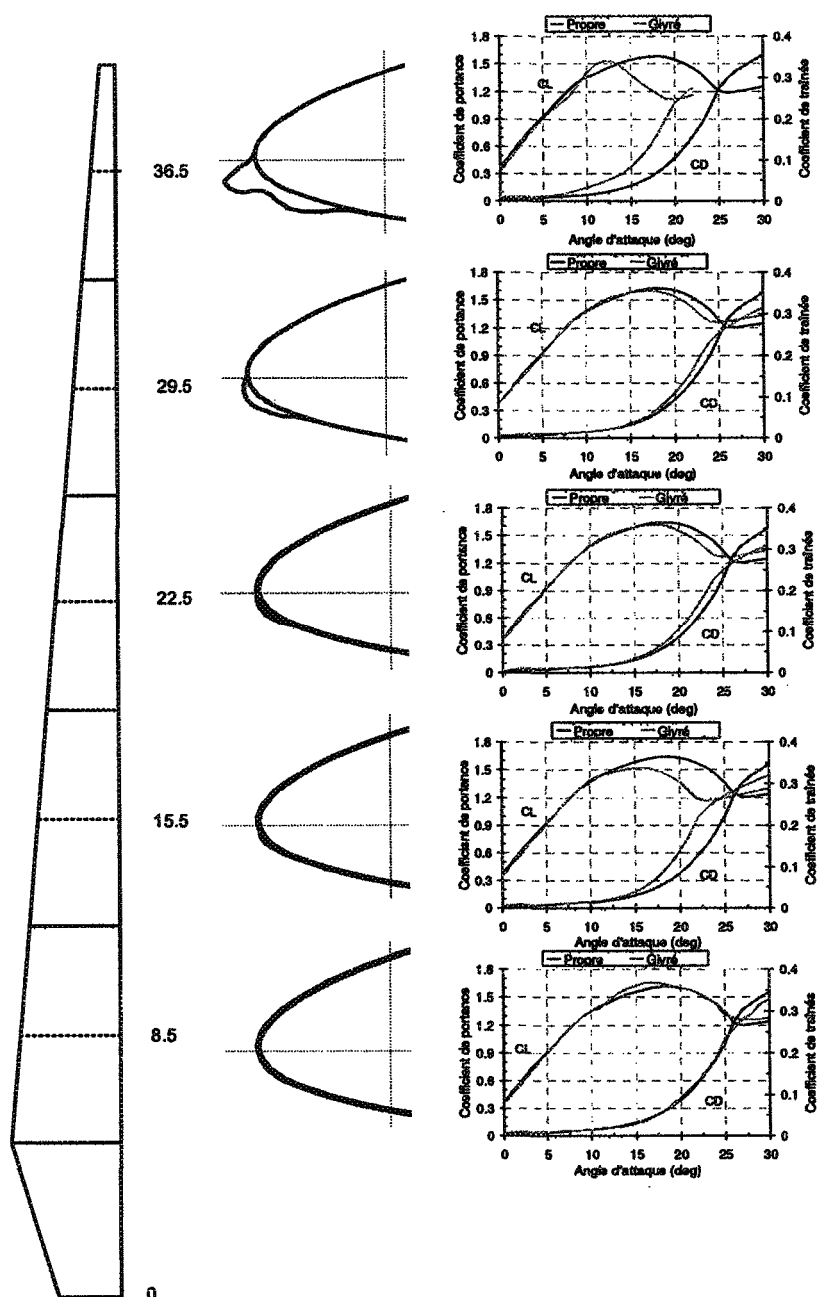


Figure 45 : Coefficients de portance et de traînée pour la température de -2°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG

Le décrochage pour les profils givrés apparaît bien avant le décrochage pour les profils propres (Figure 45). Par exemple, l'angle de décrochage pour le profil givré, situé à 15.5 m, est de 15° , bien avant l'angle de décrochage pour le profil propre qui est de 18° . Ceci est dû à la forme des profils aérodynamiques modifiés par la glace accumulée. La rugosité de surface n'est pas considérée dans XFOIL comme mentionné dans la section 4.4.2 ce qui surévalue le coefficient de portance et sous-évalue le coefficient de traînée. Il est important de souligner, comme dans la section 4.4.2, l'incapacité de XFOIL à traiter adéquatement ces profils givrés surtout quand il y a de larges zones de séparation. À partir de ce point les résultats obtenus sont un ordre de grandeur des vrais résultats et sous estime leur valeur ; ils servent uniquement à appliquer la procédure du calcul de PROICET.

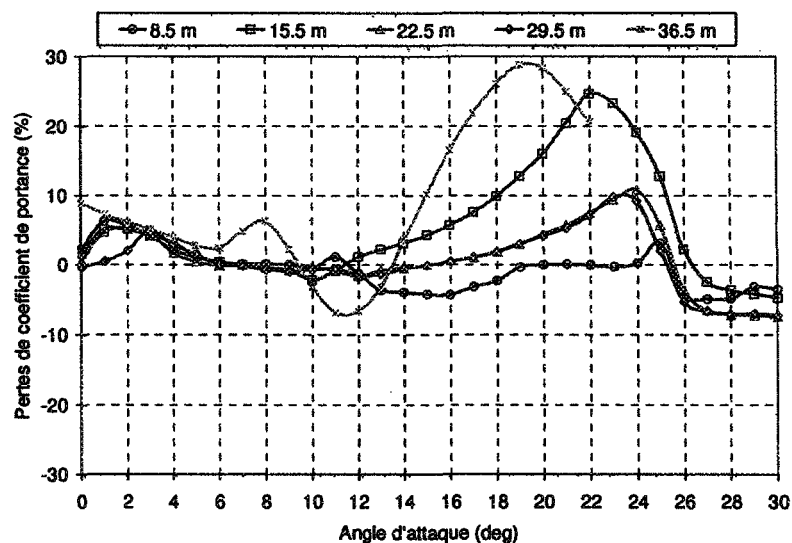


Figure 46 : Pertes du coefficient de portance pour la température de -2°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG

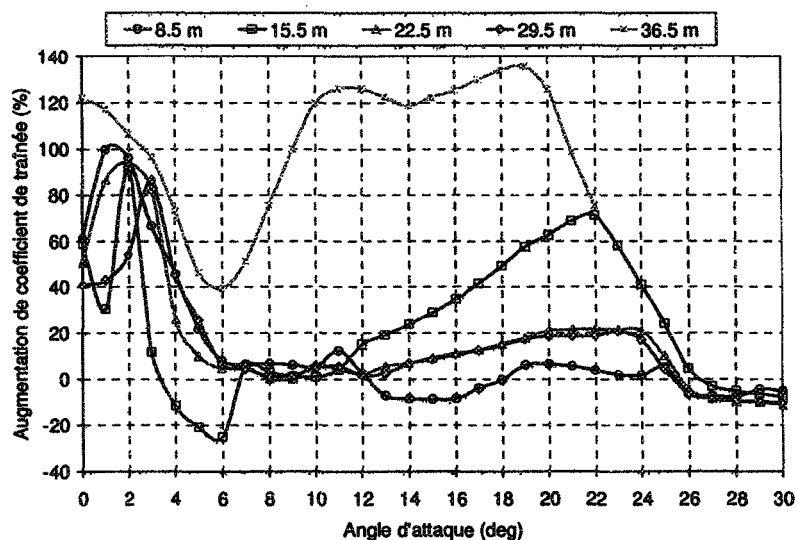


Figure 47 : Augmentations du coefficient de traînée pour la température de -2°C à cinq positions radiales sur la pale du MEG

4.5.4. Calcul de la courbe de puissance

Les courbes de puissance du MEG givré à la température de -2°C et en fonction de l'angle de calage sont obtenues à l'aide de PROPID et sont présentées à la Figure 48. Après application de la stratégie de contrôle de l'angle de calage du MEG, présentée au Tableau 31 de l'Annexe F la courbe de puissance obtenue est présentée à la Figure 49. Cette courbe de puissance simulée est comparée à la courbe de puissance théorique. Les pertes de puissance obtenues sont de 13 % à 4 m/s (Figure 50), soit la vitesse de démarrage de l'éolienne. Pour des vitesses de vent de 5 m/s à 12 m/s les pertes ne dépassent pas 0.5 %. Pour les grandes vitesses de vent (de 15 m/s à 25 m/s) les pertes de puissance sont d'environ 3.4 % (Figure 50). Étant donné que la vitesse moyenne pour le site choisi est de 8 m/s (section 4.2) et que l'éolienne fonctionne souvent dans l'intervalle des vitesses de

vents de 5 m/s à 12 m/s, les pertes de puissance du MEG inférieures à 0.5 %, sont faibles, voire presque négligeables. Il est à noter, comme dans la section 4.4.3, que ces résultats sont basés sur les valeurs des coefficients de portance et de traînée des profils givrés obtenus avec XFOIL dans la section 4.5.3 et comme expliqué plus tôt la diminution du coefficient de portance et l'augmentation du coefficient de traînée sont sous-évaluées.

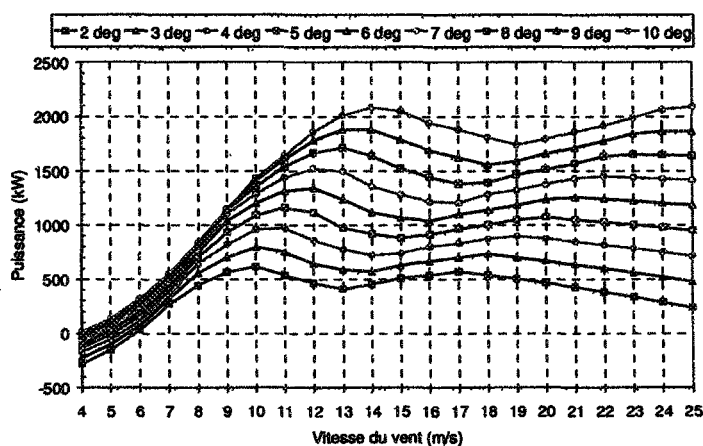


Figure 48 : Courbe de puissance du MEG en fonction de l'angle de calage à la température de -2°C

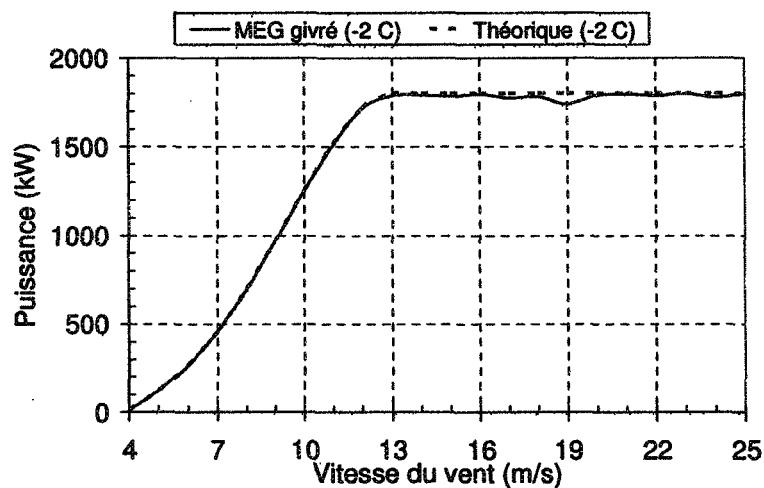


Figure 49 : Courbe de puissance du MEG à la température de -2°C

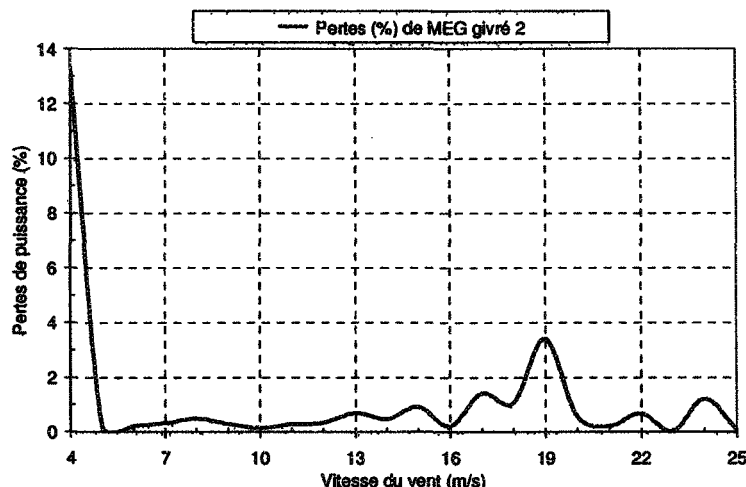


Figure 50 : Pertes de puissance du MEG à la température de -2°C

4.6. Calcul de la production annuelle du MEG sous précipitations givrantes

La production annuelle (production annuelle non corrigée), sous précipitations givrantes, est calculée à partir des courbes de puissance, obtenues dans les sections 4.4.3 4.5.4 et 4.6, de la fonction de densité de probabilité de Weibull (Figure 31 de la section 3.7.1) et le nombre d'heures givrantes par année ainsi que leur fréquence (Tableau 15 de la section 4.2). Cette production est corrigée en fonction de la pression atmosphérique et des conditions de température. Les pertes des équipements ne sont pas considérées.

La production annuelle non corrigée, sous précipitations givrantes, est calculée avec l'équation (4-1) pour le MEG propre et le MEG givré. Pour le MEG propre, elle est obtenue à partir de la densité de Weibull pour la vitesse moyenne annuelle du site, de la courbe de puissance à la température moyenne annuelle du site et le nombre d'heures par année où il n'y a pas de givrage (y dans l'équation (4-2) représente le nombre d'heures total de givrage). Pour le MEG givré, elle est obtenue en tenant compte que les deux événements

givrants, qui ont été simulés numériquement, se sont produits à 8 m/s, et en tenant compte de la fréquence et de la durée de ces deux événements (Tableau 15) ainsi que du nombre d'heures (x dans les équations (4-1) et (4-2)) de présence de la glace sur les pales du MEG avant de disparaître.

$$E_{V_{m_{ice}}} = (8760 - y) \sum_{V=4}^{25} P_{Clean}^{T_{moy}^{annuelle}} f(V_{moy}^{annuelle}) + \{(((6+x) + (6+x)*5 + (6+x)*3)P_{Ice}^{-6} + ((4+x) + (4+x)*4)P_{Ice}^{-2})\}_{V=8m/s} \quad (4-1)$$

$$T_{moy}^{annuelle} = -0.1 \text{ C}$$

$$V_{moy}^{annuelle} = 8 \text{ m/s}$$

$$y = (6+x) + (6+x)*5 + (6+x)*3 + (4+x) + (4+x)*4 \quad (4-2)$$

Étant donné que la puissance dépend principalement de la vitesse du vent (elle est légèrement affectée par la densité de l'air (équation (2-1))) et que le coefficient de puissance varie légèrement avec la température (Annexe B), la courbe de puissance pour la température moyenne annuelle du site de -0.1°C , pour le MEG propre, est calculée avec l'équation (2-1) et présentée à la Figure 51.

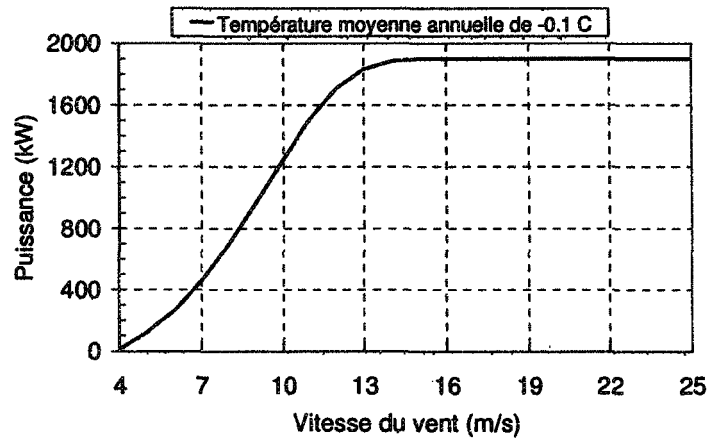


Figure 51 : Courbe de puissance théorique à la température moyenne annuelle de -0.1°C

Les courbes de puissance pour les températures de -2°C et -6°C , pour le MEG givré, sont obtenues à partir des logiciels CIRALIMA (profils givrés), XFOIL (coefficients de portance et de traînée) et PROPID (courbe de puissance suivie de l'application de la stratégie de contrôle de l'angle de calage du MEG présentée au Tableau 31 de l'Annexe F).

La production annuelle du MEG, corrigée en fonction de la pression atmosphérique et des conditions de température, est calculée avec l'équation (4-3).

$$E_C = E_{V_m-Ice} C_H C_T C_I \quad (4-3)$$

où $C_H = p/p_0 = 94.26 \text{ kPa}/101.3 \text{ kPa} = 0.93$ (voir section 4.2);

$C_T = T_0/T = 288.1 \text{ K}/(-0.1C + 273) \text{ K} = 1.055$ (voir section 4.2);

$C_I = 1$ (Il a été considéré qu'il n'y a pas des pertes des équipements).

La production annuelle (non corrigée et corrigée) du MEG sous précipitations givrantes, ainsi que le facteur d'utilisation, sont répertoriés dans le Tableau 19. Trois cas sont présentés. Pour les trois cas les événements givrants durent 74h et la glace disparaît soit immédiatement après le givrage, soit elle reste sur les pales un ou deux jours après le givrage. La production annuelle est comparée à la production annuelle du MEG lorsqu'il n'y a pas de glace sur les pales (équation (4-4)) et à la production annuelle lorsque l'éolienne est en arrêt pendant des heures givrantes et les heures de présence de glace sur les pales du MEG (équation (4-5)).

$$E_{V_m-Clean} = (8760) \sum_{V=4}^{25} P_{Clean}^{T_{moy}^{annuelle}} f(V_{moy}^{annuelle}) \quad (4-4)$$

$$E_{V_m-Stop} = (8760 - y) \sum_{V=4}^{25} P_{Clean}^{T_{moy}^{annuelle}} f(V_{moy}^{annuelle}) \quad (4-5)$$

Tableau 19 : Production d'énergie annuelle du MEG sous précipitation givrante

PROICET	Nombre d'heures (h) de présence de la glace avant disparition : x	Nombre d'heures (h) total de givrage : y	Production énergétique non corrigée (MWh)	Production énergétique corrigée (MWh)	Facteur d'utilisation (%)
Éolienne propre	-	-	6691	6573	41.68
Éolienne givrée_1	0	74	6686	6568	41.66
Éolienne en arrêt_1			6634	6517	41.33
E _{rel_propre_1} (%)			0.07	0.07	0.05
E _{rel_arret_1} (%)			0.78	0.78	0.8
Éolienne givrée_2	24	410	6666	6548	41.53
Éolienne en arrêt_2			6378	6265	39.73
E _{rel_propre_2} (%)			0.38	0.38	0.36
E _{rel_arret_2} (%)			4.51	4.51	4.53
Éolienne givrée_3	48	746	6645	6527	41.4
Éolienne en arrêt_3			6121	6013	38.13
E _{rel_propre_3} (%)			0.69	0.69	0.67
E _{rel_arret_3} (%)			8.56	8.56	8.58

Lorsque l'éolienne MEG est en arrêt lors de givrage et lors de présence de glace sur les pales (Tableau 19), les pertes sont moins de 0.8 % pour seulement 74h de givrage et une disparition immédiate de la glace après le givrage, de 4.5 % lorsque la glace est présente un jour après le givrage, et de 9 % lorsque la glace est présente deux jours après le givrage.

Les baisses de production sont faibles pour les trois cas et les pertes par rapport au MEG propre ne dépassent pas 1 % (Tableau 19). Les pertes calculées sont moins de 0.1 % pour seulement 74h de givrage et une disparition immédiate de la glace après le givrage, de 0.4 % lorsque la glace est présente un jour après le givrage, et de 0.7 % lorsque la glace est présente deux jours après le givrage. Les pertes de production sont insignifiantes et sont dues aux conditions non sévères de givrage (*LWC* est considéré comme trace) et au faible nombre d'heures de givrage (74h) qui ont conduit à une faible quantité de glace accumulée sur les pales du MEG (1.33 kg/m au maximum). Les résultats de la littérature des références [13], [17] et [33], présentés aux sections 1.1.3 et 1.5.6. du chapitre 1 (voir Tableau 1 et Figure 14), ont montrés que lorsque l'événement givrant est court et non sévère, les pertes annuelles sont insignifiantes. Donc les résultats issus de PROICET sont dans le même ordre de grandeur que ceux disponibles dans la littérature. Ceci permet de confirmer le bon fonctionnement de PROICET lors de givrage léger. Par contre les résultats de modèle PROICET ne permettent pas de conclure que les pertes du site de Murdochville sont insignifiantes, car les conditions de givrage, simulées numériquement, sont basées sur des mesures en altitude de 14.63 m [62], qui est inférieur à l'altitude à la quelle les éoliennes sont installées. Pour avoir les vraies pertes pour ce site il est nécessaire de simuler les vraies conditions givrantes qui sont beaucoup plus sévères que celles simulées numériquement.

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, il a été présenté les conditions atmosphériques de givrage, ainsi que les résultats des simulations numériques concernant les formes givrées, les coefficients de portance et de traînée pour les profils givrés, les courbes de puissance de l'éolienne MEG givrée et la production annuelle du MEG lors de givrage léger.

Les paramètres qui caractérisent la formation de glace sur une pale d'éolienne sont la teneur en eau liquide, le diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau en surfusion, leur vitesse, la température et la durée de l'évènement. Plus la vitesse augmente, plus la quantité de glace accumulée augmente. Plus la durée de l'évènement est longue, plus de glace s'accumule. L'impact de la température intervient dans le type de glace. Si la température est proche de 0°C , la glace formée est du verglas. Le givre se forme pour des températures beaucoup plus basses que 0°C . La teneur en eau liquide et le diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau en surfusion ne varient pas dans cette étude.

Les résultats des simulations des coefficients de portance et de traînée ont montré que les performances aérodynamiques sont globalement détériorées : les pertes du coefficient de portance ne dépassent pas 30 %, l'augmentation du coefficient de traînée ne dépasse pas 140 %. Les résultats obtenus avec XFOIL surévaluent le coefficient de portance et sous-évaluent le coefficient de traînée, ce qui conduit à une sous-évaluation des résultats énergétiques.

Les résultats des simulations de la courbe de puissance ont montré que la puissance lors de givrage est diminuée. Les pertes de puissance pour des vitesses de vent de 5 m/s à 12 m/s, où l'éolienne est supposée opérer le plus souvent, sont évaluées à 1 %.

Les pertes de production annuelle du MEG sous précipitations givrantes sont faibles, moins de 1 %. Ceci est dû aux conditions non sévères de givrage qui ont été modélisées et au faible nombre d'heures de givrage (74h) qui ont conduit à une faible quantité de glace accumulée sur les pales du MEG (1.33 kg/m au maximum en bout de pale). Les résultats obtenus se comparent avec ceux disponibles en littérature pour des sites à faible risque de givre mais seulement sous-estiment les pertes sur le site de Murdochville, caractérisé par des phénomènes sévères de givrage.

De plus, les pertes inhérentes aux éoliennes telles que les pertes par effet de sillage, les pertes par encrassement des pales ou résultantes du verglas, les pertes pour causes d'arrêts et les autres pertes n'ont pas été considérées dans le modèle PROICET. Les pertes en bout de pale, les pertes au niveau du moyeu, les effets du mouvement de « balancier » de l'arbre de transmission et les effets du sillage n'ont pas été considérés dans PROPID. La rugosité de surface n'a pas été considérée dans XFOIL.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Ce mémoire de Maîtrise porte sur les simulations numériques des pertes énergétiques d'une éolienne à partir des formes de glace simulées numériquement.

Une étude bibliographique sur la problématique de givrage des éoliennes, ainsi que la modélisation numérique de l'accrétion de la glace sur un profil en deux dimensions, l'impact du givrage, de la forme du dépôt de glace sur les performances aérodynamiques, les courbes de puissance et sur la production annuelle éolienne, ont été effectuées. L'accumulation de glace sur les pales d'un aérogénérateur détériore les propriétés aérodynamiques de la pale. Le givrage diminue la portance et augmente la traînée du profil. Plus la masse de glace accumulée est importante, plus le coefficient de portance diminue et le coefficient de traînée augmente, et par conséquent les performances aérodynamiques du rotor sont détériorées. Les pertes de puissance sont observées dès le démarrage de l'éolienne givrée. Les pertes de production annuelles dépendent à la fois de l'intensité, de la longueur et de la fréquence des événements givrants.

Le modèle numérique PROICET a été développé dans le cadre de cette Maîtrise, pour simuler la production d'énergie annuelle d'une éolienne à axe horizontal. Ce modèle, qui est le premier du genre, permet de quantifier les pertes annuelles d'une éolienne dues au givrage. PROICET simule la formation de glace sur les pales des éoliennes, calcule les

coefficients de portance et de traînée et les courbes de puissance. Puis, lorsqu'il est couplé à des scénarios du vent et d'évènement givrant, il permet de quantifier les pertes de production annuelles d'une éolienne induites par la glace. L'originalité de ce modèle consiste en l'intégration de trois logiciels, à savoir CIRALIMA, XFOIL et PROPID, avec le modèle éolien générique, dans un processus séquentiel dans lequel les résultats du premier logiciel sont les entrées du deuxième et ainsi de suite. Ceci permet d'évaluer les pertes de performances aérodynamiques, les pertes de puissance et enfin les pertes de production d'une éolienne dues au givrage.

Un modèle éolienne générique MEG, représentatif de l'éolienne Vestas V80 1.8 MW pour la classe de vent IEC 2A, a été aussi développé. Les deux modèles, PROICET et MEG, ont été validés pour l'éolienne Vestas V80 1.8 MW et pour le site de Murdochville (Québec) aux conditions atmosphériques standards.

Le modèle numérique PROICET a été utilisé pour calculer la production de l'éolienne MEG lors de précipitations givrantes légères et par la suite les pertes énergétiques dues au givrage ont été calculées. Des scénarios du vent et du givrage, basés sur le site de Murdochville, ont été utilisés pour calculer les pertes annuelles.

Les résultats de PROICET concernant les simulations des coefficients de portance et de traînée ont montré que les performances aérodynamiques sont globalement détériorées : les pertes du coefficient de portance ne dépassent pas 30 %, l'augmentation du coefficient de traînée ne dépasse pas 140 %. Ces résultats obtenus avec le logiciel XFOIL surévaluent le coefficient de portance et sous-évaluent le coefficient de traînée. En effet, la méthode des panneaux utilisée comme modèle numérique par XFOIL n'est pas la plus appropriée pour

la simulation des écoulements avec des larges zones de séparation comme c'est le cas pour les profils givrés. Ces résultats ont un degré d'incertitude et il est recommandé de remplacer le logiciel XFOIL. Les valeurs des coefficients de portance et de traînée sont un ordre de grandeur des vrais résultats, mais sous-estiment les vrais valeurs; ils servent uniquement à appliquer la procédure de calcul de PROICET.

Les résultats de PROICET concernant des simulations de la courbe de puissance ont montré que la détérioration des performances aérodynamiques conduit à des pertes de puissance de l'ordre de 3.4%. Les pertes de puissance calculées pour des vitesses de vent de 5 m/s à 12 m/s, où l'éolienne est supposée opérer le plus souvent, sont de 1 %. Il est à noter que ces résultats sont basés sur les valeurs sous-évaluées des coefficients de portance et de traînée des profils givrés.

Les résultats de PROICET concernant les pertes de production annuelles du MEG sous précipitations givrantes calculées sont faibles, moins de 1 %. Ceci est dû aux conditions non sévères de givrage qui ont été modélisées et au faible nombre d'heures de givrage (74h) qui ont conduit à une faible quantité de glace accumulée sur les pales du MEG (1.33 kg/m au maximum en bout de pale). Les résultats obtenus se comparent avec ceux disponibles en littérature pour des sites à faible risque de givre mais seulement sous-estiment les pertes sur le site de Murdochville, caractérisé par des phénomènes plus sévères de givrage. Ces résultats confirment quand même le bon fonctionnement du modèle numérique PROICET lors de givrage léger. Par contre les résultats de modèle PROICET ne permettent pas de conclure que les pertes du site de Murdochville sont insignifiantes, car les conditions de givrage, simulées numériquement, sont basées sur des mesures en altitude

de 14.63 m [62], qui est inférieur à l'altitude à laquelle les éoliennes sont installées. Pour avoir les vraies pertes pour ce site il est nécessaire de simuler les vraies conditions givrantes qui sont beaucoup plus sévères que celles simulées numériquement.

TRAVAUX FUTURS

En vertu des résultats obtenus qui sont très encourageant pour la prediction des pertes énergétiques d'un parc éolien, les travaux futurs suivants sont suggérés :

- effectuer une discrétisation plus fine pour la pale du MEG ;
- ajouter les termes négligés dans PROICET et PROPID ;
- modéliser des scénarios du givrage plus sévères que celui choisi dans cette étude et qui sont plus représentatifs du site de Murdochville ;
- valider le modèle PROICET pour une autre éolienne et un autre site ;
- valider les résultats de PROICET expérimentalement ;
- optimiser le processus de PROICET ;
- utiliser un autre logiciel que XFOIL qui prend en compte la rugosité de surface ou développer un code qui utilise une méthode simple pour calculer les coefficients de portance et de traînée et qui prend en considération la rugosité de surface. Utiliser un logiciel basé sur les équations de Navier-Stokes avec une modélisation plus précise de la turbulence et des zones de séparation de l'écoulement.

ANNEXE A

Caractéristiques de l'éolienne Vestas V80 1.8 MW

Cette annexe présente les caractéristiques de l'éolienne Vestas V80 1.8 MW extraites de rendues publiques de Vestas ([51], [52]).

L'éolienne V80 1.8 MW, présentée à la Figure 52, possède une hauteur de moyeu de 67 m et un diamètre de rotor de 80 m pour une surface de capture de 5 027 m². La vitesse de rotation nominale du rotor est de 16.8 tours/min et de 15.5 tours/min pour la classe IEC 1A¹ et pour la classe IEC 2A² respectivement. La vitesse de démarrage de l'éolienne V80 1.8 MW est de 4 m/s, la vitesse nominale du vent est de 16 m/s et la vitesse de coupure est de 25 m/s.

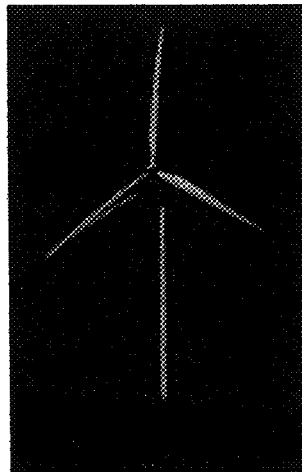


Figure 52 : Éolienne Vestas V80 1.8 MW [62]

La vitesse de rotation de l'éolienne varie légèrement avec la vitesse du vent. Pour la classe IEC 1A elle est comprise entre 16.2 tours/min et 16.8 tours/min. Pour la classe IEC 2A elle varie de 15 tours/min pour de vent de 4 m/s à 15.5 tours/min pour des vents de 9 m/s à 11 m/s (Figure 53).

¹ Classe du vent dont la vitesse moyenne ne dépasse pas 10 m/s [53]

² Classe du vent dont la vitesse moyenne ne dépassé pas 8.5 m/s [53]

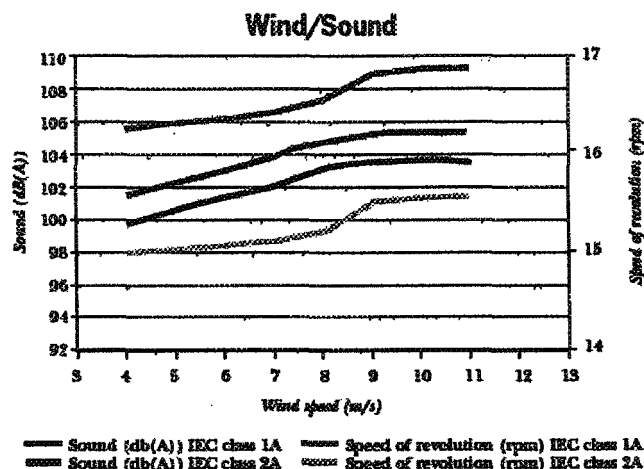


Figure 53 : Niveau sonore et vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent pour la Vestas V80 1.8 MW [52]

L'éolienne Vestas V80 est une éolienne à pas variable. Elle dispose d'un système de calage des pales nommé OptiTip®. Ce système gère par microprocesseurs la rotation de la pale autour de son axe longitudinal, assurant un réglage continu qui permet de conserver un angle de pale optimal en fonction des vents dominants. OptiTip® permet ainsi de maintenir les niveaux sonores dans les limites autorisées par les réglementations locales [54].

Le pas de la pale varie de 10° à 20° (Figure 54) avec un pas initial de 11.75°.

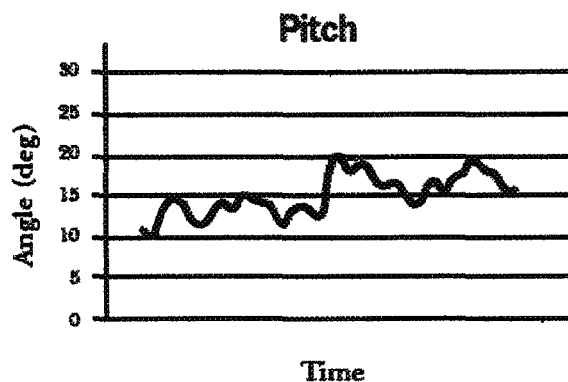


Figure 54 : Pas de la pale en fonction du temps pour la Vestas V80 1.8 MW [52]

La pale de l'éolienne Vestas V80 1.8 MW est composée simplement de deux profils aérodynamiques, sont le NACA 63 XXX et le FFA W3 XX. Les rendues publiques de Vestas ne donnent pas des détails techniques en ce qui concerne le profil exact composant la pale. La corde des profils varie le long de la pale de 3.52 m à la racine de la pale à 0.48 m en bout de pale. L'angle de vrillage varie le long de la pale de 13° à la racine de la pale à 0° en bout de pale.

Le Tableau 20 résume les caractéristiques disponibles de l'éolienne Vestas V80 1.8 MW.

Tableau 20 : Caractéristiques de l'éolienne Vestas V80 1.8 MW

		Valeur	Unité
Rotor	Diamètre	80	m
		264	ft
	Surface balayée	5027	m ²
	Vitesse de rotation nominale (IEC 1A)	16.8	tours/min
	Vitesse de rotation nominale (IEC 2A)	15.5	tours/min
	Régulation de la puissance	Pas (calage) variable	-
	Orientation	Face au vent	-
	Angle de cône	6	deg
Tour	Nombre de pales	3	-
Pale	Hauteur du moyeu	60/67/78	m
		198/221/257	ft
	Corde (base/bout de pale)	3.52 / 0.48	m
		11.62 / 1.6	ft
	Vrillage (base/bout de pale)	13 / 0	deg
Données opérationnelles	Angle de pas	Ajustable de 10 à 20	deg
	Profils aérodynamique	NACA 63 XXX et FFA W3 XXX	-
	Vitesse de démarrage	4	m/s
	Vitesse de vent nominale	16	m/s
	Vitesse de coupure	25	m/s

La courbe de puissance pour l'éolienne Vestas V80 1.8 MW est présentée à la Figure 55 en fonction de la vitesse du vent selon les conditions atmosphériques standards. Les conditions atmosphériques standards sont prises au niveau de la mer et correspondent à une température de 15°C et une pression barométrique de 101.325 kPa ce qui correspond à une densité de l'air de 1.225 kg/m³.

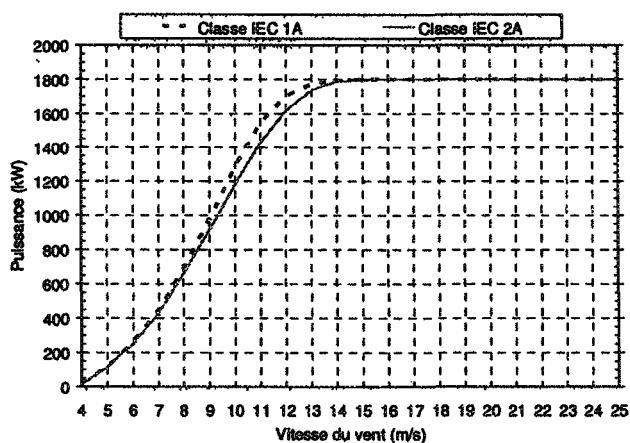


Figure 55 : Courbe de puissance de la Vestas V80 1.8 MW aux conditions atmosphériques standards pour la classe IEC 1A et la classe IEC 2A

Le coefficient de puissance qui représente l'efficacité de l'éolienne ou sa capacité d'extraire l'énergie de l'air est présenté à la Figure 56 et au Tableau 21.

Aux conditions atmosphériques standards et pour une classe IEC 2A, l'éolienne démarre lorsque le vent est de 4 m/s avec un coefficient de puissance de 0.0655, elle s'arrête lorsque le vent est de 25 m/s avec un coefficient de puissance de 0.0374. Le coefficient de puissance maximal est de 0.4168 et est atteint lorsque le vent est de 8 m/s (Tableau 21 et Figure 56). Pour la classe IEC 1A le coefficient de puissance maximal est de 0.4364 et il est aussi atteint lorsque le vent est de 8 m/s.

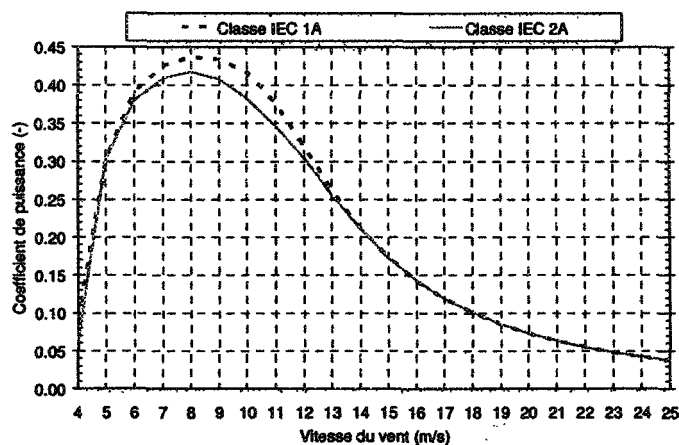


Figure 56 : Coefficient de puissance de la Vestas V80 1.8 MW pour la classe IEC 1A et la classe IEC 2A

Tableau 21 : Puissance et coefficient de puissance de la Vestas V80 1.8 MW pour la classe IEC 1A et la classe IEC 2A

V_{∞} [m/s]	Puissance (kW)		Coefficient de puissance (-)	
	Classe IEC 1A	Classe IEC 2A	Classe IEC 1A	Classe IEC 2A
4	18.1	12.9	0.0919	0.0655
5	116	116	0.3014	0.3014
6	260	252	0.3909	0.3789
7	449	432	0.4251	0.4090
8	688	657	0.4364	0.4168
9	974	914	0.4339	0.4072
10	1282	1179	0.4164	0.3829
11	1546	1424	0.3772	0.3475
12	1705	1619	0.3205	0.3043
13	1771	1735	0.2618	0.2565
14	1792	1784	0.2121	0.2112
15	1798	1797	0.1730	0.1729
16	1800	1800	0.1427	0.1427
17	1800	1800	0.1190	0.1190
18	1800	1800	0.1002	0.1002
19	1800	1800	0.0852	0.0852
20	1800	1800	0.0731	0.0731
21	1800	1800	0.0631	0.0631
22	1800	1800	0.0549	0.0549
23	1800	1800	0.0480	0.0480
24	1800	1800	0.0423	0.0423
25	1800	1800	0.0374	0.0374

ANNEXE B

Impact de la température sur la puissance et le coefficient de puissance d'une éolienne

B.1. Introduction

L'objectif de cette annexe est d'illustrer comment la puissance d'une éolienne et son coefficient de puissance varient avec la température.

B.2. Impact de la température

La puissance extraite par une éolienne est fonction de son coefficient de puissance C_p qui est limité à la valeur de 0.593, de la densité de l'air ρ_{air} (kg/m³), de la section S (m²) balayée par les pales et de la vitesse de l'écoulement non perturbé V_∞ (m/s) :

$$P = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho_{air} \cdot S \cdot V_\infty^3 \quad (B-1)$$

Le coefficient de puissance dépend de la vitesse spécifique λ ($\lambda = \Omega R / V_\infty$, où Ω est la vitesse de rotation des pales, R est leur rayon et V_∞ est la vitesse du vent), du nombre de pales [9] et de l'angle de calage β_P [8] (Figure 57).

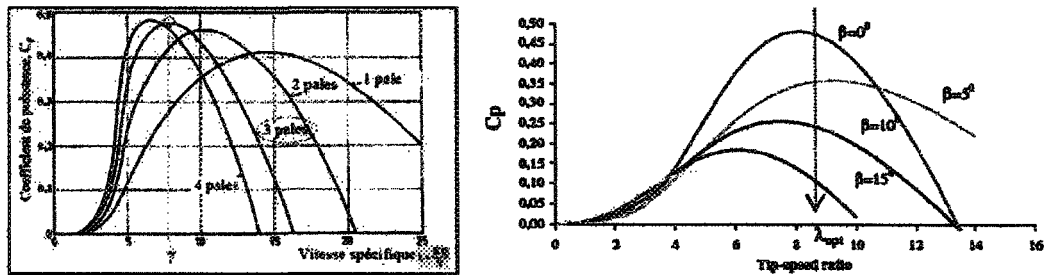


Figure 57 : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique et du nombre de pales [9] (gauche) et de la vitesse spécifique pour différents angles de calage [8] (droite)

La documentation de Vestas [51] fournit des données de la puissance de l'éolienne V80 1.8 MW en fonction de la température, comprises entre 5°C et 60°C. Parmi ces

données 5 températures ont été choisies pour déterminer la variation de la puissance et du coefficient de puissance avec la température, soit 5°C, 11°C, 15°C, 26°C et 33°C. La puissance et le coefficient de puissance de la Vestas V80 1.8 MW sont répertoriés, en fonction de ces cinq températures au Tableau 22. Le coefficient de puissance est défini comme étant le rapport entre la puissance produite par l'éolienne et l'énergie disponible dans l'air ([38] et [40]) :

$$C_p = \frac{P_{\text{rotor}}}{P_{\text{vent}}} = \frac{P_{\text{rotor}}}{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \cdot S \cdot V_{\infty}^3} \quad (\text{B-2})$$

Tableau 22 : Puissance et coefficient de puissance en fonction de la température pour la classe IEC 2A de Vestas V80 1.8 MW

Vitesse (m/s)	Puissance (kW)					Coefficient de puissance (-)				
	5°C	11°C	15°C	26°C	33°C	5°C	11°C	15°C	26°C	33°C
4	14.9	13.6	12.9	10.8	9.4	0.0729	0.0680	0.0654	0.0569	0.0506
5	122	118	116	110	106	0.3058	0.3021	0.3012	0.2965	0.2924
6	263	256	252	241	234	0.3814	0.3793	0.3786	0.3759	0.3736
7	450	438	432	414	402	0.4110	0.4087	0.4088	0.4067	0.4041
8	683	666	657	630	613	0.4179	0.4163	0.4165	0.4146	0.4129
9	950	926	914	878	854	0.4083	0.4065	0.4069	0.4058	0.4040
10	1224	1194	1179	1133	1103	0.3835	0.3821	0.3826	0.3818	0.3803
11	1472	1440	1424	1375	1341	0.3465	0.3462	0.3472	0.3481	0.3474
12	1656	1631	1619	1580	1549	0.3002	0.3021	0.3041	0.3081	0.3091
13	1754	1741	1735	1716	1695	0.2501	0.2536	0.2563	0.2632	0.2660
14	1789	1786	1784	1778	1769	0.2042	0.2083	0.2110	0.2183	0.2223
15	1798	1798	1797	1796	1793	0.1669	0.1705	0.1728	0.1793	0.1832
16	1800	1800	1800	1800	1799	0.1377	0.1406	0.1426	0.1481	0.1515
17	1800	1800	1800	1800	1800	0.1148	0.1173	0.1189	0.1234	0.1263
18	1800	1800	1800	1800	1800	0.0967	0.0988	0.1002	0.1040	0.1064
19	1800	1800	1800	1800	1800	0.0822	0.0840	0.0852	0.0884	0.0905
20	1800	1800	1800	1800	1800	0.0705	0.0720	0.0730	0.0758	0.0776
21	1800	1800	1800	1800	1800	0.0609	0.0622	0.0631	0.0655	0.0670
22	1800	1800	1800	1800	1800	0.0530	0.0541	0.0549	0.0570	0.0583
23	1800	1800	1800	1800	1800	0.0463	0.0473	0.0480	0.0498	0.0510
24	1800	1800	1800	1800	1800	0.0408	0.0417	0.0423	0.0439	0.0449
25	1800	1800	1800	1800	1800	0.0361	0.0369	0.0374	0.0388	0.0397

Les courbes de puissance en fonction de la température sont présentées à la Figure 58. Pour une température variant de 5°C à 33°C et une vitesse de vent comprise entre 6 m/s et 13 m/s (Figure 58), la puissance varie peu et ne dépasse pas 7 %. Ceci est dû au fait que la puissance est proportionnelle à la densité de l'air (équation (B-1)). Lorsque la température augmente, la densité de l'air diminue et par conséquent la puissance captée par l'éolienne diminue (Figure 59).

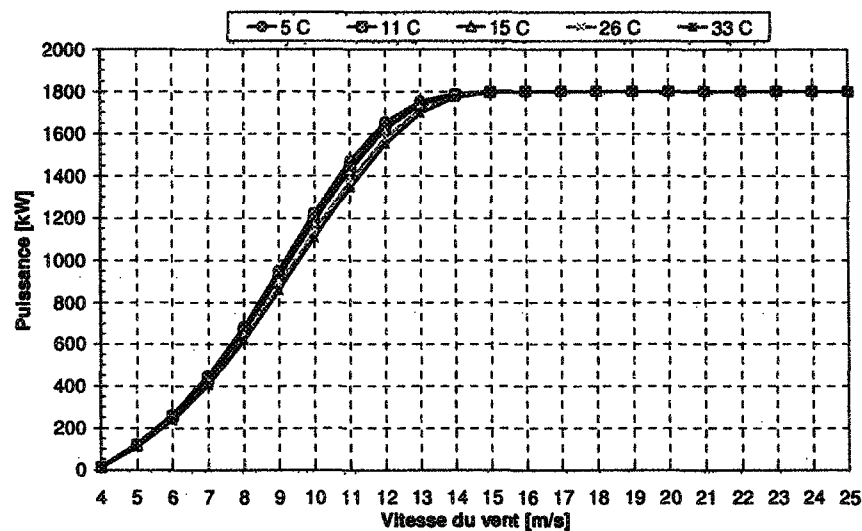


Figure 58 : Courbe de puissance pour la classe IEC 2A de la Vestas V80 1.8 MW en fonction de la température

La puissance en fonction de la température pour différentes vitesses du vent est aussi présentée à la Figure 59. À faible vitesse, de 4 m/s à 6 m/s, et pour des vitesses supérieures à 14 m/s, l'influence de la température sur la puissance est presque négligeable. Lorsque la vitesse du vent est comprise dans l'intervalle de 6 m/s et 13 m/s, la puissance varie faiblement. Elle diminue légèrement avec l'augmentation de la température. Dans

l'intervalle de la température de 5°C à 19°C, la variation de la puissance est si faible qu'elle peut être considérée constante.

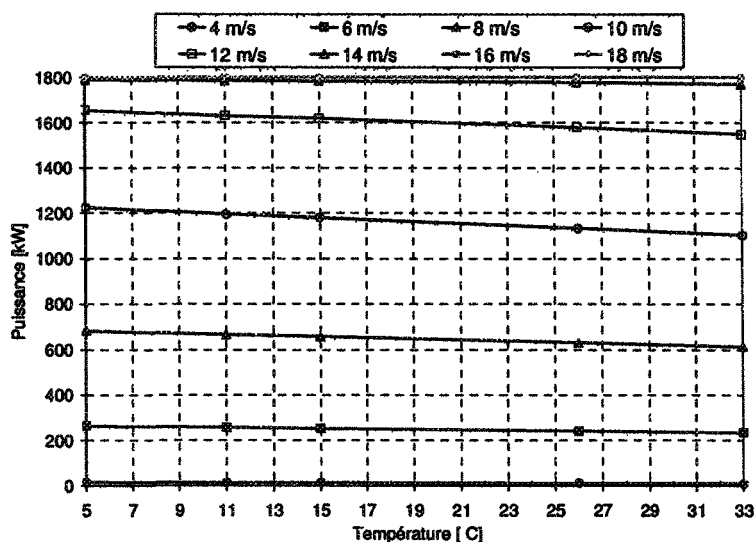


Figure 59 : Puissance pour la classe IEC 2A de la Vestas V80 1.8 MW en fonction de la température et de la vitesse du vent

Les courbes du coefficient de puissance pour différentes températures sont présentées à la Figure 60. Le coefficient de puissance en fonction de la température pour différentes vitesses du vent est également présenté à la Figure 61. Pour une température variant de 5°C à 33°C et une vitesse de vent comprise entre 6 m/s et 11 m/s (Figure 61), le coefficient de puissance diminue légèrement avec la température et cette variation ne dépasse pas 1 %. Pour des vents supérieurs à 12 m/s, le coefficient de puissance augmente légèrement avec la température (Figure 61) et cette variation ne dépasse pas 5 %. Étant donné que la vitesse moyenne pour le site choisi est de 8 m/s (section 4.2) et que l'éolienne est supposée de fonctionner le plus souvent dans l'intervalle des vitesses de 5 m/s à 11 m/s et que dans cet

intervalle le coefficient de puissance varie très peu avec la température (1 %), la variation du coefficient de puissance avec la température est considéré négligeable.

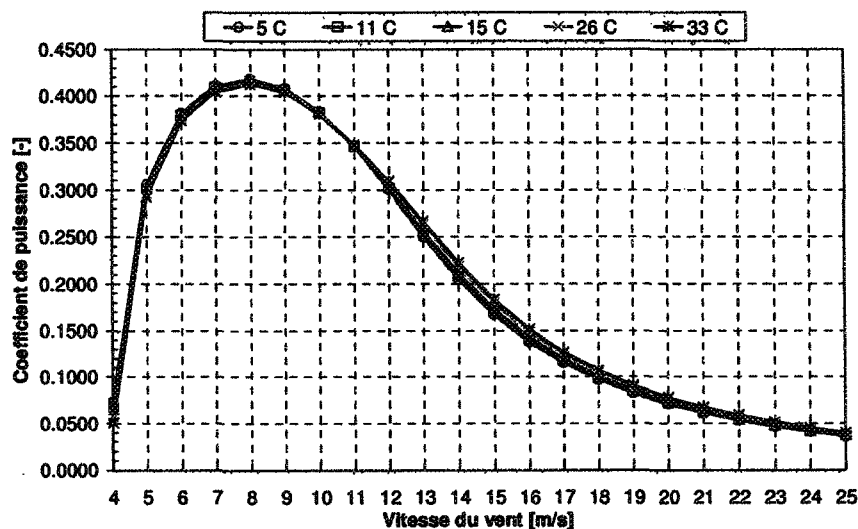


Figure 60 : Coefficient de puissance pour la classe IEC 2A de la Vestas V80 1.8 MW en fonction de la température

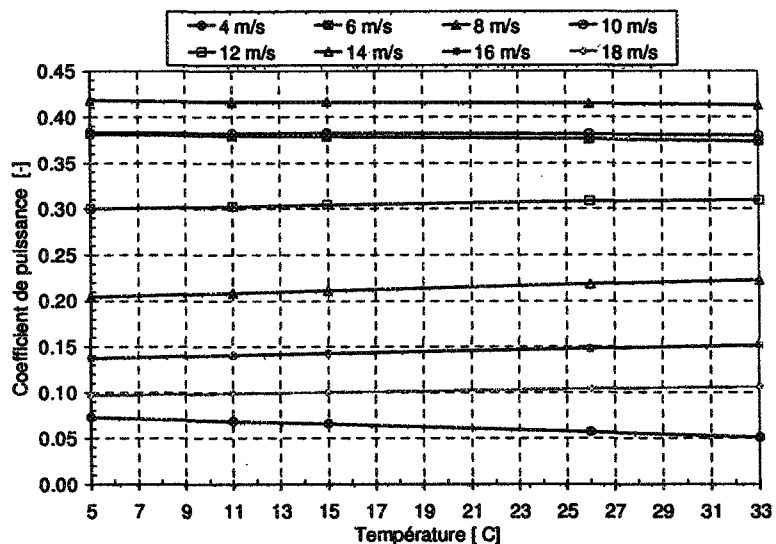


Figure 61 : Coefficient de puissance pour la classe IEC 2A de la Vestas V80 1.8 MW en fonction de la température et de la vitesse du vent

B.3. Conclusion

Cette étude démontre que le coefficient de puissance varie peu avec la température et que cette variation à peu d'impact sur la puissance de l'éolienne. Pour le calcul de la puissance de l'éolienne, le coefficient de puissance est considéré constant et calculé aux conditions standards, soit une température de 15°C.

ANNEXE C

Caractéristiques géométriques d'un profil. Profils de type NACA

Cette annexe présente les caractéristiques géométriques d'un profil aérodynamique et les différents profils de type NACA.

C.1. Caractéristiques géométriques d'un profil

I. Paraschivoiu définit, dans son ouvrage *Aérodynamique subsonique* [66], le *profil aérodynamique* comme le contour géométrique obtenu par la coupe transversale d'une aile d'avion, d'une pale d'hélicoptère ou d'une pale d'éolienne. La forme du profil est une caractéristique essentielle d'une aile et influe grandement sur les caractéristiques aérodynamiques et les performances.

L'auteur définit les caractéristiques géométriques suivantes d'un profil aérodynamique (Figure 62) :

- A : bord d'attaque ;
- B : bord de fuite ;
- AB : corde de référence du profil ;
- AMB : extrados ;
- ANB : intrados ;
- APB : ligne de cambrure du profil ;
- c : longueur de la corde de référence ;
- d : position de la cambrure maximale du profil ;
- f : cambrure maximale ;
- r : rayon du bord d'attaque ;
- α : angle d'attaque ;
- τ : angle du bord de fuite.

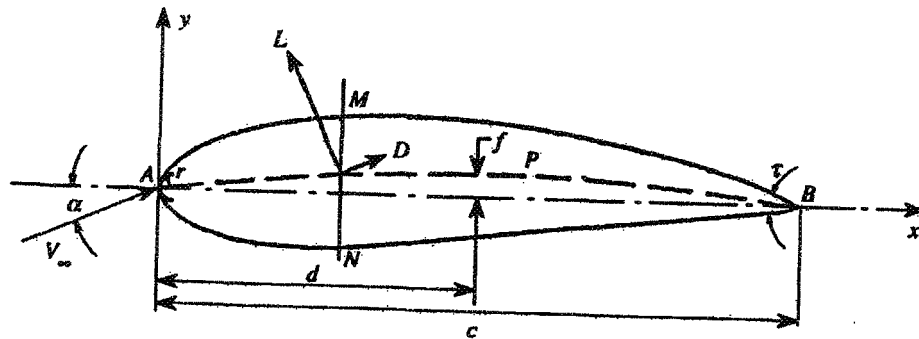


Figure 62 : Caractéristiques géométriques d'un profil [66]

Le milieu des segments perpendiculaires à la corde de référence, tel MN, est appelé *ligne de cambrure moyenne*. On note f la plus grande ordonnée de la ligne de cambrure moyenne par rapport à AB. Le rapport f/c est dit *cambrure relative* et la valeur maximale du segment MN représente l'épaisseur maximale du profil, e_{max} . L'expression e_{max}/c correspond à l'*épaisseur relative maximale*. Sur la même figure, apparaissent les forces aérodynamiques telles que la portance L et la traînée D .

C.2. Profils de type NACA

Le NACA⁶ a étudié différentes familles de profils répondant à diverses applications. Parmi ces dernières, il faut distinguer les familles de profils à quatre et à cinq chiffres ainsi que la série 6.

⁶ National Advisory Committee for Aeronautics

C.2.1. Famille de profils à quatre chiffres

Les profils de type NACA développés dans les années 30 et 40 utilisent une convention de désignation basée sur l'épaisseur du profil et la forme de la cambrure [67]. Dans la famille de profils à quatre chiffres, le premier chiffre spécifie la cambrure relative maximale en pourcentage de la corde, le deuxième indique la position de cette cambrure, mesurée à partir du bord d'attaque, en pourcentage de la corde et les deux derniers chiffres représentent l'épaisseur relative maximale en pourcentage de la corde. Par exemple, dans le cas du profil NACA 2415 :

- le 2 représente la cambrure relative maximale (2 %);
- le 4 représente la position de la cambrure maximale située à 40 % de la corde;
- le 15 représente l'épaisseur relative maximale égale à 15 %.

C.2.2. Famille de profils à cinq chiffres

Dans la famille des profils à cinq chiffres, la convention de désignation est basée sur les caractéristiques théoriques de la conception du profil [67]. Par exemple, dans le cas de NACA 23015 :

- le premier chiffre représente le coefficient de portance caractéristique égale à 0.2;
- le 30 représente deux fois la distance du bord d'attaque à la position de la cambrure maximale ($1/2 \times 30 = 15$ %). Donc, la cambrure maximale est située à 15 % de la corde;

- le 15 représente l'épaisseur relative maximale (15 %).

C.2.3. La série 6 de profils NACA

Le NACA a également étudié une autre famille de profils, nommée la série 6 de profils NACA (NACA 6-series of airfoils), dont l'écoulement est laminaire sur une majeure partie de sa surface. La convention de désignation de ce type de profil est une combinaison de la position de l'épaisseur maximale, le type de la ligne moyenne utilisé pour générer la ligne de cambrure et l'épaisseur relative [67]. Par exemple, pour un NACA 63 415 :

- le 3 représente la position de l'épaisseur maximale située à 30 % de la corde;
- le 4 représente le coefficient de portance caractéristique égale à 0.4;
- le 15 représente l'épaisseur relative maximale (15 %).

La particularité des profils de la série 6 est qu'ils sont moins sensibles à la saleté. Ce type de profil a un coefficient de portance maximal, une très faible traînée sur une petite gamme des conditions d'exploitation et est optimisé pour grandes vitesses. Par contre, ils sont très sensibles à la rugosité et ont un mauvais comportement de décrochage [68].

ANNEXE D

Calcul de la production annuelle d'une éolienne avec le logiciel RETScreen

RETScreen[®] est un logiciel d'analyse de projets de centrale éolienne qui permet d'évaluer la production annuelle d'énergie pour une ou plusieurs éoliennes, hors réseau ou raccordées à un réseau isolé ou à un réseau central d'électricité, et ce partout à travers le monde [5].

Dans ce mémoire deux feuilles de calcul de RETScreen[®] sont utilisées et présentées aux Figure 63 et Figure 64 , soit « Modèle énergétique » et « Caractéristiques des équipements ».

Modèle énergétique RETScreen[®] - Projet de centrale éolienne

Évaluation et notes

Unité: **Métriques**

Caractéristiques du site		Données	Notes/Range
Nom du projet		Test Station	<i>voir la feuille de l'utilisateur en ligne</i>
Lieu du projet		Station météo, etc.	
Source des données de vent		Vitesse du vent	
Station météorologique la plus proche du projet		Direction du vent	<i>voir la base de données météorologiques</i>
Vitesse moyenne annuelle du vent	m/s	4.5	
Hauteur de mesure du vent	m	65.0	3.0 à 100.0 m
Coefficient de cisaillement du vent	-	0.25	0.10 à 0.40
Vitesse du vent à 10 m	m/s	4.7	
Pression atmosphérique moyenne	kPa	99.3	60.0 à 103.0 kPa
Température moyenne annuelle	°C	5	-20 à 30 °C

Paramètres du système		Données	Notes/Range
Type de réseau		Réseau central	
Puissance nominale par éolienne	kW	1 800	<i>consultez la feuille Évaluation</i>
Nombre d'éoliennes	-	1	
Puissance éolienne installée	kW	1 800	
Hauteur du moyeu	m	67.0	6.0 à 100.0 m
Vitesse du vent à hauteur du moyeu	m/s	8.0	
Densité de puissance à hauteur du moyeu	W/m²	600	
Pertes par effet de sillage	%	0%	0% à 20%
Pertes par encrassement des pales et/ou vergles	%	0%	1% à 10%
Autres pertes et causes d'arrêts	%	0%	2% à 7%
Pertes diverses	%	0%	2% à 6%

Production annuelle d'énergie		Données par éolienne	Données totales	Notes/Range
Puissance éolienne installée	kW	1 800	1 800	
	MWh	1 800	1 800	
Production énergétique non corrigée	MWh	6 337	6 337	
Coefficient de correction barométrique	-	0.93	0.93	0.59 à 1.02
Coefficient de correction thermique	-	1.06	1.06	0.98 à 1.15
Production énergétique brute	MWh	6 247	6 247	
Coefficient de pertes	-	1.00	1.00	0.75 à 1.00
Rendement spécifique	kWh/m²	1 243	1 243	150 à 1 500 kWh/m²
Facteur d'utilisation de la centrale éolienne	%	40%	40%	20% à 49%
Énergie renouvelable fournie	MWh	6 247	6 247	
	\$/MWh	22 449	22 449	<i>consultez la feuille Analyse des coûts</i>

Version 3.2 © Ministère des Ressources naturelles Canada 1997-2005. RNC/CanCTEC - Vancouver

Figure 63 : Modèle énergétique de RETScreen[®] [5]

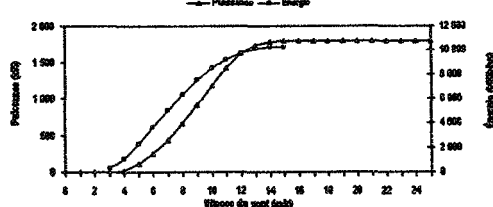
Caractéristiques des équipements RETScreen® - Projet de centrale éolienne

Caractéristique	Unité	Valeur	Remarque
Puissance nominale par éolienne	kW	2 250	voir la liste de données du modèle
Hauteur du moyeu	m	57,0	6,0 à 100,0 m
Diamètre du rotor	m	50	7 à 80 m
Surface balayée	m²	1 963	35 à 5 027 m²
Manufacturier d'éoliennes		5000	
Modèle d'éolienne		5000	
Source de la courbe d'énergie		Standard	distribution de Rayleigh
Facteur de forme		2,0	

Source de la courbe d'énergie

Vitesse du vent (m/s)	Courbe de puissance (kW)	Courbe d'énergie (MWh/an)
0	0,0	-
1	0,0	-
2	0,0	-
3	0,0	337,3
4	11,3	1 094,1
5	114,3	2 242,4
6	330,3	3 009,5
7	652,3	5 015,3
8	952,3	6 336,9
9	1 252,3	7 601,1
10	1 552,3	8 468,4
11	1 852,3	9 219,0
12	2 152,3	9 761,9
13	2 452,3	10 081,2
14	2 752,3	10 232,4
15	3 052,3	10 236,6
16	3 352,3	-
17	3 652,3	-
18	3 952,3	-
19	4 252,3	-
20	4 552,3	-
21	4 852,3	-
22	5 152,3	-
23	5 452,3	-
24	5 752,3	-
25	6 052,3	-

Courbes de puissance et d'énergie

voir à la fin du
manuel d'installation

Version 3.2

© Ministère de Ressources naturelles Canada 1997-2005.

RETScreen/CTEC - Vancouver

Figure 64 : Caractéristiques des équipements de RETScreen® [5]

Les algorithmes utilisés par RETScreen® sont expliqués en détail dans la référence [5]. Le logiciel utilise une courbe de puissance spécifiée par l'utilisateur et la fonction de distribution de probabilité des vitesses du vent de Weibull pour calculer la courbe d'énergie de l'éolienne. La production énergétique est alors ajustée en fonction des effets de la température et de la pression atmosphérique, ainsi qu'en fonction de diverses pertes

précisées par l'utilisateur. Les entrées et les sorties du logiciel sont présentées aux Tableau 23 et Tableau 24.

Tableau 23 : Entrées de RETScreen®

Vitesse moyenne annuelle du vent pour un site	m/s
Hauteur de mesure du vent	m
Coefficient de cisaillement du vent	-
Pression atmosphérique moyenne	kPa
Température moyenne annuelle	°C
Type de réseau	-
Nombre d'éolienne	-
Pertes par effet de sillage, pertes par encrassement des pales et/ou verglas, autres pertes et causes d'arrêts, pertes divers	%
Diamètre du rotor de l'éolienne	m
Surface balayé par le rotor de l'éolienne	m ²
Valeurs de la puissance en fonction de la vitesse du vent	m/s

Tableau 24 : Sorties de RETScreen®

Production énergétique non corrigée	MWh
Coefficient de correction barométrique	-
Coefficient de correction thermique	-
Production énergétique brute	MWh
Coefficient de pertes	-
Facteur d'utilisation de l'éolienne	%

Les principales limites de RETScreen® sont qu'il ne considère pas pour le moment les projets de centrale éolienne autonome qui nécessitent des accumulateurs électriques (batteries) et qu'il n'a pas encore été validé pour les éoliennes à axe vertical.

Par ailleurs, ce logiciel est offert en plusieurs langues gratuitement.

ANNEXE E

**Simulation numérique des coefficients de portance et de traînée avec le
code commercial XFOIL**

E.1. Introduction

L'objectif de cette annexe est de simuler les coefficients de portance et de traînée avec le code commercial XFOIL qui se base sur une méthode des panneaux combinée à une formulation de couche limite visqueuse [48]. La simulation est effectuée sur le profil de pale d'éolienne NACA 63 415. De plus, une étude paramétrique est effectuée dans le but de vérifier l'influence des paramètres tels que le nombre d'itérations, le nombre de Mach et le nombre de Reynolds. Les résultats obtenus sont comparés aux données expérimentales d'Abbott&Von Doenhoff [57] pour un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ et aux données numériques de RISO [56] obtenus avec le code XFOIL. RISO a utilisé XFOIL dans sa version standard avec 120 panneaux répartis sur la surface du profil, en activant l'option couche limite visqueuse et en fixant le nombre de Reynolds à la même valeur que les données expérimentales.

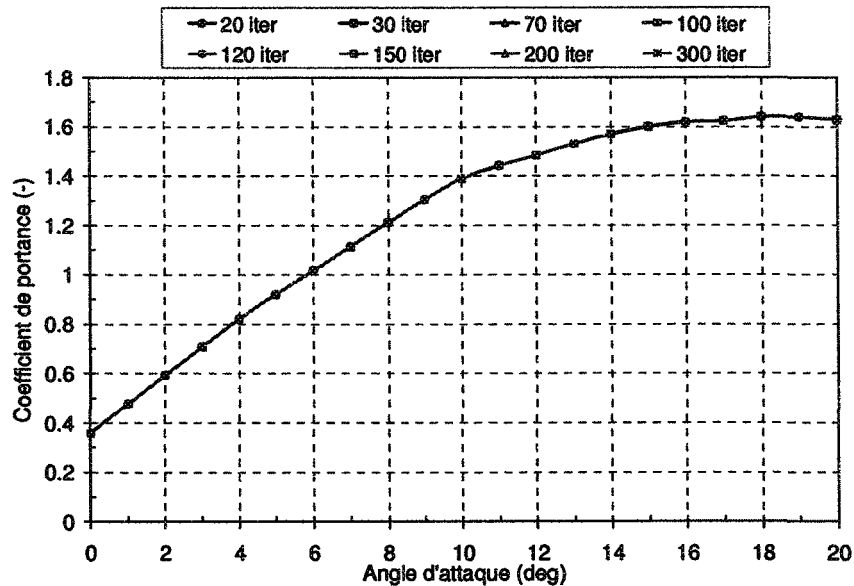
E.2. Étude de sensibilité

E.2.1. Effet du nombre d'itération

Pour vérifier l'impact du nombre d'itération, huit simulations numériques ont été effectuées en faisant varier le nombre maximal d'itération de 20 à 300 itérations. Les paramètres fixes pour ces huit simulations sont répertoriés dans le Tableau 25. Les résultats des coefficients de portance et de traînée sont présentés, respectivement, aux Figure 65 et Figure 66.

Tableau 25 : Paramètres d'entrées de XFOIL pour l'étude de sensibilité

Paramètres variés	Paramètres fixés						
	Profil	Nombre des panneaux	Angle d'attaque (deg)	Mode visqueux	Nombre de Reynolds	Nombre de Mach	Nombre d'itération
Nombre d'itération	NACA 63 415	120	0 à 20	oui	$3 \cdot 10^6$	0	varie
Nombre de Mach	NACA 63 415	120	0 à 20	oui	$3 \cdot 10^6$	varie	100
Nombre de Reynolds	NACA 63 415	120	0 à 20	oui	varie	0	100

Figure 65 : Coefficient de portance du profil NACA 63 415 à un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ et en fonction de l'angle d'attaque et du nombre d'itération

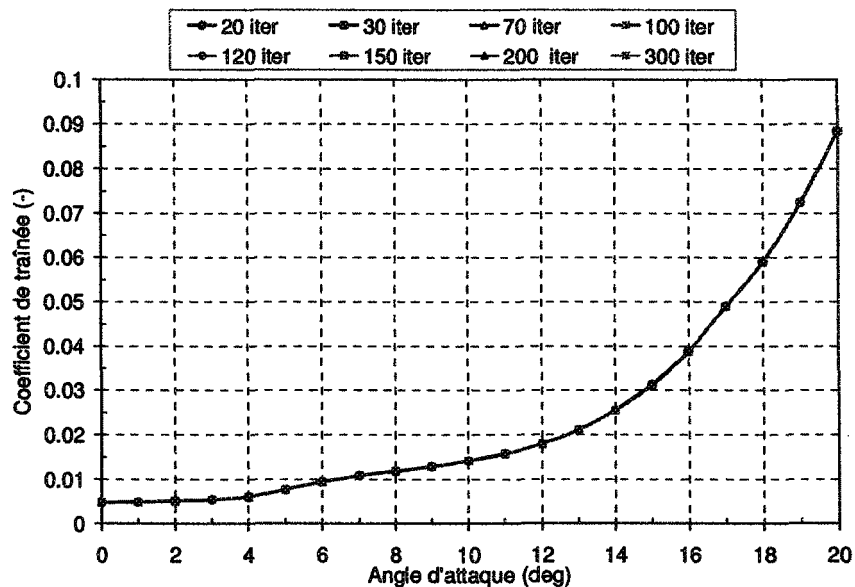


Figure 66 : Coefficient de traînée du profil NACA 63 415 à un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ et en fonction de l'angle d'attaque et du nombre d'itération

Il est facile de remarquer que le nombre maximal d'itération n'a pas d'influence sur les valeurs des coefficients de portance et de traînée. Les courbes sont parfaitement confondues. Il est à noter que pour des itérations de 10 à 60 il manque les valeurs des coefficients de portance et de traînée pour certains angles d'attaque, soit 12° , 13° et/ou 14° . Donc il est nécessaire d'augmenter les itérations pour obtenir la convergence de la solution dans cette zone.

E.2.2. Effet du nombre de Mach

Pour vérifier l'impact du nombre de Mach, cinq simulations numériques ont été effectuées en faisant varier le nombre de Mach de 0 à 0.3 (cas de l'écoulement subsonique

incompressible). Les paramètres fixes pour ces cinq simulations sont répertoriés dans le Tableau 25. Les résultats sont présentés aux Figure 67 et Figure 68.

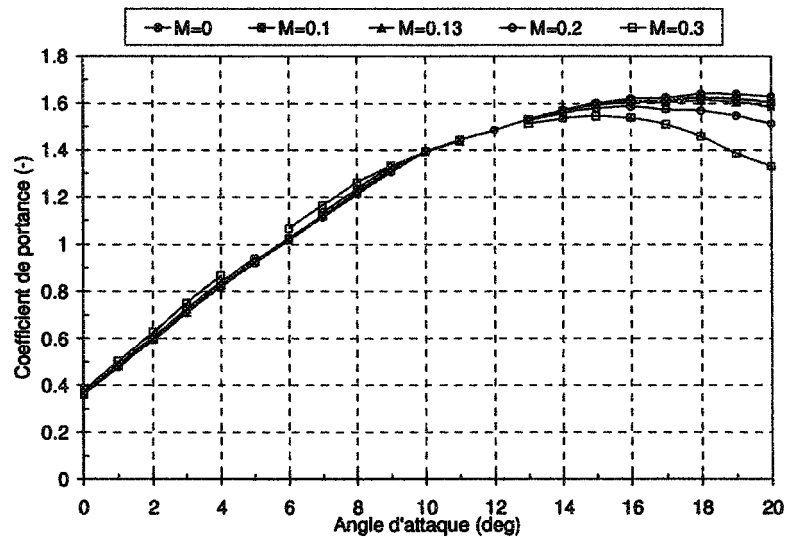


Figure 67 : Coefficient de portance du profil NACA 63 415 à un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ et en fonction de l'angle d'attaque et du nombre de Mach

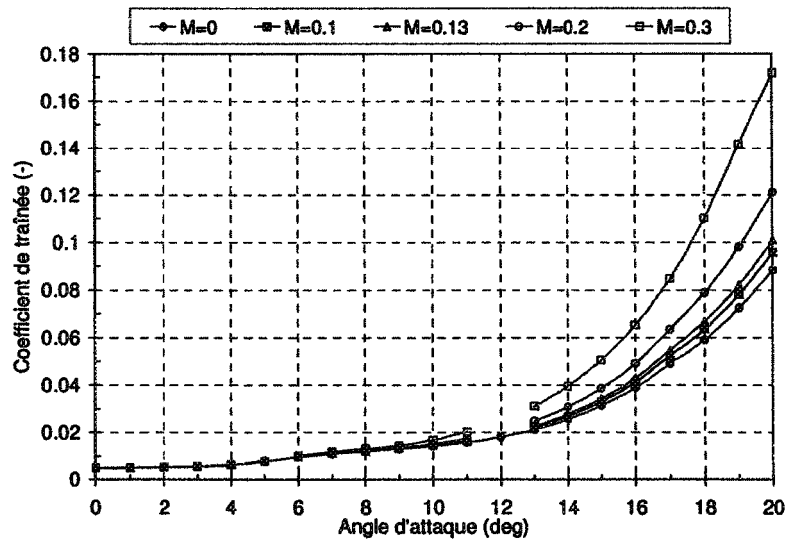


Figure 68 : Coefficient de traînée du profil NACA 63 415 à un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ et en fonction de l'angle d'attaque et du nombre de Mach

Il est à remarquer que dans la zone de l'angle d'attaque compris entre 14° à 20° le coefficient de portance diminue lorsque le nombre de Mach augmente (Figure 67). L'écart devient plus grand avec l'augmentation de l'angle d'attaque. Pour des angles d'attaque compris entre 0° à 9° , le coefficient de portance augmente légèrement avec l'augmentation du nombre de Mach. Pour des angles d'attaque entre 0° à 9° le coefficient de traînée ne varie pas avec le nombre du Mach (Figure 68). À partir d'un angle de 10° le coefficient de traînée augmente considérablement avec le nombre de Mach. Globalement le coefficient de traînée est plus affecté par le nombre de Mach que le coefficient de portance.

Il est à noter que pour un nombre de Mach de 0.1 et 0.13 il manque les valeurs des coefficients de portance et de traînée pour un angle de 12° , pour un nombre de Mach de 0.2 il manque les valeurs des coefficients de portance et de traînée pour un angle de 12° et 6° , et pour un nombre de Mach de 0.3 il manque les valeurs des coefficients de portance et de traînée pour un angle de 12° et 5° . Pour obtenir la convergence de la solution dans ces zones il est nécessaire d'augmenter le nombre d'itérations maximal.

E.2.3. Effet du nombre de Reynolds

L'effet du nombre de Reynolds a été évalué en faisant varier celui-ci. Les paramètres fixes pour les simulations sont répertoriés dans le Tableau 25. Les résultats sont présentés aux Figure 69 et Figure 70.

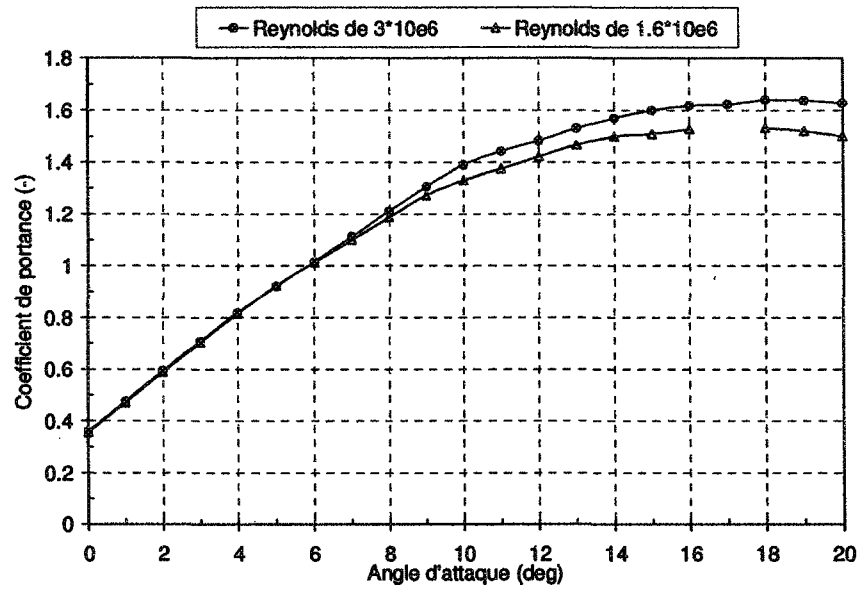


Figure 69 : Coefficient de portance du profil NACA 63 415 à un nombre de Mach de 0 en fonction de l'angle d'attaque et du nombre de Reynolds

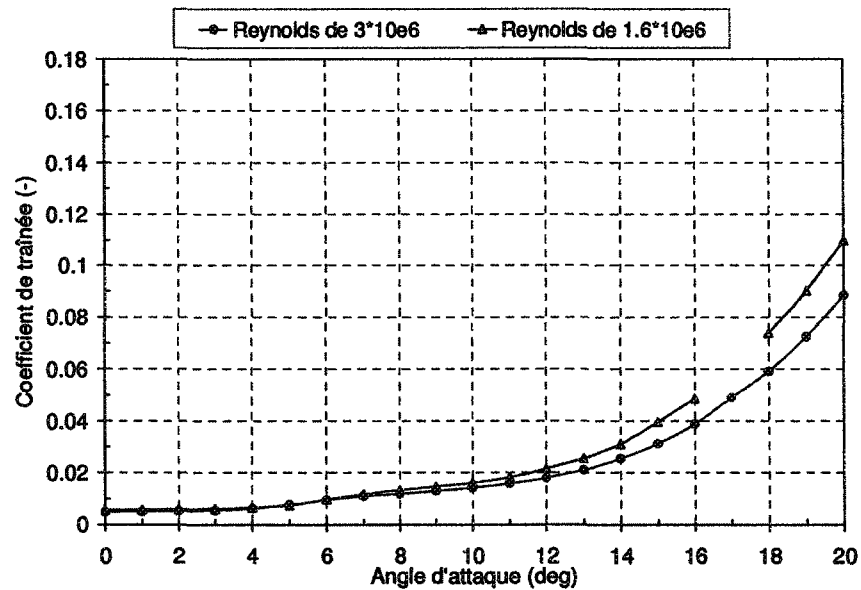


Figure 70 : Coefficient de traînée du profil NACA 63 415 à un nombre de Mach de 0 en fonction de l'angle d'attaque et du nombre de Reynolds

Pour un angle d'attaque de 0° à 6° le coefficient de portance ne varie pas. Il commence à varier pour un angle d'attaque de 7° à 20° . Le coefficient de portance augmente lorsque le nombre de Reynolds augmente et l'écart devient plus grand avec l'augmentation de l'angle d'attaque (Figure 69). Le coefficient de traînée ne varie pas pour un angle d'attaque de 0° à 8° . Pour un angle d'attaque de 8° à 20° le coefficient de traînée diminue lorsque le nombre de Reynolds augmente (Figure 70). Donc l'augmentation du nombre de Reynolds améliore les performances aérodynamiques : le coefficient de portance augmente et le coefficient de traînée diminue.

E.2.4. Validation des résultats

Les résultats obtenus, pour un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$, sont comparés aux données expérimentales d'Abbott & Von Doenhoff [57] et aux données numériques de RISO [56] obtenues avec le code XFOIL. Le nombre de Mach étant absent dans les références citées, il a été calculé à partir du nombre de Reynolds pour une température ambiante de 22°C . Le nombre de Mach calculé est de 0.13 qui correspond à une vitesse de 45 m/s.

Les données de référence, ainsi que les résultats obtenus pour un nombre de Mach de 0 et pour le Mach calculé de 0.13, sont présentés aux Figure 71 et Figure 72.

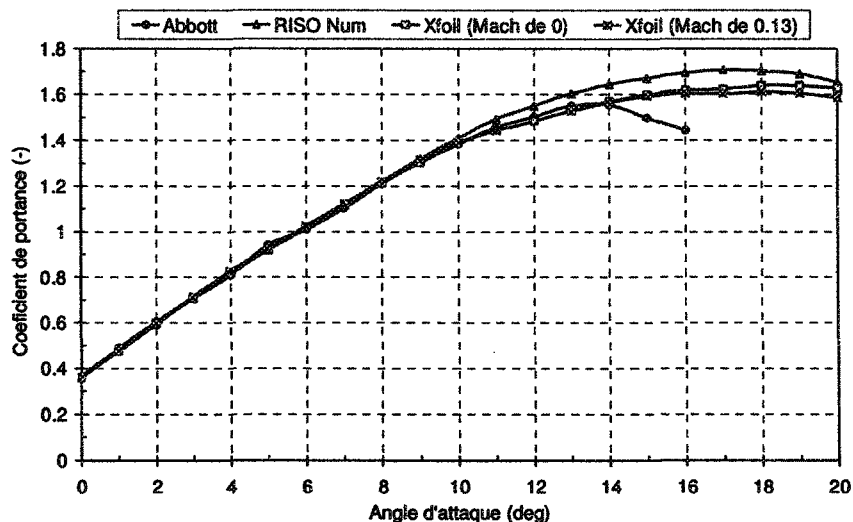


Figure 71 : Comparaison des coefficients de portance du profil NACA 63 415 pour un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$

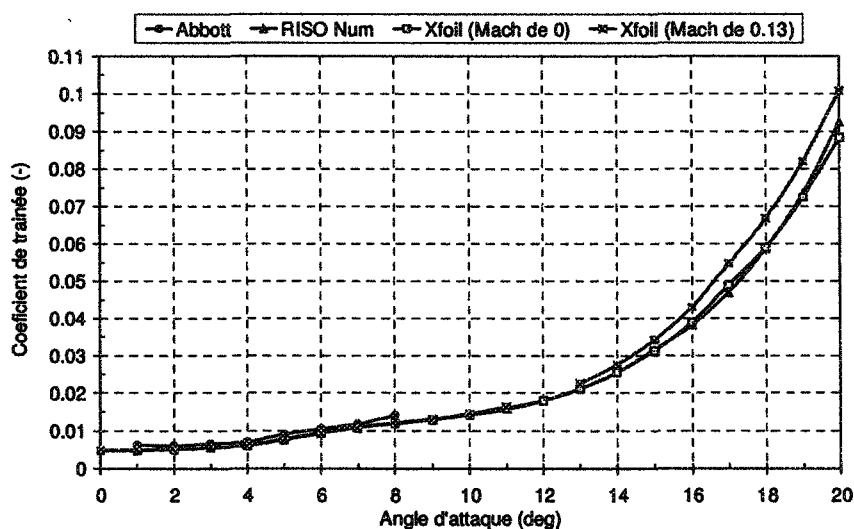


Figure 72 : Comparaison des coefficients de traînée du profil NACA 63 415 pour un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$

Il est à noter qu'à partir de l'angle d'attaque de 10° il y a une différence entre les données de référence (Figure 71). Les coefficients de portance de RISO sont supérieurs aux

ceux d'Abbott&Von Doenhoff et pour un angle d'attaque de 14° le coefficient de portance d'Abbott&Von Doenhoff diminue considérablement par rapport à celui de RISO qui continue à augmenter.

Les résultats de XFOIL suivent bien ceux de RISO. La courbe du coefficient de traînée (Figure 72) pour un nombre de Mach de 0 est presque confondue avec la courbe numérique de RISO. L'erreur moyenne est de 1.6%. L'erreur moyenne par rapport aux données d'Abbott&Von Doenhoff est de 14.5%. La courbe du coefficient de portance (Figure 71) la plus proche de la solution numérique de RISO est celle avec le nombre de Mach égal à 0. L'erreur moyenne est de 2.4%. L'erreur moyenne par rapport aux données d'Abbott&Von Doenhoff est de 2.1% (Tableau 26).

Tableau 26 : Erreur relative des coefficients de portance et de traînée du profil NACA 63 415 pour un nombre de Reynolds de $3 \cdot 10^6$

Erreur relative (%)	Coefficient de portance		Coefficient de traînée	
	E_{rel}^a (%)	E_{rel}^b (%)	E_{rel}^a (%)	E_{rel}^b (%)
maximale	12	5	22	4.5
angle correspondant	16	17	1	20
moyenne	2.1	2.4	14.5	1.6

Le Tableau 27 présente le coefficient de portance maximale avec l'angle d'attaque correspondant (l'angle de décrochage) ainsi que le rapport maximal des coefficients de portance et traînée avec l'angle correspondant. La Figure 73 présente le rapport des coefficients de portance et traînée en fonction de l'angle d'attaque. Les résultats de XFOIL correspondent aux résultats de références de RISO.

^a Erreur relative calculée par rapport aux données d'Abbott et pour un nombre de Mach égal à 0

^b Erreur relative calculée par rapport aux données de RISO et pour un nombre de Mach égal à 0

Tableau 27 : Coefficient de portance maximal et rapport maximal des coefficients de portance et traînée du profil NACA 63 415 pour un nombre de Reynolds de $\mathcal{R}=3*10^6$

	Abbott	RISO Num	XFOIL ^a
coefficient de portance maximale	1.56	1.71	1.64
angle de décrochage	14	17	18
rapport maximal des coefficients de portance et traînée	115.7	137	135.5
angle d'attaque correspondant au rapport maximal des coefficients de portance et traînée	4	4	4

Il est à remarquer que l'angle de décrochage pour les données de référence n'est pas le même (Tableau 27). L'angle de décrochage pour les données expérimentales d'Abbott est de 14° tandis que celui des données numériques de RISO est de 17°. L'angle de décrochage pour les résultats de XFOIL est de 18° et est dans le même ordre de grandeur que les données numériques de référence.

L'angle d'attaque correspondant au rapport maximal des coefficients de portance et traînée pour les résultats expérimentaux d'Abbott, les résultats numériques de RISO et les résultats de XFOIL est le même, à savoir 4°.

F.3. Impact de la température

L'impact de la température sur les coefficients de portance et de traînée a été évalué en faisant varier celle-ci. Deux températures ont été choisies, soit 15°C et 33°C. Les coefficients de portance et de traînée ont été calculés pour cinq positions radiales sur la pale de l'éolienne MEG (chapitre 3) et pour les deux températures choisies. Les simulations ont été effectuées dans le mode visqueux avec 140 panneaux. Les nombres de Reynolds et de

^a Il s'agit du résultat de XFOIL obtenu pour un nombre de Mach égal à 0

Mach, à chaque position radiale et pour les deux températures choisies, sont répertoriées au Tableau 28. Il est à remarquer que les nombres de Reynolds et de Mach varient très peu avec la température.

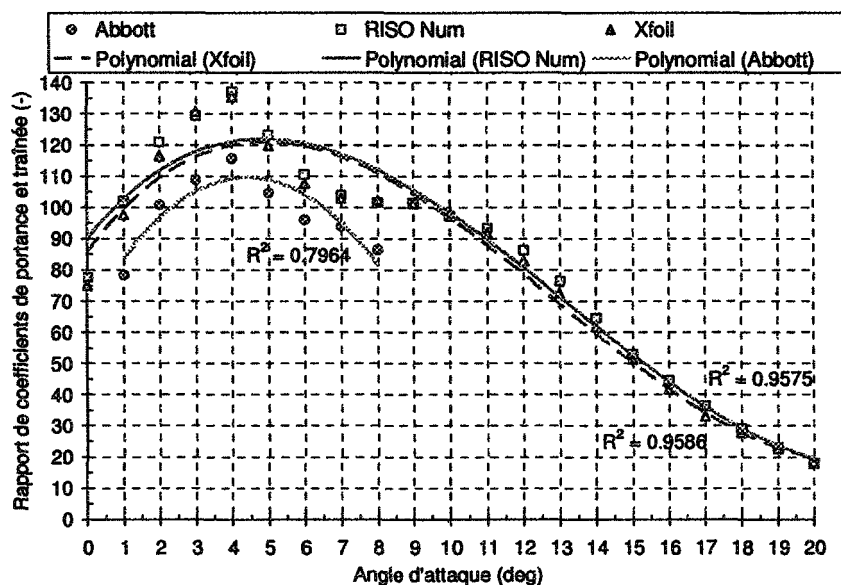


Figure 73 : Rapport des coefficients de portance sur traînée du profil NACA 63 415

Tableau 28 : Nombres de Reynolds et de Mach à cinq positions radiales sur la pale de l'éolienne MEG pour deux températures

profil NACA 63 415			Température de 15°C		Température de 33°C	
Section	Rayon (m)	Corde (m)	Nombre de Reynolds	Nombre de Mach	Nombre de Reynolds	Nombre de Mach
1	8.5	3.22	$3.4 \cdot 10^6$	0.05	$3.2 \cdot 10^6$	0.04
2	15.5	2.61	$4.6 \cdot 10^6$	0.08	$4.3 \cdot 10^6$	0.07
3	22.5	2.00	$5 \cdot 10^6$	0.11	$4.7 \cdot 10^6$	0.1
4	29.5	1.39	$4.5 \cdot 10^6$	0.14	$4.3 \cdot 10^6$	0.14
5	36.5	0.78	$3.2 \cdot 10^6$	0.17	$3 \cdot 10^6$	0.17

Les résultats des coefficients de portance et de traînée pour les deux températures choisies et à une position radiale de 8.5 m, sont présentés à la Figure 74.

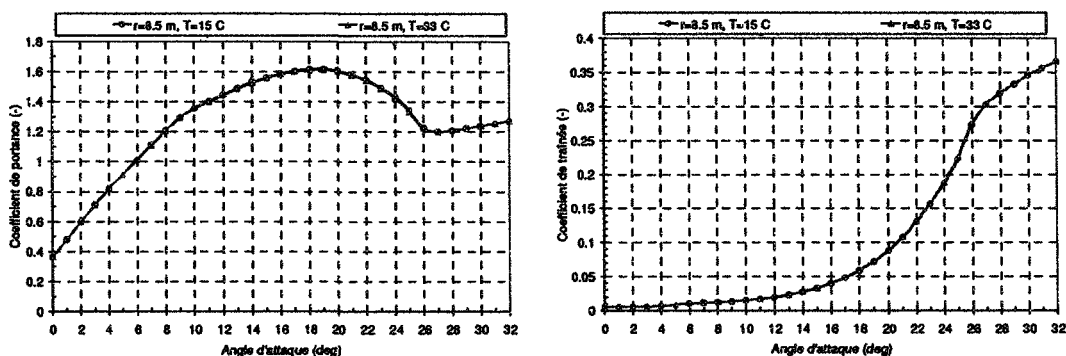


Figure 74 : Impact de la température sur les coefficients de portance et traînée du profil NACA 63 415 de l'éolienne MEG

Les courbes pour les deux températures coïncident parfaitement. Les erreurs relatives maximales à cinq positions radiales sur la pale de l'éolienne MEG sont répertoriées au Tableau 29. L'erreur maximale pour le coefficient de portance ne dépasse pas 1% et celle pour le coefficient de traînée ne dépasse pas 2%. Ces erreurs correspondent à une position radiale de 8.5 m. Étant donné que c'est une section proche du moyeu, elle contribue que très peu à la puissance totale calculée (Figure 27 de la section 3.3.6). Par conséquent l'influence des erreurs à cette position radiale reste minime sur le calcul de la puissance totale. Donc, en conclusion, la température n'a aucun impact sur les coefficients de portance et de traînée du profil NACA 63 415.

Tableau 29 : Erreurs relatives maximales des coefficients de portance et traînée à cinq positions radiales sur la pale de l'éolienne MEG

Erreur relative maximale (%)	Position radiale (m)				
	8.5	15.5	22.5	29.5	36.5
Coefficient de portance	0.8	0.5	0.5	0.4	0.4
Coefficient de traînée	1.8	1.4	1.2	1.3	1.2

E.4. Conclusion

Des simulations numériques sur le profil de pale d'éolienne NACA 63 415 ont été effectuées. Les résultats obtenus ont été comparés aux données expérimentales et aux données numériques de référence. Il a été montré que les résultats de la simulation suivent bien les résultats numériques de référence. La courbe du coefficient de traînée est presque confondue avec la courbe numérique de RISO. L'erreur relative moyenne ne dépasse pas 1.6%. La courbe du coefficient de portance suit la courbe numérique de RISO avec une erreur relative moyenne qui ne dépasse pas 2.4%. Par conclusion, l'utilisation du code commercial XFOIL a été validée.

De plus, le nombre maximal d'itération est juste un critère d'arrêt, qui n'a aucun impact sur les résultats, et qui est nécessaire pour la convergence des résultats. S'il manque certaines valeurs des coefficients de portance et de traînée il suffit d'augmenter les itérations pour obtenir la convergence de la solution.

Le nombre de Reynolds et de Mach ont des impacts sur les résultats. Lorsque le nombre de Reynolds augmente le coefficient de portance augmente et le coefficient de traînée diminue. Lorsque le nombre de Mach augmente le coefficient de portance diminue et le coefficient de traînée augmente. La température n'a aucun impact sur les coefficients de portance et de traînée.

ANNEXE F

Simulation numérique des courbes de puissance avec le logiciel PROPID

F.1. Introduction

Cette annexe porte sur la simulation de la courbe de puissance avec le logiciel PROPID, qui a été conçu pour le design et l'analyse des éoliennes à axe horizontal [46]. Le modèle d'éolien utilisé est le modèle générique MEG représentatif de la Vestas V80 1.8 MW pour une classe de vent IEC 2A, décrit au chapitre 3. Les coefficients de portance et de traînée, nécessaires au logiciel PROPID pour calculer les courbes de puissance de l'éolienne, sont calculés avec le logiciel XFOIL. Les données d'entrées pour PROPID sont répertoriées dans le Tableau 30. Les courbes de puissance obtenues sont comparées aux données de Vestas [51] pour trois températures, soit 5°C, 15°C et 33°C.

Tableau 30 : Paramètres d'entrées de PROPID pour l'étude de l'impact de la température

Paramètres d'entrés	Valeur	Unité
Rayon du rotor	132	ft
Rayon du moyeu	1	m
Hauteur du moyeu	221	ft
Angle de cône du rotor	6	deg
Nombre de pales	3	-
Densité de l'air	varie	slugs/ft ³
Vitesse de rotation	15.2	tours/min
Vitesse de démarrage	4	m/s
Vitesse d'arrêt	25	m/s
Exposant du profil de vent	0	-
Angle de calage	de 2 à 10	deg
Nombre de sections	5	-
Longueur de la corde par section	Tableau 9	m
Angle de vrillage par section	Tableau 9	deg
Coefficients de portance et de traînée des profils par section	Figure 75 et Figure 76	-
Pertes en bout de pale	ignorer	-
Pertes au niveau du moyeu	ignorer	-
Effet du mouvement de « balancier » de l'arbre de transmission	ignorer	-
Modèle après décrochage	viterna	-
Effets du sillage	ignorer	-

F.2. Impact de la température

L'impact de la température sur la puissance a été évalué en faisant varier celle-ci. Trois températures ont été choisies, soit 5°C, 15°C et 33°C.

Les coefficients de portance et de traînée utilisés par PROPID ont été déterminés avec XFOIL à une température de 15°C seulement car dans l'Annexe E il a été démontré que ceux-ci ne varient pas avec la température. Ils ont été calculés pour cinq positions radiales sur l'éolienne MEG et sont présentés aux Figure 75 et Figure 76.

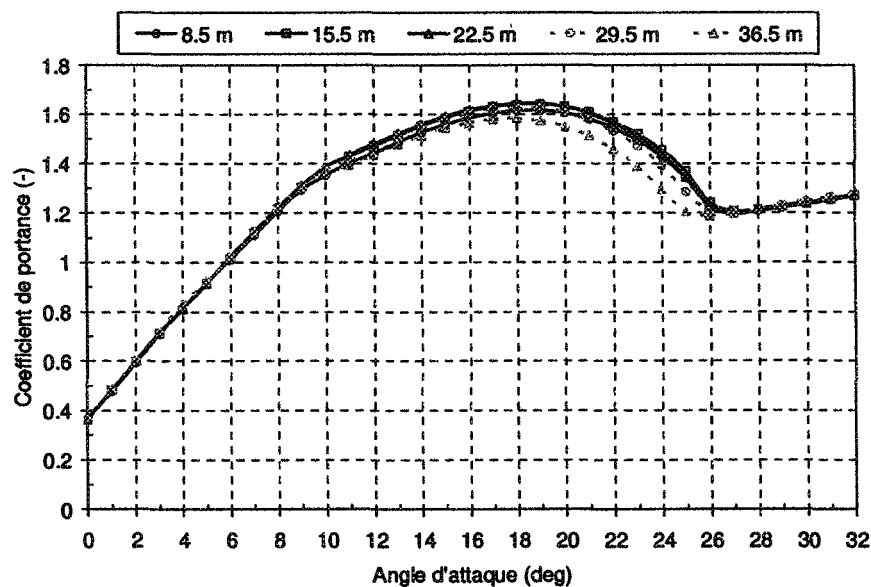


Figure 75 : Coefficients de portance du profil NACA 63 415 de l'éolienne MEG en fonction de l'angle d'attaque et de la position radiale à une température de 15°C

F.2.1. Courbe de puissance

Les courbes de puissance de l'éolienne MEG pour différents angles de calage sont obtenues à l'aide du logiciel PROPID pour les trois températures choisies. Ces courbes sont présentées aux Figure 77, Figure 78 et Figure 79.

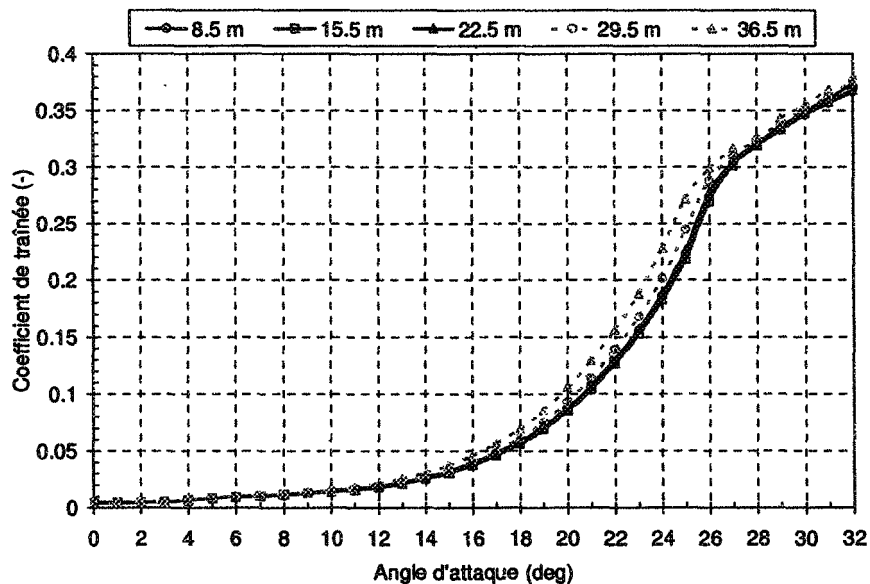


Figure 76 : Coefficients de traînée du profil NACA 63 415 de l'éolienne MEG en fonction de l'angle d'attaque et de la position radiale à une température de 15°C

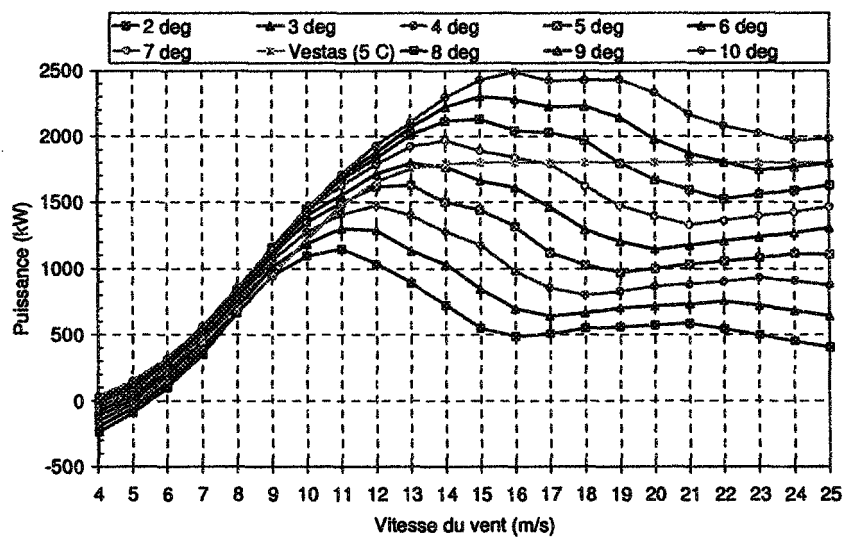


Figure 77 : Courbes de puissance de l'éolienne MEG en fonction de l'angle de calage à une température de 5°C

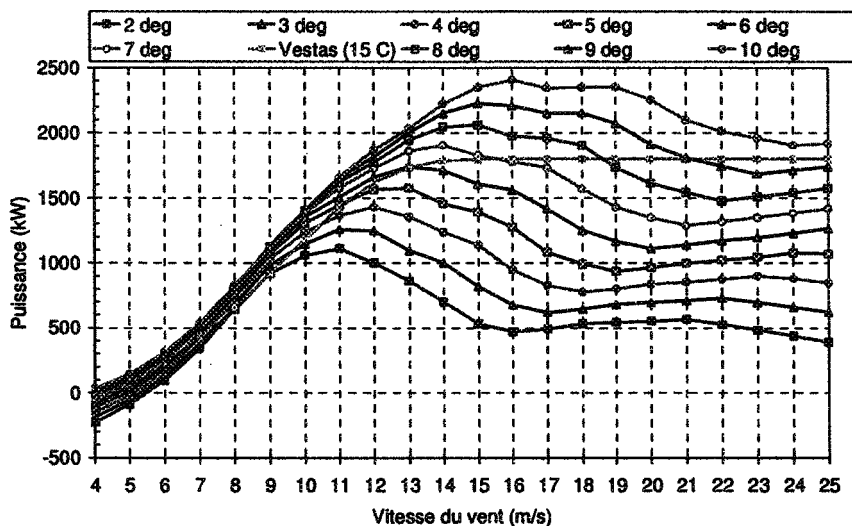


Figure 78 : Courbes de puissance de l'éolienne MEG en fonction de l'angle de calage à une température de 15°C

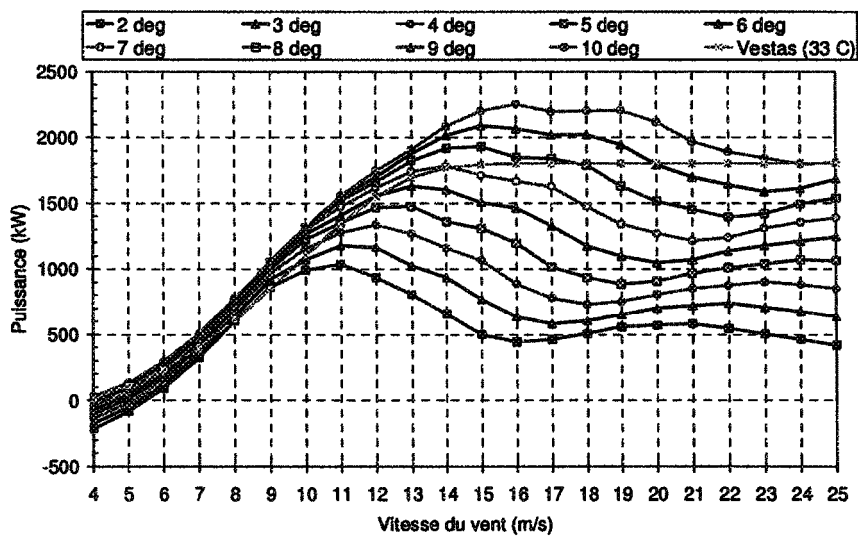


Figure 79 : Courbes de puissance de l'éolienne MEG en fonction de l'angle de calage à une température de 33°C

Étant donné qu'il s'agit d'une éolienne à pas variable, une stratégie de contrôle pour l'angle de calage du MEG est proposée. Elle est applicable pour une éolienne propre ainsi que givrée, et est présentée au Tableau 31.

Tableau 31 : Stratégie de contrôle de l'angle de calage de l'éolienne MEG

<i>I. Données d'entrées</i>	<i>II. Paramètres calculés</i>	<i>IV. Données de sortie</i>
Température Vitesse de vent Coefficient de puissance Puissance nominale Surface du rotor	Densité de l'air Puissance théorique	Angle de calage en fonction de la température et de la vitesse du vent
<i>III. Stratégie de contrôle de l'angle de calage</i>	Pour chaque vitesse de vent trouver l'angle de calage pour lequel la puissance simulée vérifie simultanément les trois conditions suivantes : <ol style="list-style-type: none"> 1. elle est maximale ; 2. elle est inférieure ou égale à la puissance théorique ; 3. elle est inférieure ou égale à la puissance nominale. 	

Les courbes de puissance de MEG, présentées aux Figure 80, Figure 81 et Figure 82, sont obtenues à partir des courbes simulées avec PROPID (Figure 77, Figure 78, Figure 79) en appliquant la stratégie de contrôle de l'angle de calage du MEG, décrite ci-dessus.

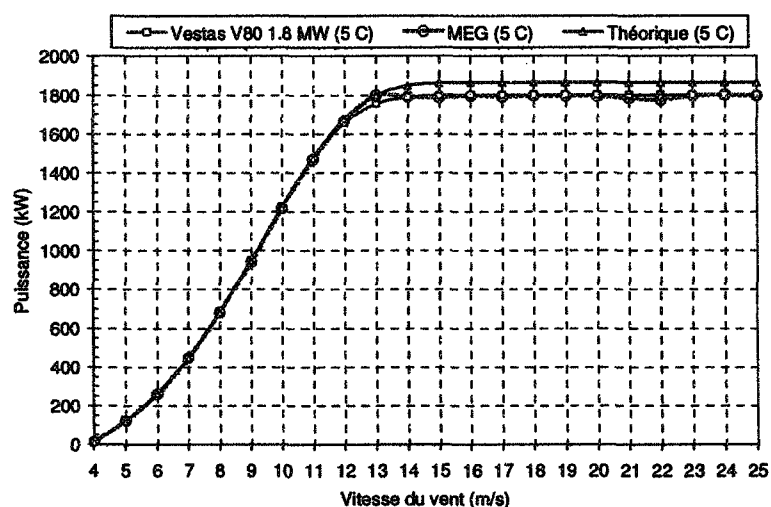


Figure 80 : Courbes de puissance à la température de 5°C

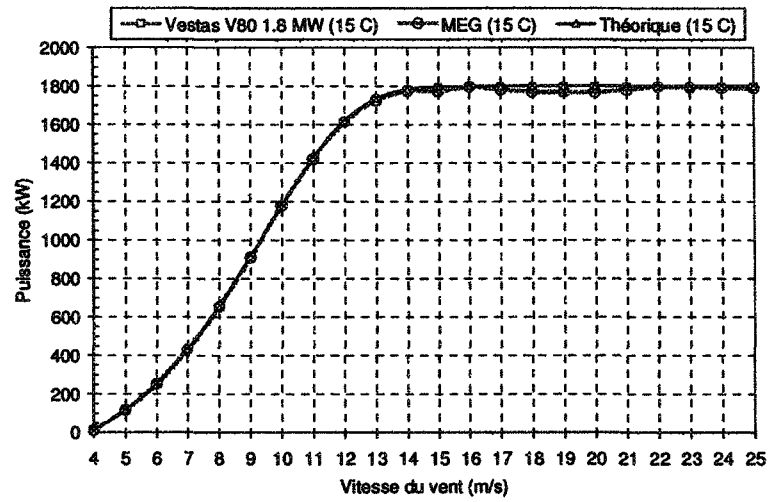


Figure 81 : Courbes de puissance à la température de 15°C

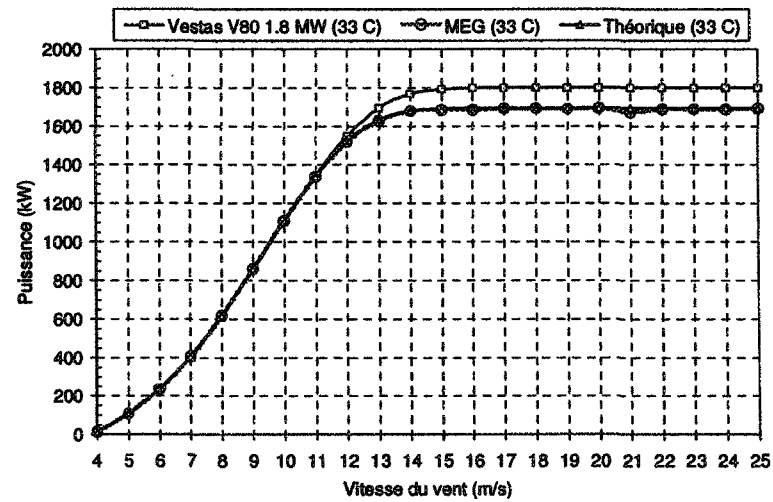


Figure 82 : Courbes de puissance à la température de 33°C

Les courbes de puissance de MEG en fonction de la température, présentées à la Figure 83, montrent que la puissance varie avec la température. Elle diminue lorsque la température augmente. Ceci est dû au fait que la puissance est proportionnelle à la densité de l'air qui varie avec la température.

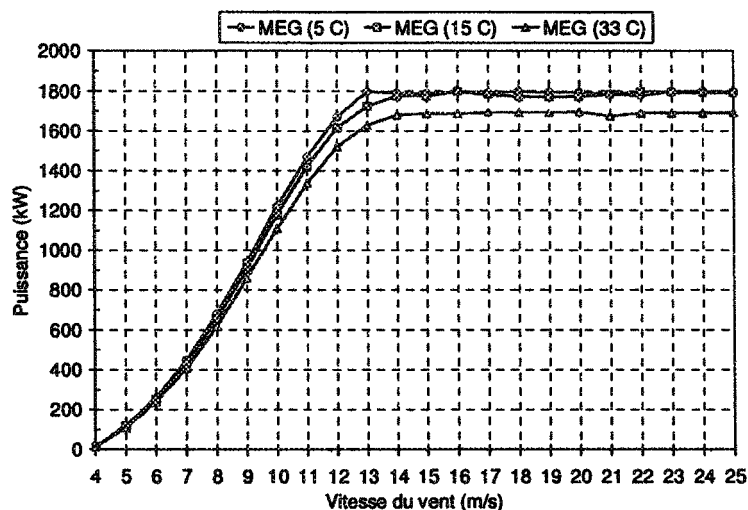


Figure 83 : Courbes de puissance de l'éolienne MEG en fonction de la température

F.2.2. Validation des résultats

Les courbes de puissance de l'éolienne MEG sont comparées aux données théoriques et aux données de Vestas pour trois températures (Figure 80, Figure 81 et Figure 82). Les résultats de la puissance théorique calculées, celles de Vestas et celles simulées sont présentés au Tableau 32.

Les erreurs relatives, calculées par rapport aux données de Vestas et aux données théoriques, pour trois températures, sont répertoriées au Tableau 33. Par rapport aux données théoriques l'erreur relative moyenne à 5°C ne dépasse pas 2.3%, celle à 15°C est inférieure à 0.7% et celle à 33°C ne dépasse pas 0.3%. Par rapport aux données de Vestas l'erreur relative moyenne à 5°C est inférieure à 1.2%, celle à 15°C ne dépasse pas 0.7% et celle à 33°C est inférieure à 5.2%. Lorsque la vitesse de démarrage (4 m/s) n'est pas

considérée l'erreur relative moyenne diminue. Elle ne dépasse pas 0.7% à 5°C, 0.6% à 15°C et 4% à 33°C.

Tableau 32 : Puissance théorique, de la Vestas et du MEG, et angle de calage du MEG en fonction de la vitesse de vent et de la température

Vitesse (m/s)	Calage de MEG (deg)			Puissance (kW)								
				Théorique			Vestas			MEG		
	5°C	15°C	33°C	5°C	15°C	33°C	5°C	15°C	33°C	5°C	15°C	33°C
4	9.1	9.1	9.1	13.4	12.9	12.1	14.9	12.9	9.4	13.2	12.8	12.1
5	8.9	8.9	8.8	120	116	109	122	116	106	120	116	108
6	7.5	7.5	7.5	261	252	237	263	252	234	259	251	236
7	5.1	5.1	5.1	448	432	407	450	432	402	447	432	406
8	2.4	2.3	2.4	681	657	618	683	657	613	681	655	618
9	1.9	1.9	2.0	947	914	860	950	914	854	941	911	860
10	3.4	3.4	3.5	1221	1179	1110	1224	1179	1103	1218	1178	1109
11	4.7	4.7	4.8	1475	1424	1340	1472	1424	1341	1468	1421	1337
12	5.5	5.5	5.6	1677	1619	1524	1656	1619	1549	1668	1614	1520
13	6.0	5.9	6.0	1797	1735	1633	1754	1735	1695	1797	1724	1628
14	6.1	6.3	6.4	1848	1784	1679	1789	1784	1769	1790	1774	1679
15	6.6	6.8	6.9	1862	1797	1691	1798	1797	1793	1787	1773	1684
16	6.8	7.1	7.1	1865	1800	1694	1800	1800	1799	1795	1797	1685
17	7.0	7.2	7.3	1865	1800	1694	1800	1800	1800	1790	1782	1693
18	7.5	7.6	7.7	1865	1800	1694	1800	1800	1800	1796	1771	1692
19	8.0	8.1	8.2	1865	1800	1694	1800	1800	1800	1794	1770	1690
20	8.5	8.6	8.7	1865	1800	1694	1800	1800	1800	1793	1770	1694
21	8.7	8.9	8.9	1865	1800	1694	1800	1800	1800	1784	1782	1672
22	8.9	9.2	9.2	1865	1800	1694	1800	1800	1800	1775	1798	1689
23	9.2	9.4	9.4	1865	1800	1694	1800	1800	1800	1797	1793	1689
24	9.2	9.5	9.5	1865	1800	1694	1800	1800	1800	1800	1791	1688
25	9.0	9.3	9.1	1865	1800	1694	1800	1800	1800	1796	1790	1692

F.3. Conclusion

Des simulations numériques, afin de calculer la courbe de puissance, ont été effectuées pour trois températures, soit 5°C, 15°C et 33°C. Le modèle d'éolienne MEG développé pour représenter l'éolienne Vestas V80 1.8 MW est adéquat. Les résultats

obtenus pour la puissance, comparés aux données de Vestas, ont montré que l'erreur relative moyenne est inférieure à 4%. Pour des vitesses de vent supérieur à 5 m/s le logiciel PROPID peut être validé pour le calcul des courbes de puissance et des coefficients de puissance.

Tableau 33 : Erreurs relatives de la puissance de l'éolienne MEG à trois températures

Vitesse (m/s)	Erreur relative de la puissance (%)					
	Par rapport aux données de Vestas			Par rapport aux données théoriques		
	5°C	15°C	33°C	5°C	15°C	33°C
4	11.5	1.1	28.8	1.3	1.1	0.3
5	1.4	0.3	1.5	0.1	0.3	1.4
6	1.4	0.4	0.9	0.7	0.4	0.5
7	0.7	0.0	1.1	0.2	0.0	0.1
8	0.3	0.3	0.9	0.1	0.3	0.0
9	0.9	0.4	0.7	0.6	0.4	0.0
10	0.5	0.1	0.5	0.3	0.1	0.1
11	0.3	0.2	0.3	0.5	0.2	0.3
12	0.8	0.3	1.8	0.5	0.3	0.2
13	2.4	0.7	4.0	0.0	0.7	0.3
14	0.1	0.6	5.1	3.1	0.6	0.0
15	0.6	1.3	6.1	4.0	1.3	0.4
16	0.3	0.2	6.3	3.8	0.2	0.5
17	0.5	1.0	6.0	4.0	1.0	0.1
18	0.2	1.6	6.0	3.7	1.6	0.1
19	0.4	1.7	6.1	3.8	1.7	0.2
20	0.4	1.7	5.9	3.8	1.7	0.0
21	0.9	1.0	7.1	4.4	1.0	1.3
22	1.4	0.1	6.2	4.8	0.1	0.3
23	0.1	0.4	6.2	3.6	0.4	0.3
24	0.0	0.5	6.2	3.5	0.5	0.4
25	0.2	0.6	6.0	3.7	0.6	0.1
Vitesse (m/s)	Erreur moyenne (%)					
4 à 25	1.2	0.7	5.2	2.3	0.7	0.3
5 à 25	0.7	0.6	4	-	-	-

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T. Ackermann, L. Söder. *Overview of Wind Energy-Status*, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2002, Vol. 6, pp. 67-128.
- [2] H. Camblong 2003. Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thèse du doctorat. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Centre de Bordeaux. France.
- [3] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron. 2006. Solution de stockage de l'énergie éolienne. Rapport interne, LREE 01 - janvier – 2006. Université du Québec à Rimouski - Université du Québec à Chicoutimi.
- [4] ACÉÉ. Association canadienne de l'énergie éolienne. <http://www.canwea.com>
- [5] Analyse de projets d'énergies propres. Manuel d'ingénierie et d'études de cas RETSCREEN® . www.retscreen.net.
- [6] C. Liuchen. *Systèmes de conversion de l'énergie éolienne*. IEEE Canadian Review - Summer / Été 2002.
- [7] C.G. Justus. Vent et performances des éoliennes. Édition SCM. Paris 1980. p.100
- [8] I. Erlich, F. Shewarega. "Introduction of wind power generation into the first course in power systems". IEEE. 2007.
- [9] E. HAU. 2000. Wind-Turbines. Springer.
- [10] H. Ibrahim. juin 2007. Étude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé. Rapport d'examen doctoral. Université du Québec à Chicoutimi.
- [11] A.N. Celik. 2003. *Energy Output Estimation for Small-Scale Wind Power Generators using Weibull – Representative Wind Data*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 91, pp. 693-707.

- [12] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nichita. 2002. *État de l'art dans les aérogénérateurs électriques*.
- [13] T. Laakso, L. Talhaug, K. Vindteknik, G. Ronsten, R. Horbaty, I. Baring-Gould, A. Lacroix, E. Peltola. 2005. *Wind energy projects in cold climates*. Technical Research Centre of Finland. Biologinkuja. Edition 2005. Finland.
- [14] C. Hochart. 2007. Simulation numérique et expérimentale de l'écoulement d'air et de l'accrétion de glace autour d'une pale d'éolienne. Mémoire de maîtrise en ingénierie. Université du Québec à Rimouski.
- [15] T. Laakso, H. Holttinen, G. Ronsten, L. Tallhaug, R. Horbaty, I. Baring-Gould, A. Lacroix, E. Peltola, B. Tammelin. *State-of-the-art of wind energy in cold climates*. IEA R&D Wind. Wind Energy in cold climates. April. 2003. p 33.
- [16] T. Laakso, E. Peltola. 2005. *Review on blade heating technology and future prospects*. BOREAS VII Conference. 7-8th March 2005. Saarislkä. Finland.
- [17] B. Tammelin et al. 1997. *Wind Energy Production in Cold Climate*. European Wind Energy Conference. October. Dublin Castle. Ireland. pp. 347-353.
- [18] H. Seifert. 2004. *Technical requirements for rotor blades operating in cold climate*. DEWI Magazin Nr 24. February 2004.
- [19] H. Seifert, A. Westerhellweg, J. Kröning. 2003. *Risk analysis of ice thrown from wind turbines*. BOREAS VI conference. April 2003. Pyhä. Finland.
- [20] G. Fortin. 2003. Simulation de l'accrétion de glace sur un obstacle bidimensionnel par la méthode des bissectrices et par la modélisation des ruisselets et des gouttes de surface. Thèse de doctorat en ingénierie. Université du Québec à Chicoutimi.
- [21] G. Fortin. 2009. Thermodynamique de la glace atmosphérique. Notes de cours. Université du Québec à Chicoutimi.
- [22] D. Chocron. 1997. Étude numérique de la formation de glace sur les éoliennes à axe horizontal. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées. École Polytechnique de Montréal.

- [23] W.B. Wright. 1995. Users Manual for the Improved NASA Lewis Ice Accretion Code LEWICE 1.6. National Aeronautical and Space Administration (NASA). Contractor Report. pp. 95. May 1995.
- [24] R.W. Gent. 1990. TRAJICE2D. A Combined Water Droplet and Ice Accretion Prediction Program for Aerofoil. Royal Aerospace Establishment (RAE). Farnborough. Hampshire. Technical Report Number TR90054. pp. 83. November 1990.
- [25] D. Guffond, T. Hedde and R. Henry. 1993. Overview of Icing Research at ONERA. Advisory Group for Aerospace Research and Development / Fluid Dynamics Panel (AGARD/FDP) Joint International Conference on Aircraft Flight Safety - Actual Problems of Aircraft Development. Zhukovsky. Russia. pp. 7. August 31 - September 5 1993.
- [26] P. Tran, M.T. Brahimi, I. Paraschivoiu, A. Pueyo, F. Tezok. 1994. Ice accretion on Aircraft Wings with Thermodynamic Effects. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 32nd Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno. Nevada. AIAA-1994-0605. pp. 9. January 1994.
- [27] G. Mingione, V. Brandi. 1998. Ice Accretion Prediction on Multielements Airfoils. Journal of Aircraft. Vol.35. No. 2. March-April 1998.
- [28] H. Beaugendre, F. Morency, W.G. Habashi. 2002. ICE3D. FENSAP-ICE'S 3D In-Flight Ice Accretion Module. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 40th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno. Nevada. AIAA 2002-0385. January 2002.
- [29] K.J. Finstad, L. Makkonen. 1992. "Turbine blade icing model" Proc. International Expert's Meeting on Wind Power in Icing Conditions. BOREAS I. Hetta. Finland. p.35-42.
- [30] L. Makkonen, T. Laakso, M. Marjaniemi, K.J. Finstad. 2001. *Modelling and Prevention of Ice Accretion on Wind Turbines*. Wind Engineering 25 (1) (2001) 3-21.
- [31] H. Seifert. 1992. *Icing of Wind Turbine Rotor Blades During Operation*. BOREAS Conference. Wind power in icing conditions.
- [32] H. Seifert, F. Richert. 1998. *A recipe to estimate aerodynamics and loads on iced rotor blades*. BOREAS IV Conference.

- [33] H. Seifert, F. Richert. 1997. *Aerodynamics of iced airfoils and their influence on loads and power production*. European Wind Energy Conference.
- [34] C. Bak, P. Fuglsang, J. Johansen, I. Antoniou. 2000. *Wind Tunnel Tests of the NACA 63 415 and a modified NACA 63 415 Airfoil*. RISO National Laboratory. Denmark.
- [35] W. Jasinski, S.C. Noe, M. Selig, M. Bragg. 1997. *Wind turbine performance under icing conditions*. AIAA. Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 35th. Reno. NV. January. 6-9 th 1997.
- [36] J.Q. Rong, N. Bose. 1990. *"Power Reduction from Ice Accretion on a Horizontal Axis Wind Turbine"*. Proceedings of the 12th British Wind Energy Association Conference. Norwich. March 27-30 1990.
- [37] www.fmi.fi/research_meteorology/meteorology_9.html
- [38] J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers. 2002. *Wind Energy Explained – Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons Ltd. ISBNs: 0-471-49972-2 (Hardback). 0-470-84612-7 (Electronic).
- [39] T. Diveux. 2000. *Implantation d'un système éolien. Optimisation par algorithmes Génétiques*. Thèse LEPT-ENSAM Bordeaux. 29 septembre 2000.
- [40] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi. 2001. *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons. LTD. ISBNs: 0-471-48997-2 (Hardback). 0-470-84606-2 (Electronic).
- [41] W.K. Ayotte, J.R. Davy, A.P Coppin. 2001. *A Simple Temporal and Spatial Analysis of Flow in Complex Terrain in the Context of Wind Energy Modelling*. Boundary-Layer Meteorology. 2001 Feb; 98(2): 275-295.
- [42] J.V. Seguro, T.W. Lambert. 2000. *Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2000 Mar; 85(1):75-84.
- [43] M.J.M Stevens, P.T. Smulders. 1979. *The estimation of the parameters of the Weibull Wind speed distribution for wind energy utilization purposes*. Wind Engineering. 3(2).

- [44] Z.L.Yang, M. Xie. 2003. *Efficient Estimation of the Weibull Shape Parameter Based on a Modified Profile Likelihood*. Journal of Statistical Computation and Simulation. 2003 Feb. 73(2):115-123.
- [45] R. Hoffmann, P. Mutschler. 2000. «*The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbines*». IEEE IAS Conf. October 2000.
- [46] M. S. Selig with contributions by N. Raj, P. Giguere and Z. Du, *PROPID User Manual (Beta Version 3.0). Aerodynamic Design Software for Horizontal Axis Wind Turbines*. UIUC Applied Aerodynamics Group Department of Aeronautical and Astronautical Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana. Illinois 61801.
- [47] M. Drela. 2001. XFOil 6.94 user guide. MIT Aero & Astro. Harold Youngren. Aerocraft. Inc. 10 December 2001.
- [48] M. Drela. 1989. *XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils*. Conference on Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics. University of Notre Dame. June 1989.
- [49] M. Drela, M.B. Giles. 1987. *Viscous-inviscid Analysis of Transonic and low Reynolds Number Airfoils*. AIAA JOURNAL. vol 25 n°10.
- [51] Anonymous. 2002. V80-1.8 MW OptiSlip 60 Hz Wind Turbine. General Specification. Technical document. Vestas,.Mai 2002. Item no. 944411.R3.
- [52] Anonymous. 2004. V80-1.8MW Pitch regulated wind turbine with OptiSlip and OptiTip. Technical document. Vestas. February 2004.
- [53] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed. *Aérogénérateurs électriques*. Techniques de l'ingénieur. D 3 960.
- [54] Anonymous. 2005. V80-2.0 MW Puissance variable. Technical document. Vestas. Avril 2005.
- [55] Y. U. Sohn. 2004. "*Blade Design of a 750 kW Direct-drive Wind Turbine Generator System*". Beijing. WVEC 2004. 1-4 November 2004.
- [56] F Bertagnolio, N Sorensen, J Johansen, P Fuglsang. 2001. *Wind Turbine Airfoil Catalogue*. RISO National Laboratory. Denmark.

- [57] I.H. Abbott, A.E. Von Doenhoff. 1950. THEORY OF WING SECTIONS including a summary of airfoil data. DOVER Publications. Inc. New York.
- [58] G. Fortin, C. Hochart, J. Perron, A. Ilinca. 2005. Caractérisation des conditions météorologiques et du givre sur le site de l'ancienne mine de Noranda à Murdochville durant la campagne de mesure 2004-2005. Rapport technique. 166p.
- [59] D. Le Goulières. 1980. Énergie éolienne: Théorie, conception et calcul pratique des installations. EDITIONS EYROLLES. Paris. p.93-94.
- [60] C. Hochart, G. Fortin, J. Perron, A. Ilinca. 2007. *Wind turbine performance under icing conditions*. Wind energy. John Wiley & Sons, Ltd.
- [61] G. Fortin, J. Perron, A. Ilinca. 2006. Caractérisation des conditions météorologiques et givrantes du site de l'ancienne mine Gaspé de Noranda à Murdochville durant la campagne de mesure 2005-2006. Rapport technique. 165p.
- [62] G.Fortin, J.Perron, A.Ilinca. 2005. *A Study of Icing Events at Murdochville: Conclusions for the Wind Power Industry*. Colloque international «énergie éolienne et sites éloignés». Îles de la Madeleine. 19-21 October 2005.
- [63] C. Mayer. 2007. Système électrothermique de dégivrage pour une pale d'éolienne : simulations en soufflerie réfrigérée et impact sur la puissance produite. Mémoire de maîtrise en ingénierie. Université du Québec à Rimouski.
- [64] D.N. Anderson. Manual of Scaling Methods. Ohio Aerospace Institute. Brook Park. Ohio. NASA/CR—2004-212875. March 2004
- [65] Anonymous. 2008. Énergie pure, potentiel illimité. Une planète, une industrie, un avenir. TechnoCentre éolien. Centre CORUS.
- [66] I. Paraschivoiu. 1998. AÉRODYNAMIQUE SUBSONIQUE. Éditions de l'école Polytechnique de Montréal.
- [67] <http://aerofoilengineering.com/Help/HelpNacaNames.htm>
- [68] <http://people.clarkson.edu/~pmarzocc/AE429/The%20NACA%20airfoil%20series.pdf>