

UNIVERSITE DE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Construction mécanique

CARACTERISATION MECANIQUE ET VIBRATOIRE D'UNE EOLIENNE

Par :

KHELIFI CHERIF

Devant le jury composé de :

A. AIAD	Maître de conférence, U. Blida.	Président
A. ALLALI	Maître de conférence, U. Blida.	Examineur
S. ABUDURA	Maître de conférence, U. Médéa.	Examineur
M. OUALI	Professeur , U. Blida.	Rapporteur

Blida, Novembre 2009

Résumé

L'analyse des différents travaux effectués dans les laboratoires ou sur sites réels dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique a permis d'établir une approche de modélisation d'aide à la conception d'une machine tournante mue par le vent à axe horizontal tripales dédiée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne de moyenne puissance. Après une présentation générale du concept et du génie éolien dans le vent, on expose la modélisation aérodynamique modale et vibratoire du rotor éolien en vue de produire le maximum d'énergie pour un site donné. Des solutions sur l'adaptation du générateur éolien au régime du vent et des techniques de couplage du rotor au générateur de courant à vitesse variable sont aussi détaillées.

Mots Clés : énergie éolienne, aérogénérateur tripales, vitesse du vent, puissance du vent, modélisation, optimisation, analyse modale.

ملخص

إن تحليل مختلف الأعمال التي أجريت في المخابر أو في المواقع الحقيقية في مجال تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية مكن من تأسيس مقارنة نموذجية للمساعدة في التصميم لآلة دورانية تشتغل بالرياح ذات محور أفقي بثلاث ريشات موجهة لسلسلة تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية متوسطة الاستطاعة.

بعد لمحة عامة عن مبدأ وهندسة تحويل طاقة الرياح، نعرض النمذجة الديناميكية الهوائية، والاهتزاز الطبيعي للمروحة الهوائية المصممة لإنتاج طاقة قصوى على موقع معين. لقد تم تفصيل بعض الحلول حول كيفية تكيف المولد الكهربائي للمروحة مع سرعة الرياح.

الكلمات الرئيسية : طاقة الرياح، مروحة ثلاثية الريش، سرعة الرياح، استطاعة الرياح، النمذجة، قصوى، تحليل الإهتزازات الحرة.

Abstract

The analysis of the different works made in laboratory and in outdoor from the wind energy conversion to the electrical energy has allowed developing a modelization approach for helping design of rotate machine functioning with the wind. This wind turbine is build by three blades disposed on horizontal axis. The conversion chain produces a mean power. After giving the general wind concept, we are exposed the aerodynamic and pulse model of the wind rotor able to produce the maximum wind power in real site. Solutions on the adaptation of the wind generator to the wind regime and the technical coupling between the wind turbine and the generator are also detailed.

Key Works: wind energy, aerogenerator (3 blades), wind speed, wind power, modelization, optimization, modal analysis.

Remerciements et dédicaces

Je tiens a remercier mon Dieu tout puissant qui m'a donné la santé, la volonté et la patience pour terminer ce mémoire.

Je remercie mes enseignants qui m'ont dirigé tout au long de ce cursus d'étude.

Je dédie ce mémoire

A ma grande et petite famille qui m'ont souhaité de réussir

A Mes enfants Akram et Ikram

Sommaire

Résumé	2
Remerciements	4
Sommaire	5
Nomenclature	8
Liste des illustrations, Graphiques et Tableaux	10
Introduction générale	12
Chapitre I : Etat de l'art sur l'éolien et les machines mues par le vent	17
1.1 Historique de l'éolien	18
1.2 Connaissances théoriques sur l'éolien	18
1.2.1 Modélisation du vent	18
1.2.2 Vitesse éolienne utile	21
1.3 Principes et classement des machines éoliennes	22
1.3.1 Eoliennes à axe verticale	25
1.3.1.a Rotor à traînée différentielle	25
1.3.1.b Rotor à variation cyclique d'incidence	26
1.3.2 Eoliennes à axe horizontal	27
1.3.2.a Courbes caractéristiques	27
1.3.2.b Configurations de montage des voilures	29
1.3.2.c Régulation des éoliennes	29
1.3.2.d Conversion de l'énergie éolienne (Loi de Betz)	30
1.3.2.e Fonctionnement d'une pale d'éolienne	33
1.4 Générateurs électriques	34
1.4.1 Machine synchrone	34
1.4.2 Machine asynchrone	35
1.4.3 Machine à courant continu	36
1.4.4 Application des générateurs électriques à l'énergie éolienne	36
1.5 Comportement aérodynamique d'une voile de navire	36
1.5.1 Propulsion par la traînée	38
1.5.2 Propulsion par la portance	38
Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM	39
2.1 Introduction	40
2.2 Effet du déplacement axial du fluide	40
2.3 Effet de la rotation du fluide	44
2.4 Théorie de l'élément de pale	48
2.5 Couplage des deux méthodes (moment axial et élément de pale)	50

2.6	Correction des pertes de puissance	51
2.6.1	Pertes de puissance en bout de pale	52
2.6.2	Perte de puissances pour les inductions élevées	53
2.7	Conception du rotor pour le maximum de puissance	53
2.7.1	Optimisation de la corde des pales	53
2.7.2	Optimisation de l'écoulement d'air	54
2.7.3	Linéarisation du coefficient de portance	54
2.7.4	Adéquation du calage des pales à la fabrication	55
2.8	Modélisation et simulation géométrique de la corde	55
2.9	Algorithme de conception aérodynamique optimale du rotor éolien	57
2.10	Conclusion	64
Chapitre III	: Modélisation des contraintes mécaniques sur le rotor	65
3.1	Introduction	66
3.2	Les charges sur le rotor de l'éolienne	67
3.2.1	Forces de cisaillement de la pale	67
3.2.2	Forces de poussée sur la pale	68
3.2.3	Forces de masse sur la pale	69
3.2.4	Forces d'inertie sur la pale (effet gyroscopique)	69
3.3	Contrainte dans le support de la pale	71
3.3.1	Contrainte de cisaillement	71
3.3.2	Contrainte de traction_compression	71
3.3.3	Contrainte de flexion	71
3.3.4	Contrainte équivalente	72
3.3.5	Section admissible du support de la pale	72
3.3.6	Simulation des contraintes maximales sur le rotor ($V = 25m/s$)	73
3.4	Conclusion	75
Chapitre IV	: Modélisation et analyse vibratoire de l'éolienne	76
4.1	Introduction	77
4.2	Vibration longitudinale de la pale	78
4.3	Vibration latérale de la pale	79
4.4	Approximation des modes propres de la pale par la méthode de Rayleigh	81
4.4.1	1 ^{ère} approximation : Déformée quadratique	81
4.4.2	2 ^{ème} approximation : Déformée sous charge ponctuelle en bout	82
4.4.3	3 ^{ème} approximation : Déformée sous l'action du poids propre	82
4.5	Estimation des modes propres de l'éolienne par la méthode de Rayleigh	83
4.5.1	1 ^{ère} approximation : Modèle des résistances des matériaux	84
4.5.2	2 ^{ème} approximation : Déformée quadratique	84
4.5.3	3 ^{ème} approximation : Déformée sous charge ponctuelle en bout	84
4.5.4	4 ^{ème} approximation : Déformée sous l'action du poids propre	85
4.6	Energie de déformation de l'éolienne	85
4.7	Analyse de la résonance de la pale en vibration transversale	86
4.8	Modélisation et analyse du flottement de la pale	91
4.9	Modélisation dynamique de l'éolienne par un modèle multimasses	91

4.9.1	Paramètres physiques de réduction du modèle	92
4.9.2	Modèle numérique équivalent de l'éolienne à n masses	93
4.9.3	Modèle numérique équivalent de l'éolienne à trois masses	93
4.9.4	Résolution et analyse modale du système équivalent à trois masses	94
4.10	Conclusion	98
Chapitre V	Modélisation du couplage du rotor éolien au générateur électrique	99
5.1	Introduction	100
5.2	Couplage du rotor_générateur avec des caractéristiques connues	100
5.3	Couplage rotor_générateur avec des caractéristiques inconnues	100
5.3.1	Couplage direct rotor_générateur à vitesse variable	101
5.3.2	Linéarisation et optimisation du facteur de puissance	102
5.3.3	Illustration de la méthode de couplage	104
5.4	Modélisation de la puissance produite par l'aérogénérateur	105
5.4.1	Modèle linéaire	106
5.4.2	Modèle Polynomial	107
5.4.3	Modèle logarithmique	108
5.5	Adaptation de la machine éolienne au régime du vent	110
5.5.1	Modélisation graphique de la disponibilité énergétique	111
5.5.2	Modélisation numérique de la disponibilité énergétique	112
5.6	Conclusion	114
	Conclusion générale	115
	Perspectives	119
	Bibliographie	120

Nomenclature

V, V_1 : Vitesse du vent à l'infini amont du rotor	[m/s]
V_{ax} : Vitesse du vent sur l'axe du rotor	[m/s]
V_2 : Vitesse du vent à l'infini aval	[m/s]
V_u : Vitesse utile du vent	[m/s]
U : Vitesse du bout du pale	[m/s]
W : Vitesse relative du vent	[m/s]
Ω : Vitesse de rotation du rotor	[rad/s]
Ω_G : Vitesse de rotation du générateur	[rad/s]
V_{in} : Vitesse de démarrage de l'éolienne	[m/s]
V_r : Vitesse de référence (nominale) de l'éolienne	[m/s]
V_{out} : Vitesse d'arrêt de l'éolienne	[m/s]
ω : Vitesse de rotation de la tête de l'éolienne	[rad/s]
ω_r : Vitesse de rotation de référence (naturelle)	[rad/s]
λ : Vitesse spécifique de l'éolienne	--
λ_d : Vitesse spécifique de design	--
λ_r : Vitesse spécifique locale le long de la pale	--
R : Rayon du rotor	[m]
r : Rayon vecteur local le long de la pale	[m]
c : Corde de la pale	[m]
ν : Solidité de la pale	--
N_p : Nombre des pales	--
c_L : Facteur de portance	--
c_D : Facteur de traînée	--
C_p : Facteur de puissance aérodynamique	[%]
C_q : Facteur de couple aérodynamique	[%]
C_f : Facteur de force aérodynamique	[%]
α : Angle d'incidence du vent	[degrés]
ϕ : Angle d'écoulement relatif du vent	[degrés]
β : Angle de calage des pales	[degrés]
θ : Angle azimutal du rotor	[degrés]
ψ : Angle d'orientation de la tête de l'éolienne	[degrés]
χ : Angle des moments	[degrés]
ρ : Masse volumique de l'air	[kg/ m ³]
ρ_0 : Masse volumique du matériau	[kg/ m ³]
a : Facteur d'induction axiale	--
a' : Facteur d'induction tangentielle	--
A_1 : Section du tube de courant à l'infini amont	[m ²]

A_2 : Section du tube de courant à l'infini aval	[m ²]
A : Surface du disque rotor	[m ²]
A_b : Section de la pale	[m ²]
A_t : Section du mat (tour) de l'éolienne	[m ²]
u : Déplacement longitudinal	[m]
w : Déplacement transversal	[m]
P^+ : Pression amont du rotor dans le tube de courant	[kPa]
P^- : Pression aval du rotor dans le tube de courant	[kPa]
P_a : Pression atmosphérique loin du rotor	[kPa]
I_b : Moment quadratique de la pale	[m ⁴]
I_t : Moment quadratique du mat	[m ⁴]
I : Moment d'inertie du rotor	[Nms ²]
I_G : Moment d'inertie du générateur	[Nms ²]
F_a : Force axiale sur le rotor	[kN]
F_r : Force radiale sur le rotor	[kN]
F_t : Force tangentielle sur le rotor	[kN]
M_a : Moment axial sur le rotor	[kNm]
M_t : Moment tangentiel sur le rotor	[kNm]
τ_{bc} : Contrainte de cisaillement	[MPa]
σ_{br} : Contrainte de traction_compression	[MPa]
σ_{ba} : Contrainte de flexion	[MPa]
P : Puissance disponible sur le rotor éolien	[kW]
$P_{méc}$: Puissance produite par l'aérogénérateur	[kW]
P_G : Puissance produite par l'aérogénérateur	
E_r : Energie de référence de l'éolienne	[kWh]
E : Energie réellement produite par l'éolienne	[kWh]
e_{sys} : Energie spécifique du système	[--]

Liste des illustrations, Graphiques et Tableaux

Figure 1.1 : Leaders mondiaux de production d'énergie éolienne en 2005 [15]	14
Figure 1.2 : Taille des éoliennes www.ademe.fr (2005)	15
Figure 1.3 : Exemple de la rose des vents [11]	20
Figure 1.4 : Répartition statistique de Weibull pour le vent	21
Figure 1.5 : Photo d'aérogénérateur tripale Nordex N60 (1300 kW)	23
Figure 1.6 : Rotors à axes verticaux	26
Figure 1.7 : Caractéristiques des éoliennes [6]	27
Figure 1.8 : Caractéristiques réelles et estimées d'une éolienne	28
Figure 1.9 : Puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [3]	28
Figure 1.10 : Configuration de montage des voilures	29
Figure 1.11 : Tube de courant autour d'une éolienne	30
Figure 1.12 : Coefficient de puissance de l'éolienne	31
Figure 1.13 : Puissance mécanique d'une éolienne	32
Figure 1.14 : Coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque effectif	33
Figure 1.15 : Générateurs électriques	34
Figure 1.16 : Comportement aérodynamique d'une voile de navire	36
Figure 2.17 : Volume de contrôle associé au disque rotor	40
Figure 2.18 : Influence de l'induction axiale sur les performances du rotor	43
Figure 2.19 : Performances énergétiques du rotor $C_{p\max}$, $C_{q\max}$ en fonction de λ	46
Figure 2.20 : Influence de l'induction axiale a sur la vitesse spécifique locale du rotor λ_r	47
Figure 2.21 : Influence de l'induction tangentielle a' sur la vitesse spécifique locale du rotor λ_r	47
Figure 2.22 : Variation de l'induction axiale a sur l'induction tangentielle a'	48
Figure 2.23 : Forces aérodynamiques locales agissant sur un élément de pale	49
Figure 2.24 : Apport des corrections du facteur de poussée en fonction de l'induction	53
Figure 2.25 : Distribution géométrique de la corde	57
Figure 2.26 : Algorithme de calcul des performances aérodynamiques optimales du rotor	59
Figure 2.27 : Distribution de la corde optimale et simulée le long de la pale	61
Figure 2.28 : Distribution de l'angle de calage et d'écoulement d'air le long de la pale	61
Figure 2.29 : Distribution de la force tangentielle le long de la pale	63
Figure 2.30 : Influence de la vitesse spécifique sur le facteur de puissance	63
Figure 2.31 : Influence du pas d'incrémentation sur le facteur de puissance	64
Figure 3.32 : Modèle d'une éolienne typique	66
Figure 3.33 : Élément de pale en rotation	67
Figure 3.34 : Force axiales et tangentielles sur un élément de pale	68
Figure 3.35 : Mouvement simultané du rotor et de la tête de l'éolienne	71
Figure 3.36 : Forces sur le rotor	73
Figure 3.37 : Moments sur le rotor	74
Figure 3.38 : Contraintes sur le rotor	74
Figure 3.39 : Direction du moment total sur le rotor χ	75
Figure 3.40 : Section admissible de la pale	75
Figure 4.41 : Modèle poutre de la pale de l'éolienne	77
Figure 4.42 : Modes propres en traction_compression des pales de l'éolienne	79
Figure 4.43 : Fonction et fréquence des modes propres en flexion des pales de l'éolienne	80
Figure 4.44 : Modes propres en flexion de la pale	81

Figure 4.45 : Modèle simplifié de l'éolienne	83
Figure 4.46 : Modèle de la masse des pales et de la nacelle	83
Figure 4.47 : Modèle vibratoire de Rayleigh pour la pale de l'éolienne	86
Figure 4.48 : Facteur d'amplification en fonction de la pulsation réduite	87
Figure 4.49 : Modèle 2D du flottement de la pale	89
Figure 4.50 : Modèle d'entraînement électromécanique d'une ligne d'arbre en torsion	91
Figure 4.51 : Digramme structurel du modèle trimasses	83
Figure 4.52 : Fonction de transfert du modèle trimasses $H(s) = \frac{\Omega(s)}{Q(s)}$	96
Figure 4.53 : Fonction de transfert H_{11} des différents modèles	97
Figure 5.54 : Courbe caractéristique rotor_générateur	100
Figure 5.55 : Influence du facteur $a = \lambda_{\max} / \lambda_d$ sur le rapport de puissance $P(V) / P(V_d)$	103
Figure 5.56 : Puissance produite par un aérogénérateur	105
Figure 5.57 : Influence de l'exposant C_{te} sur le rapport des vitesses V_d / V_{in}	107
Figure 5.58 : Indice spécifique de performance ISP de l'aérogénérateur	108
Figure 5.59 : Vitesse de design en fonction de la vitesse de démarrage de la roue $V_d = f(V_{in})$	109
Figure 5.60 : Indice de performance de l'aérogénérateur $IPS = f(V)$	110
Figure 5.61 : Production et disponibilité énergétique d'une éolienne (Méthode graphique)[3]	111
Figure 5.62 : Simulation de l'énergie spécifique de l'éolienne en fonction de la vitesse moyenne du site.	114
Figure 5.63 : Energie produite par l'aérogénérateur en fonction de la vitesse moyenne du site	114
Table 1.1 : Rugosité du terrain d'installation des éoliennes	19
Table 2.2 : Caractéristiques aérodynamiques optimales théorique du rotor éolien	46
Table 2.3 : Rayon du rotor éolien en fonction de la vitesse moyenne du vent $V_{in} = 4[m/s]$, $V_{out} = 25[m/s]$, $R = 6.3m$	57
Table 2.4 : Caractéristiques optimales de quelques profils aérodynamiques	58
Table 2.5 : Forme aérodynamique optimale de la pale	60
Table 2.6 : Simulation des efforts aérodynamiques sur le rotor ($V = 25m/s$, $\beta(r)$: Linéaire)	62
Table 2.7 : Influence du calage de la pale sur les efforts sur le rotor	62
Table 3.8 : Section admissible du support de la pale A_b [cm ²], calculée pour $V = 25m/s$	73
Table 4.9 : Comparaison des méthodes de calcul de la fréquence fondamentale de la pale	84
Table 4.10 : Comparaison des méthodes de calcul de la fréquence fondamentale de l'éolienne	85
Table 4.11 : Pôles et résidus du modèle de l'éolienne à trois masses	94
Table 4.12 : Caractéristiques dynamiques du système amorti	97
Table 5.13 : Paramètres de conception d'un aérogénérateur avec des caractéristiques inconnues	101

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les énergies dans le monde se divisent en trois catégories : les énergies conventionnelles basées sur les hydrocarbures (le pétrole et le gaz), les énergies nouvelles basées sur le nucléaire (Uranium Thorium etc.) et les énergies renouvelables basées directement ou indirectement sur le solaire (le photovoltaïque, la thermodynamique, le biogaz, la géothermie, l'éolien...etc.).

Le dossier des énergies renouvelables est un dossier complexe : il comporte de nombreuses filières aux caractéristiques bien individualisées, susceptibles de répondre au cas par cas, à des besoins diversifiés de chaleur, de force motrice fixe ou mobile. A l'opposé des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des flux d'énergie dilués et intermittentes soumises aux aléas de la nature non transportables sous forme brute. En revanche, leur répartition régionale est relativement régulière par rapport aux énergies fossiles. Chaque région du monde dispose au niveau local, sous une forme ou une autre (solaire, biomasse, vent, hydraulique, etc.) de gisements renouvelables importants dont l'exploitation potentielle pourrait jouer un rôle majeur dans leurs bilans énergétiques.

Les progrès technologique et industriel poussent à une grande consommation d'énergie et ceci depuis quelques décennies. Le démantèlement de centrales nucléaires, l'industrialisation des pays asiatiques et l'affaiblissement des ressources fossiles peuvent entraîner à une crise énergétique mondiale. Dans le souci de satisfaire à toute la demande énergétique de la société, il est impératif de chercher et d'opter pour des solutions adaptées. On peut agir sur la consommation des récepteurs d'énergie et la productivité des centrales énergétiques. On peut aussi rechercher et développer de nouvelles sources d'énergie telles que la fusion (deutérium et tritium 8010^{15} à 10^{21} kWh) qui est encore au stade expérimental. La solution actuelle réside en la disponibilité des ressources énergétiques renouvelables, propres, inépuisables et exploitables à des coûts compétitifs. L'enjeu est si grand qu'il mérite de mobiliser les moyens et déployer les efforts pour réussir [11].

Dans cette optique générale, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui est l'une des plus prometteuses sources d'énergie (5-50 kWh/an exploitables) avec un taux de croissance européen et mondial très élevé (Figure 1.1). Ainsi on remarque une tendance vers une décentralisation énergétique progressive par la production de petites et moyennes quantités d'énergie localisées : électrification rurale pour l'autoconsommation ou la transformation vers d'autres vecteurs énergétiques, pompage, traitement des eaux, etc.... [11]

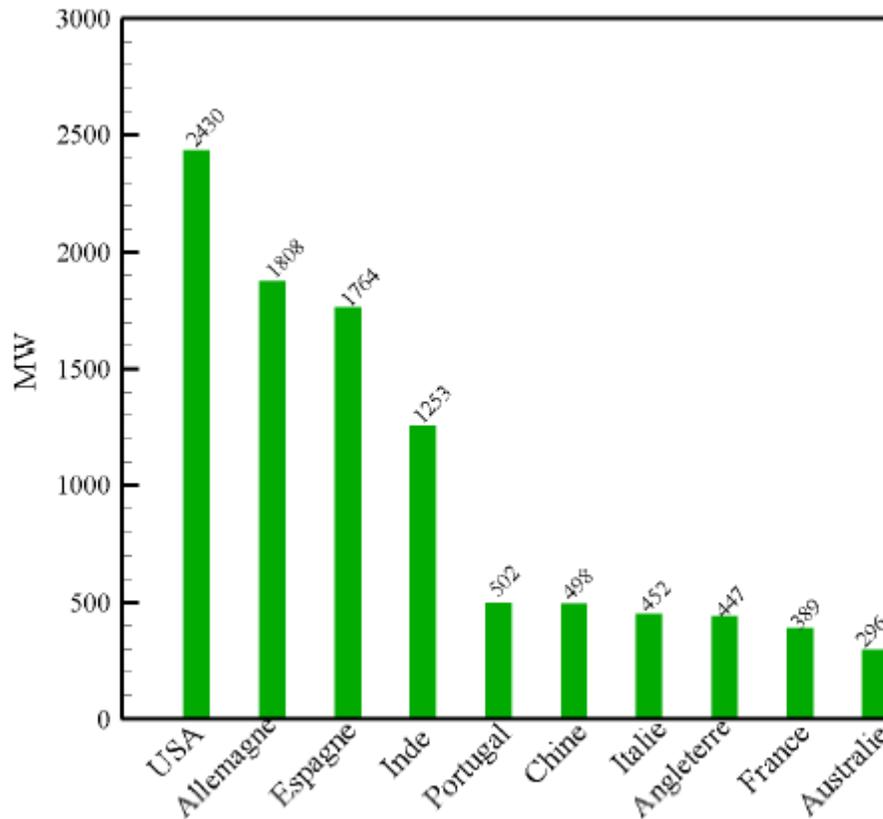


Figure 1.1 : Leaders mondiaux de production d'énergie éolienne en 2005 [15]

La fréquence de rotation des machines tournantes mues par le vent (les aérogénérateurs) est fixée par les machines et l'état d'avancement de la technique et la technologie des chaînes de conversion d'énergie utilisées (**Figure 1.2**). En gros : on rencontre les machines lentes pour l'exhaure de l'eau et rapides pour la production d'électricité. Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance de référence désirée. La taille de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximale que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes sur les pales sous l'action de la force centrifuge de rotation. Il est essentiel de prendre en compte la fatigue des pales et les risques de vibration surtout pour les pales longues. D'autre part, il faut tenir compte des rapports de vitesses spécifiques, qui déterminent le rendement de l'hélice par rapport à la limite de Betz, selon le type des machines.

Introduction générale

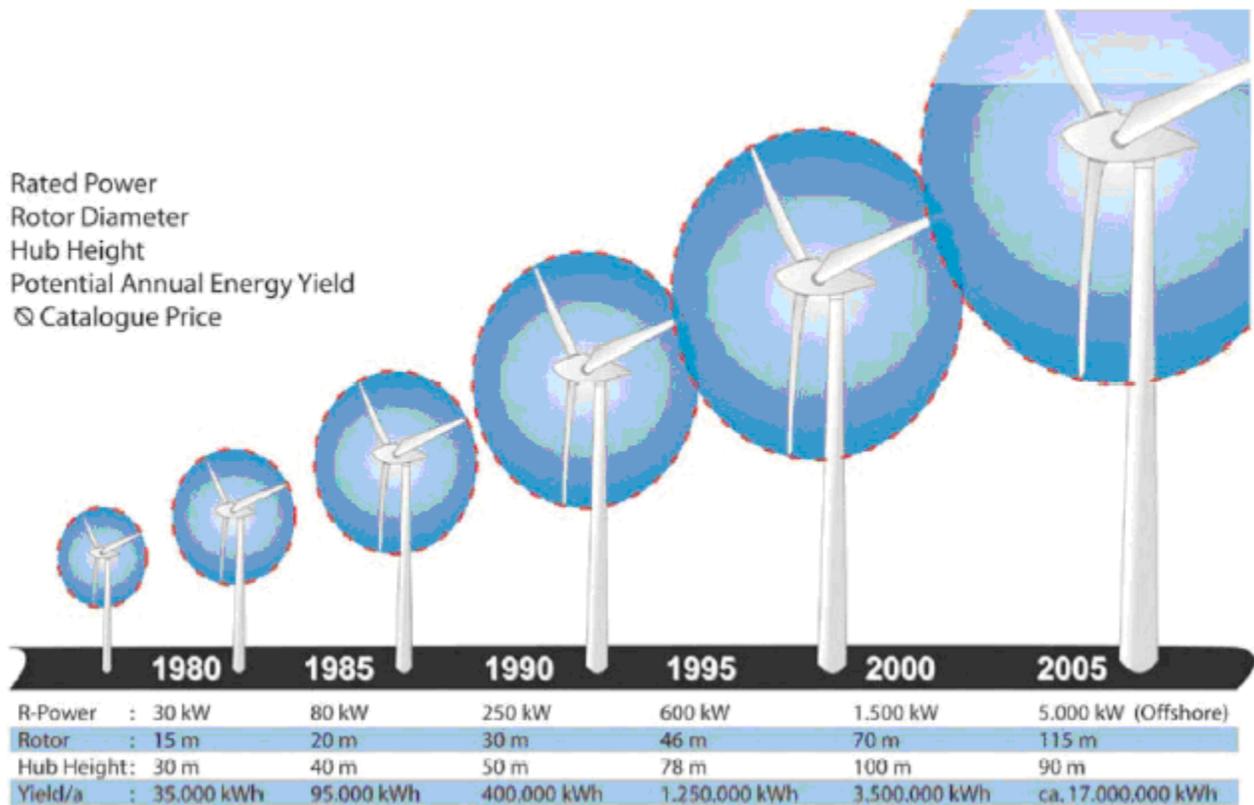


Figure 1.2 : Taille des éoliennes www.ademe.fr (2005)

En général, presque tous les types de générateurs électriques ont été utilisés pour la conversion de l'énergie éolienne, seulement le choix du générateur à coupler avec le rotor éolien doit s'effectuer soigneusement selon le régime de fonctionnement, la facilité de synchronisation, la simplicité de maintenance et le coût de la machine. Lorsque la caractéristique (puissance_vitesse) du rotor éolien et du générateur électrique est connue, la procédure de couplage est directe. Mais du fait que le générateur électrique nécessite une grande vitesse de rotation 1000 à 1500 tours/min, le recours à un multiplicateur de vitesse pour lequel il faudrait déterminer le rapport de multiplication optimal dans une soufflerie ou via des abaques préétablies est nécessaire. La tâche est plus compliquée qu'il nous paraît du fait que la relation puissance_vitesse dépend du type de générateur, du facteur de puissance, de la demande à satisfaire et du mode de fonctionnement (vitesse fixée ou variable, générateur connecté au réseau ou non). Souvent, les caractéristiques du générateur et du rotor éolien ne sont pas disponibles, et on désire concevoir un rotor pour un générateur donné. Dans ce cas, des informations supplémentaires sur les vitesses de fonctionnement sont nécessaires.

La synthèse des travaux de recherche_développement dans le domaine éolien, montre que les modèles utilisés sont aussi nombreux que les objectifs recherchés. A titre d'orientation, on cite certains travaux jugés primordiaux dans le domaine éolien :

Introduction générale

- [9, 11, 12, 45, 50] : présentent des modèles susceptibles d'étudier l'adéquation topographique, météorologique et aérodynamique d'un site pour l'installation des éoliennes.
- [2, 5, 6, 7, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 40] : exploitent le développement acquis dans le domaine de l'aéronautique et examinent le comportement aérodynamique des pales pour des fins de conception et d'optimisation des éoliennes selon des critères bien définis sur les charges et les vitesses du vent.
- [14, 22, 23, 24, 25, 29, 36, 38] s'intéressent particulièrement à la dynamique de structure des composantes de l'éoliennes en matière de robustesse et de dimensionnement de l'ensemble du système éolien afin d'éviter la fatigue précoce du système éolien.
- [12, 34, 35] Les modèles stochastiques de prédiction météorologiques autorisent la prédiction à court terme de la puissance produite par une éolienne pour des fins de régulation de la tension du réseau électrique dans le cas d'une intégration d'éolienne de puissance importante.
- [27, 33] Les modèles économiques traitent l'optimisation des coûts de fabrication ou d'installation des éoliennes.

Position du problème

- La conversion éolienne est une science multidisciplinaire qui fait appel à (la météorologie, la mécanique, la science des matériaux, l'électromécanique, l'électronique de puissance, l'économie etc.) nécessitant un savoir faire et un bagage scientifique consistants pour couvrir l'essentiel des aspects de cette technique renouvelable ce qui rend chaque étude spécifique et incomplète pour entreprendre un projet éolien à grande envergure.
- L'information scientifique et technologique diffusée dans ce domaine demeure singulière et très spécialisée ce qui rend difficile son exploitation pour la conception d'un système éolien. Les moyens d'expérimentation sont très coûteux notamment en ce qui concerne le côté aérodynamique et vibratoire du système éolien pour valider les résultats obtenus par la modélisation. A titre d'exemple, le mode de couplage du rotor éolien avec un générateur électrique constitue seul un projet de taille.
- Les modélisations théoriques ou expérimentales pour des fins d'optimisations effectuées dans le domaine de la conversion éolienne en énergie mécanique ou électrique se basent principalement sur l'optimisation de la construction du rotor de l'éolienne soumis uniquement à des forces aérodynamiques de portance et de traînée sans tenir compte des autres charges massiques et inertielles qui sollicitent le support des pales et accélère sa fatigue.

Cette investigation scientifique et technique est assignée donc à faire le point sur le génie éolien dans le vent à travers une étude d'aide à une conception optimale d'une machine tournante à axe horizontal mue par le vent à travers le traitement des éléments clés de la structure. L'étude vise la conception d'une éolienne rapide tripales d'une puissance moyenne en tenant compte d'une part des effets massiques et inertiels des charges et de l'autre part des modes de couplage avec un générateur électrique adapté au régime du vent du site considéré.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur l'éolien et les machines mues par le vent

1.1 Historique de l'éolien [11,15]

Parmi toutes les énergies renouvelables, à l'exception de l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et l'exhaure de l'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 1700 ans avant J.C environ. Hammourabi, roi de Babylone, actuellement l'Irak, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent par des éoliennes à axes verticales. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de «moulins», ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV^{ème} siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX^{ème} siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être redécouverte et de nouveau utilisé (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde.

1.2 Connaissances théoriques sur l'éolien

1.2.1 Modélisation du vent

Le dimensionnement de tout système éolien passe mécaniquement par la connaissance de la vitesse du vent et ses variations au niveau du rotor de la machine éolienne. La position du plan de l'équateur terrestre par rapport au plan écliptique solaire conditionne la répartition de la radiation solaire incidente absorbée par la surface de la terre. Le gradient d'énergie absorbée entre l'équateur et les différentes latitudes entraînent un gradient de température induisant un gradient de densité massique d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre. Ces mouvements sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud. On pourrait aisément prévoir les directions des vents dominants si elles n'étaient pas perturbées par les orages, les obstacles naturels ou les dépressions cycloniques [9].

Le choix géographique d'un site éolien (**Table 1.1**) est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques déterminent la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. La connaissance des propriétés d'un site nécessite des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période (5-20ans).

Il est impératif de connaître la hauteur z_{mes} sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur du rotor z de l'éolienne. L'augmentation de la vitesse du vent selon la hauteur et l'état de l'environnement proche z_0 éq. (1.1) et est donnée [11].

$$V(z) = V(z_{mes}) \frac{\log(z) - \log(z_0)}{\log(z_{mes}) - \log(z_0)} \quad (1.1)$$

Table 1.1 : Rugosité du terrain d'installation des éoliennes

Nature du sol	Rugosité
Surface d'un plan d'eau	0.0002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0.0024
Zone agricole sans barrières ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0.03
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de 8 m maximum) espacées d'environ 1250 m.	0.055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de 8 m maximum) espacées d'environ 500 m.	0.1
Zone agricole avec de nouveaux bâtiments, ou des haies de 8 m espacées de 250 m.	0.2
Village, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés.	0.4
Grandes villes avec bâtiments hauts	0.8
Très grande ville avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1.6

Effet des turbulences causées par le sol : un terrain plat est caractérisé par

- des différences de niveaux entre le site considéré et l'environnement (<60 m sur un rayon de 12 kms).
- Des rapports entre la hauteur et la largeur de l'élévation (<2% dans un rayon de 4 kms)

Chaque site éolien est caractérisé par une direction de vent dominante. Cette propriété peut être décrite par un diagramme spatiotemporel appelé rose des vents. C'est un diagramme polaire, répertoriant l'énergie du vent disponible dans chaque direction en pourcent (parfois c'est la vitesse et le temps de l'occurrence de chaque direction du vent en pourcent. L'exemple est donné par la (Figure 1.3). La rose du vent permet de donner un ordre de grandeur sur la capacité énergétique du site éolien et notamment l'aide au choix de l'emplacement spatial de la turbine éolienne afin d'éviter les obstacles gênant le flux d'air.

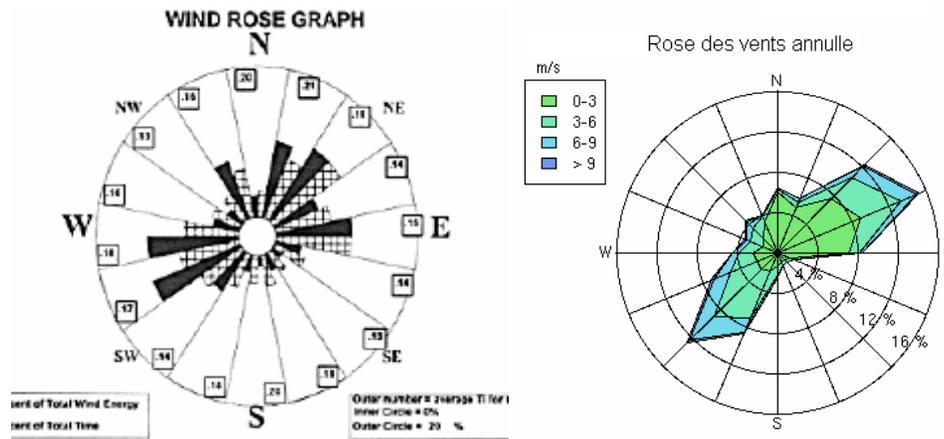


Figure 1.3 : Exemple de la rose des vents [11].

Des informations supplémentaires telles que la turbulence ou la rugosité du terrain peuvent être insérés dans ce graphique. La caractéristique du vent la plus importante et adéquate à employer dans le calcul des projets éoliens est la distribution statistique de Weibull éq. (1.2). Elle modélise avec succès la probabilité de l'occurrence des vitesses des vents du gisement éolien. Cette distribution est définie par la fonction de distribution cumulée $F(V)$ et la fonction de densité de probabilité $f(V)$ [12] :

$$f(V) = \frac{dF}{dV} = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (1.2)$$

La (Figure 1.4) montre l'influence des paramètres k et c sur la fonction de distribution des vents. Le facteur de forme k mesure la symétrie de la distribution du vent. Une augmentation de ce facteur entraîne une répartition étroite avec des vents concentrés, alors qu'une faible valeur de k entraîne des vents largement dispersés.

Le facteur d'échelle $c[m/s]$, caractérise la vitesse moyenne du vent. Il indique la position du mode de la courbe. Sa valeur est élevée pour des sites ventés et faibles pour les sites peu ventés.

La distribution de Rayleigh est une forme simplifiée de la distribution de Weibull pour $k = 2$, suffisamment précise pour un modèle de régime de vent typique. L'association américaine de l'énergie du vent (AWEA : Standard 5.1-American Wind Energy Association) recommande aussi l'utilisation de la distribution de Rayleigh pour la caractérisation de l'énergie du vent.

Chapitre I : Etat de l'art sur l'éolien et les machines mues par le vent

La vitesse moyenne du vent du site \bar{V} est définie comme étant l'espérance mathématique de la distribution des vitesses et peut s'exprimer en utilisant la fonction mathématique gamma

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \text{ [47]:}$$

$$\bar{V} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \tag{1.3}$$

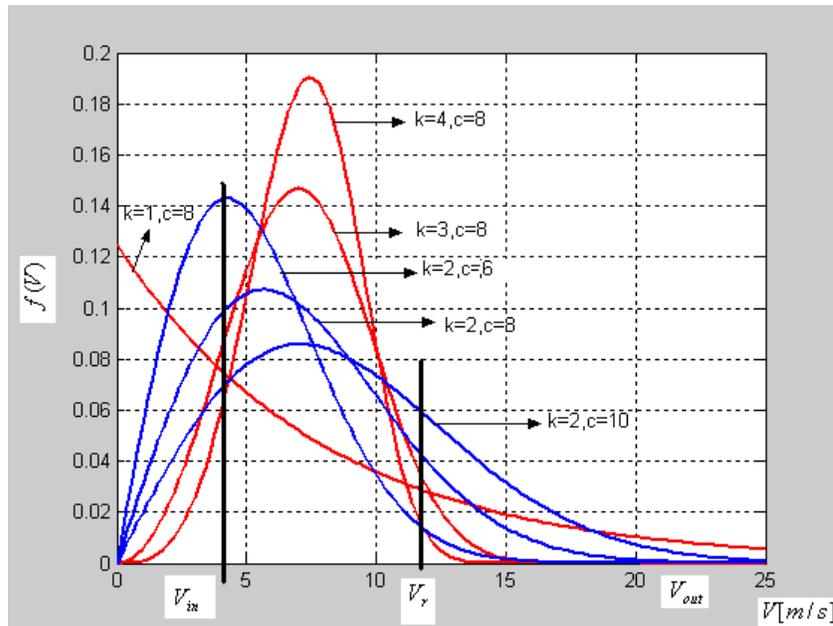


Figure 1.4 : Répartition statistique de Weibull pour le vent [47]

La puissance aéroulque théorique disponible sur un site par unité de surface du rotor $P_{th} = \frac{P}{A}$ est donnée en fonction de la densité ρ et la vitesse instantanée du vent V par la relation :

$$P_{th} = \frac{1}{2} \rho V^3 \tag{1.4}$$

En tenant compte de la limite de Betz, et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne $\rho = 1.22$, la puissance aéroulque maximale récupérable par unité de surface du rotor est estimée à $P = 0.37V^3 [W/m^2]$ et la densité d'énergie produite par un rotor éolien sur une année est estimée à environ : $E = 3.25V^3 [kWh/m^2]$.

1.2.2 Vitesse éolienne utile

La vitesse du vent est variable et les éoliennes sont caractérisées par la vitesse de démarrage de production de puissance nette V_{in} la vitesse de fonctionnement nominale du générateur V_r et la

vitesse de mise en drapeau de la machine V_{out} (**Figure 1.4**). La vitesse éolienne utilisable V_u est déduite de la distribution de Weibull dans le domaine de fonctionnement de la machine. L'éolienne commence à débiter à partir de V_{in} . Une fois la machine atteint le régime de fonctionnement nominal V_r , ce régime est maintenu indépendamment de l'augmentation de la vitesse du vent. Au-delà de la vitesse de mise en drapeau, les vitesses de vent ne sont pas prises dans le calcul [12].

$$\bar{V}_u = \int_{V_{in}}^{V_r} V^3 f(V) dV + V_r^3 \int_{V_r}^{V_{out}} f(V) dV \quad (1.5)$$

Le rendement interne de l'éolienne est défini comme étant le rapport de la puissance nominale de référence P_r à la puissance théorique de référence $P_{th}(V_r)$ sous la forme :

$$\eta_{in} = \frac{P_r}{P_{th}(V_r)} \quad (1.6)$$

1.3 Principes et classement des machines éoliennes [1, 2, 3, 6].

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a pas cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non polluante et non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. Cette énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments de l'éolienne (nacelle, mât, pales et accouplement) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Un aérogénérateur (éolienne) est une machine tournante qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utilisable sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice électrique (**Figure 1.5**).

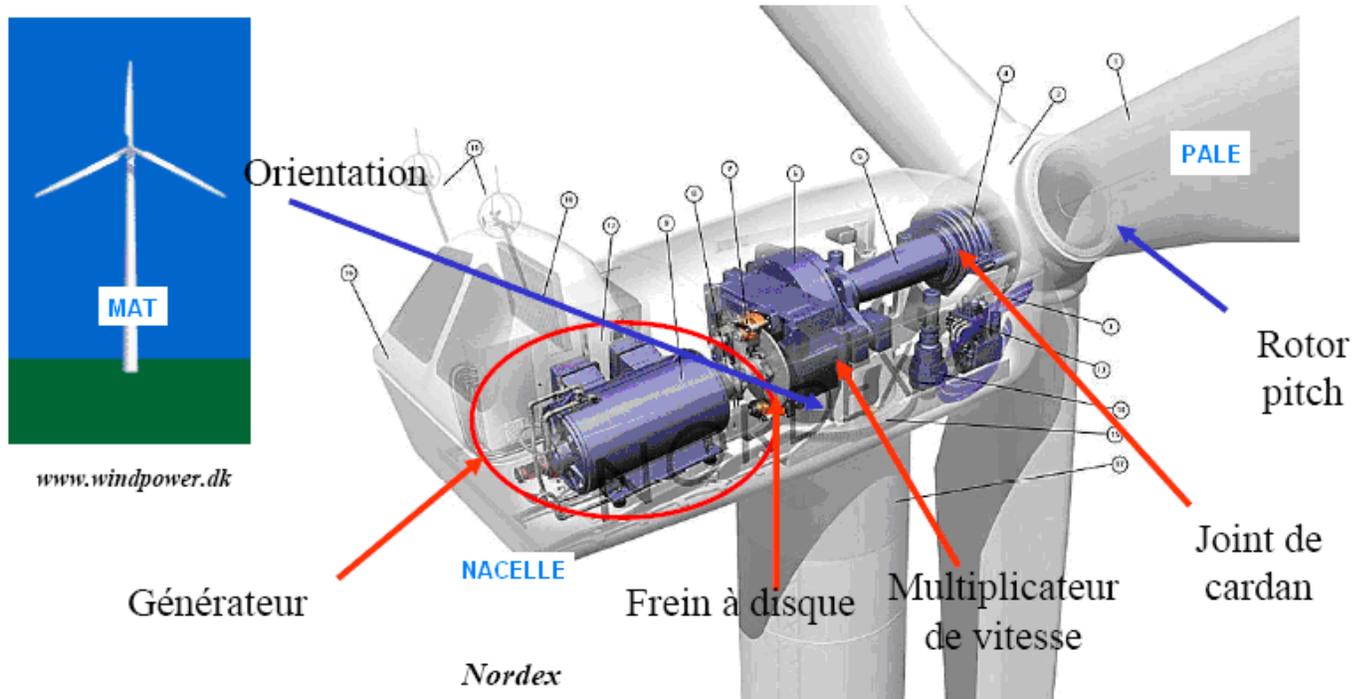


Figure 1.5 : Photo d'aérogénérateur tripaile Nordex N60 (1300 kW)

L'impact des éoliennes sur l'environnement est réduit avec la progression de la filière éolienne. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus en plus faibles. Selon l'*ADEME*, le niveau sonore d'une éolienne est de 50 dB à 150 m et devient imperceptible au delà de 400 m. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale [49] :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

Il existe plusieurs configurations possibles d'éoliennes qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux : rotor, mat et nacelle. La majorité des éléments de construction du rotor dépend de la destination de l'éolienne et l'énergie éolienne disponible. La partie essentielle d'une éolienne est constituée par les pales. Ces pales doivent être étudiées du point de vue aérodynamique, résistance des matériaux et vibration.

- **Le mât :** généralement un tube d'acier ou un treillis métallique, conçu le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en oeuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.

Chapitre I : Etat de l'art sur l'éolien et les machines mues par le vent

Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (Ex. éolienne Nordex N90 2,3 MW : diamètre de 90 m, mât de 80 m de hauteur).

- **La nacelle** : Abrite tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, roulements, multiplicateur, frein à disque et aérodynamique qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela s'ajoute le système de refroidissement à air ou à eau, l'anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.
- **Le rotor** : constitué par les pales assemblées avec leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept Danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût. Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels que la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique). Le choix des matériaux de construction des pales est une étape importante dans le projet éolien. En effet, le matériau détermine le procédé de fabrication, le coût, la durée de vie et la fiabilité des pales qui subissent beaucoup de contraintes en fatigue. Le matériau idéal doit être léger, résistant, homogène pour avoir des pales de même masse, facile à mettre en œuvre pour diminuer le coût, résistant à l'érosion et à la corrosion. Certains types de bois, certains métaux, mais aujourd'hui surtout des matériaux composites répondent aux critères requis.

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation (tenant compte bien entendu du rendement de la machine). Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- soit directement pour entraîner par exemple une pompe pour l'exhaure de l'eau.
- soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :

- soit l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.

— soit l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir d'une part la complémentarité avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques ou nucléaires, barrages...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et d'autre part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement des régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement (alimentation d'unités de désalinisation, cogénération avec des groupes diesel, des panneaux photovoltaïques...etc.).

Les éoliennes sont classées suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice et se divisent en deux grandes familles : éoliennes à axe vertical et éoliennes à axe horizontal.

1.3.1 Eoliennes à axe vertical [6]

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation

1.3.1.a Rotor a traînée différentielle [11]

Le rotor de Savonius breveté en 1929 (**Figure 1.6.a**) est basé sur le principe de la traînée différentielle. On donne un bref aperçu des caractéristiques et du principe de fonctionnement :

- Les efforts du vent sur chacune des faces d'un corps creux dans un écoulement d'air sont d'intensités différentes d'où il en résulte un couple de rotation de l'ensemble.
- Le profil du corps creux se présente à la forme d'un cylindre de faible diamètre.
- La vitesse spécifique du rotor est faible ce qui entraîne une faible puissance (**Figure 1.7**). De ce fait, l'usage d'une génératrice à grand nombre de pôles est souvent nécessaire.
- Le rotor de Savonius démarre à faible vitesse du vent et il offre des caractéristiques intéressantes du point de vue esthétique, acoustique et sécurité.
- Des conceptions spéciales permettent de minimiser les inconvénients de ce rotor et d'améliorer ses performances énergétiques. D'un point de vue mécanique, l'augmentation de la vitesse et du diamètre du rotor peut poser des problèmes de vibrations, de chocs, de fatigue, ...

On utilise dans le domaine de l'éolien de petite puissance des rotors de Savonius qui cadrent d'une façon harmonique avec le milieu urbain.

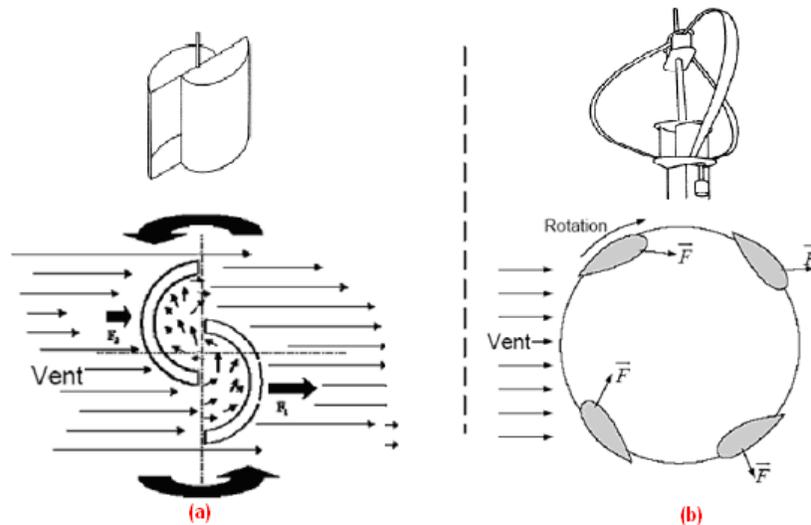


Figure 1.6 : Rotors à axes verticaux

1.3.1.b Rotor à variation cyclique d'incidence [2,11]

On présente brièvement le rotor de Darrieus breveté 1930 (**Figure 1.6.b**) :

- Il fonctionne grâce à la variation cyclique de la force résultante d'incidence d'où apparition d'un couple de rotation. Ce rotor est caractérisé par un couple de démarrage très faible nécessitant l'utilisation d'une petite turbine Savonius pour le démarrage.
- Le rotor Darrieus offre de bonnes performances énergétiques (bon facteur de puissance C_p et indépendance de la direction du vent).

Ces rotors connaissent peu de succès en raison de certains incidents mécaniques survenus en particulier au pied du mât malgré les efforts déployés dans l'amélioration de leurs performances. On peut citer les rotors en forme de H , le Wind Flower de 400 W de Toshiba, la Hochschule Bremerhaven (Allemagne)...

1.3.2 Eoliennes à axe horizontal [6,11]

1.3.2.a Courbes caractéristiques

Le graphique de la (Figure 1.7) donne une idée sur les coefficients de puissance C_p usuels en fonction de la vitesse spécifique du rotor λ pour différents types d'éoliennes

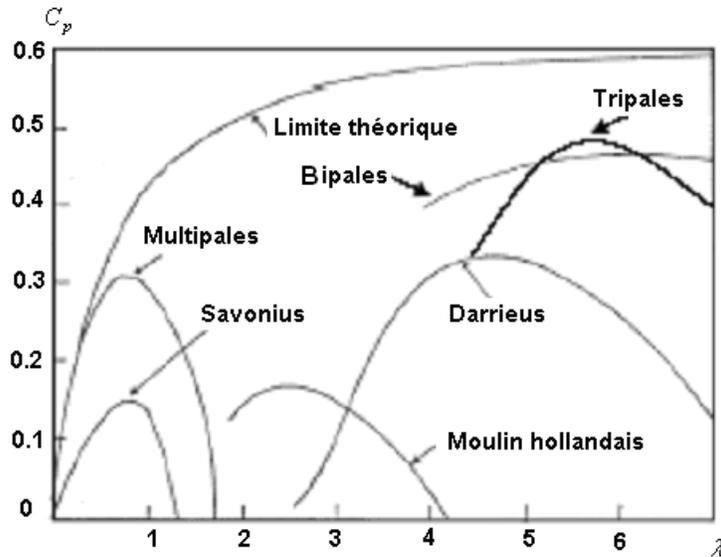


Figure 1.7 : Caractéristiques des éoliennes [6]

Actuellement, les éoliennes à axes horizontaux sont les plus utilisées. On rencontre des constructions à une, deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales. Le nombre de pales, la vitesse optimale normalisée λ_{opt} et le facteur de puissance définissent la caractéristique de puissance de ces machines $C_p(\lambda)$ (Figure 1.7).

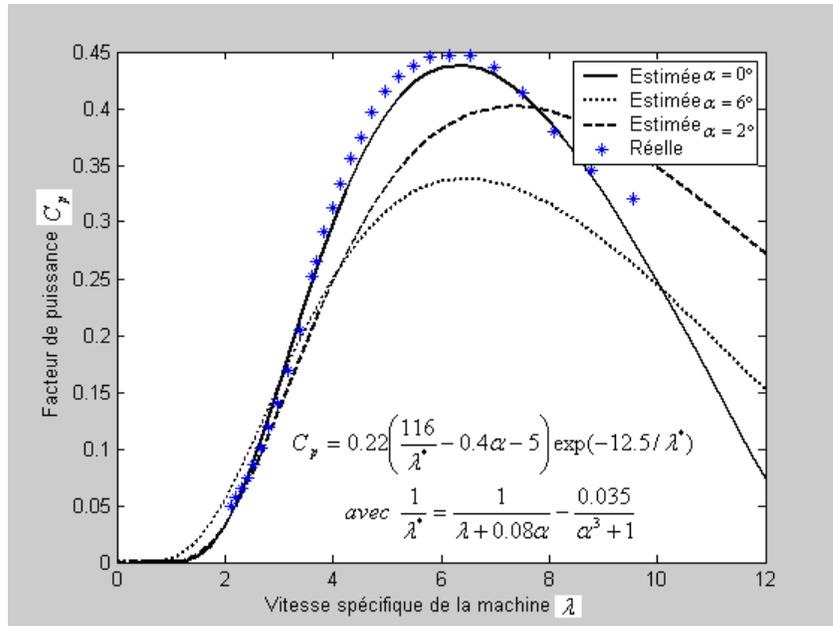
Chaque type d'éoliennes est caractérisé par une vitesse optimale normalisée λ_{opt} . Cette dernière dépend de la vitesse du vent qui maximise le rendement aérodynamique de l'éolienne. Pour rester sur le maximum de la courbe et optimiser le transfert de puissance, il est nécessaire que le générateur électrique fonctionne à vitesses variables.

Les principales estimations du facteur de puissance C_p des éoliennes rapides dans la littérature sont données en fonction de la vitesse spécifique de l'éolienne λ et de l'angle d'attaque du vent α par plusieurs corrélations. On retient pour cette étude la corrélation de l'équation (1.7) avec la base de données réelles [25]. On a :

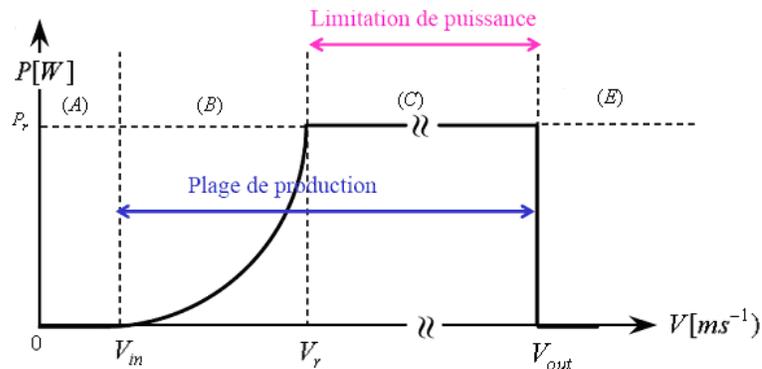
$$C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda^*} - 0.4\alpha - 5 \right) \exp(-12.5/\lambda^*) ; \frac{1}{\lambda^*} = \frac{1}{\lambda + 0.08\alpha} - \frac{0.035}{\alpha^3 + 1} \quad (1.7)$$

Chapitre I : Etat de l'art sur l'éolien et les machines mues par le vent

Cette corrélation est illustrée sur la (Figure 1.8). L'augmentation de l'angle d'attaque du vent sur le rotor conduit à la réduction de la puissance maximale produite par l'éolienne. La meilleure approximation de la puissance est obtenue pour angle d'attaque faible.



La (Figure 1.9) donne la courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent. Après une phase de démarrage zone (A), où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse de production de puissance nette V_{in} une section de fonctionnement normal existe. Si on désire extraire une puissance maximale de la turbine MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cette puissance doit évoluer selon le cube de la vitesse du vent zone (B). Quand la puissance nominale P_r est atteinte, elle doit être maintenue (C). Au delà d'une certaine limite de vitesse du vent V_{out} la turbine doit être arrêtée.



1.3.2.b Configurations de montage des voilures

Le rotor de l'éolienne (**Figure 1.10**) peut être placé avant la nacelle (conf. upwind) et alors un gouvernail pour mettre la surface active de l'éolienne face au vent est nécessaire. Une autre technique permettant d'alléger la construction par la suppression de tout mécanisme d'orientation consiste à monter la turbine derrière la nacelle (conf. downwind). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares car des vibrations importantes sont à noter et sont dues au passage des pales derrière le mat [11].

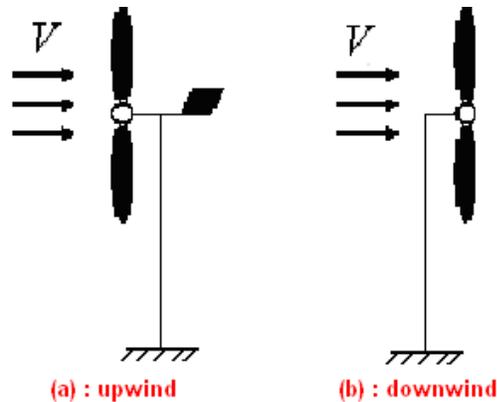


Figure 1.10 : Configuration de montage des voilures.

1.3.2.c Régulation des éoliennes

Pour préserver l'éolienne des rafales de vents, il existe quatre voies principales pour limiter sa puissance [11, 26]. On les résume comme suit :

- La première technique est utilisée sur les systèmes à vitesses variables de moyennes à fortes puissances. Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur axe afin de décaler la courbe des puissances de la voile. Elle est appelée régulation (pitch).
- La seconde technique dite (stall) est passive. Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées.
- Pour la troisième façon, on essaye d'avoir une configuration de la turbine face au vent de telle sorte que la surface active de l'éolienne diminue. Cette technique consiste en des déviations de l'axe du rotor dans les plans vertical ou horizontal.
- La dernière manière de gestion de la puissance éolienne consiste à faire varier la vitesse de rotation du rotor Ω par une action électrique. Ceci peut être réalisé par l'intermédiaire d'une génératrice accouplée à une chaîne de conversion.

1.3.2.d Conversion de l'énergie éolienne (Loi de Betz)

La plupart des méthodes appliquées pour prévoir le comportement aérodynamique d'une éolienne dans le cas axisymétrique, utilisent la théorie du disque actif, ou le rotor est remplacé par des forces distribuées sur un disque perméable et d'épaisseur nulle [15]. Cette théorie a été introduite par Froude [16], et développée par la suite par Lanchester puis par Betz en 1920. Ils ont démontré que la puissance maximale extraite par une éolienne est égale **16/27** de l'énergie cinétique de l'écoulement incident. En 1935, la théorie de l'élément de pale est proposée par Glauert [5], cette méthode est basée sur la division de l'écoulement en volumes de contrôles annulaires, auxquels on applique le bilan de quantité de mouvement et d'énergie. Ces anneaux s'étendent de l'infini amont jusqu'à l'infini aval par rapport au rotor.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté par la (Figure 1.11) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne arithmétique entre la vitesse du vent non perturbée à l'avant de l'éolienne et la vitesse du vent après passage à travers le rotor soit :

$$V = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \tag{1.9}$$

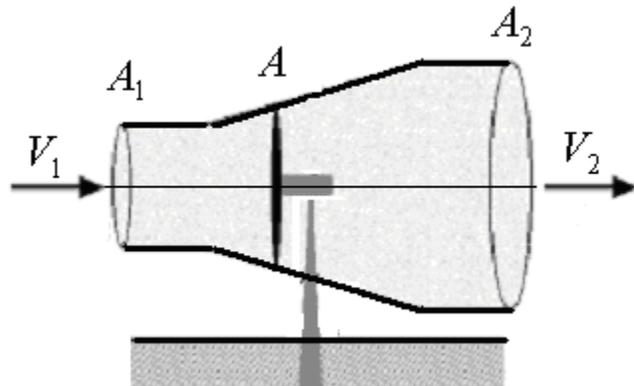


Figure 1.11 : Tube de courant autour d'une éolienne

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface A des pales en une seconde est :

$$\dot{m} = \rho A \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{1.10}$$

La puissance P extraite du vent selon la seconde loi de Newton est donnée par l'expression :

$$P = \dot{m} \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \rho A \frac{(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \tag{1.11}$$

Le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance théoriquement disponible donnée par l'éq. (1.4) mesure le facteur de puissance de la manière suivante :

$$C_p = \frac{P}{P_{th}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1.12)$$

Le facteur de puissance C_p (Figure 1.12) présente un maximum de valeur $\frac{16}{27} \approx 0.5926$. C'est une limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible du vent pour une vitesse de vent donnée. Ce seuil, n'est jamais atteint et chaque éolienne à son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative de l'éolienne $\lambda = \frac{\Omega R}{V_1}$ exprimant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent $V = V_1$.

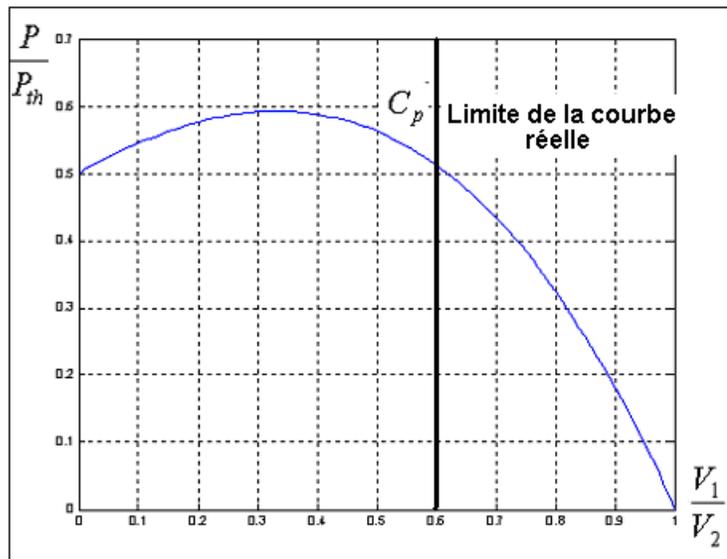


Figure 1.12 : Coefficient de puissance de l'éolienne

La puissance du vent est convertie en puissance mécanique via le coefficient de performance C_p ensuite transmise à travers la transmission avec un rendement η_{tr} et enfin elle est convertie en énergie électrique avec un rendement du générateur η_G . La combinaison des équations (1.10), (1.11) et (1.12) donnent la puissance mécanique du rotor $P_{méc}$ disponible sur l'arbre lent de l'éolienne :

$$P_{méc} = \frac{P}{P_{th}} P_{th} = C_p P_{th} = C_p \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_1^3 \right) \quad (1.13)$$

$$\text{Avec } \lambda = \frac{\Omega R}{V_1} \quad (1.14)$$

L'introduction des rendements de conversion de la transmission η_{tr} et du générateur η_G , permet d'exprimer la puissance à la sortie du générateur électrique P_G (disponible sur l'arbre rapide de l'éolienne) par la relation :

$$P_G = C_p(\lambda)\eta_{tr}\eta_G \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.15)$$

Les valeurs nominales des coefficients $C_p = 0.45$; $\eta_{tr} = 0.95$; $\eta_G = 0.9$ donnent un facteur de puissance global $C_p\eta_{tr}\eta_G = 0.38$. La valeur typique est inférieure à 30 %, fonction de la vitesse du vent, du type de turbine et de la nature de la charge.

Pour une éolienne donnée, l'éq. (1.15) établit un ensemble de caractéristiques (Figure 1.13) donnant la puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent. Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice électrique fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1100 tr/min), les maximums théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

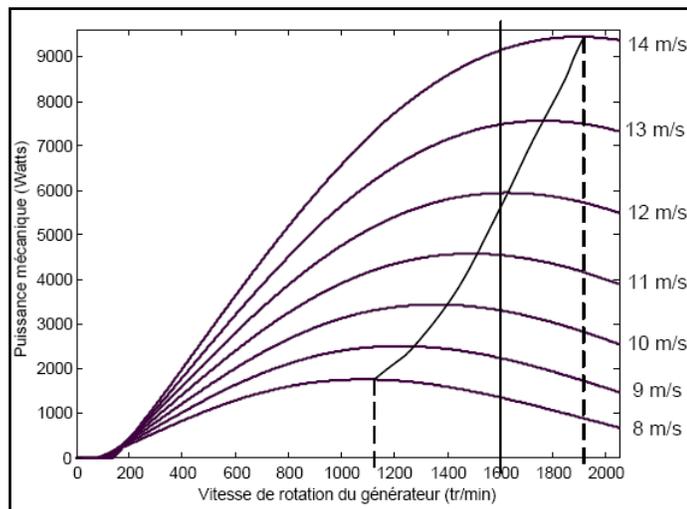


Figure 1.13 : Puissance mécanique d'une éolienne

Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple. Il y'a lieu de noter qu'il existe une relation fonctionnelle entre le facteur de puissance C_p et le facteur de couple C_q :

$$C_p = \lambda C_q \quad (1.16)$$

1.3.2.e Fonctionnement d'une pale d'éolienne [6]

L'aérodynamique est l'étude des phénomènes qui apparaissent lors d'un mouvement relatif entre un corps donné et le fluide dans lequel il est plongé. Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme en énergie mécanique, grâce à sa connexion avec le rotor en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au coeur du principe de fonctionnement. La portance mesure la force exercée sur l'extrados de la pale. Cette force tend à tirer la pale perpendiculairement à la direction du vent relatif. La traînée aérodynamique est une force qui s'oppose au mouvement de la pale se déplaçant dans l'air; c'est la résistance à l'avancement. Elle s'accroît avec la surface exposée au vent ou la vitesse de déplacement. Le coefficient de portance c_L (lift) et le coefficient de traînée c_D (drag) servent donc à caractériser l'aérodynamisme du profil considéré. Il existe plusieurs types de pales (conventionnelle, symétrique....), en mouvement, ces pales ressemblent à des plaques tordues. Dans tous les cas, la pale dévie l'air vers le bas ou plus exactement tire l'air du dessus vers le bas. Ce que toutes les ailes ont en commun est leur angle d'attaque par rapport à l'air qu'elles traversent. C'est cet angle d'attaque qui est le premier paramètre déterminant de la portance. La portance d'une aile inversée peut être expliquée grâce à son angle d'attaque, et ce malgré l'apparente contradiction avec l'explication populaire s'appuyant sur le principe de Bernoulli. Le pilote d'avion ajuste l'angle d'attaque pour ajuster la portance à la vitesse et à la charge. L'explication populaire de la portance qui se concentre sur la forme de l'aile ne donne au pilote que la possibilité d'adapter la vitesse. Afin de mieux comprendre le rôle de l'angle d'attaque il est utile d'introduire un véritable angle d'attaque, défini de telle façon que l'angle de la pale (aile) par rapport à l'axe du vent donne une portance nulle à (zéro degré). Si on change l'angle d'attaque aussi bien vers le haut que vers le bas, on remarque que la portance est proportionnelle à cet angle. La **(Figure 1.14)** montre le coefficient de portance (portance normalisée à la taille de l'aile) pour une aile standard en fonction de l'angle d'attaque effectif. Une relation similaire entre portance et angle d'attaque peut être trouvée pour toutes les ailes, indépendamment de leur conception. C'est aussi vrai pour une aile de Boing747 que pour une porte de grange. Le rôle de l'angle d'attaque est plus important que les détails de la forme du profil dans la compréhension de la portance.

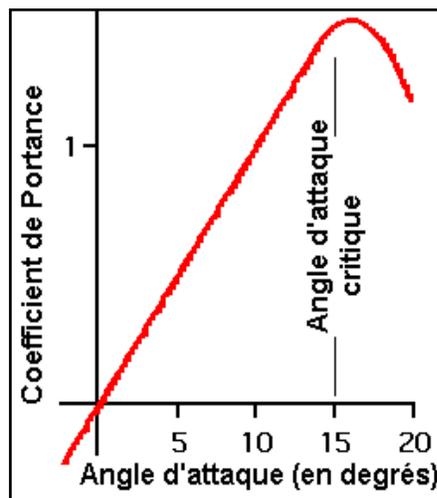


Figure 1.14 : Coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque effectif.

Généralement, la portance commence à décroître à partir d'un angle d'attaque de 15 degrés. Les forces nécessaires pour dévier l'air à un angle aussi grand sont plus grandes que ce que la viscosité de l'air peut supporter, et l'air commence à se séparer de l'aile. Cette séparation du flux d'air du dessus de la pale est un décrochage aérodynamique.

1.4 Générateurs électriques

Il existe trois types de machines électriques de base : la machine synchrone largement utilisée en générateur et en moteur pour une application nécessitant une vitesse constante et précise, la machine asynchrone à rotor bobiné ou à cage d'écurie et la machine à collecteur à courant continu.

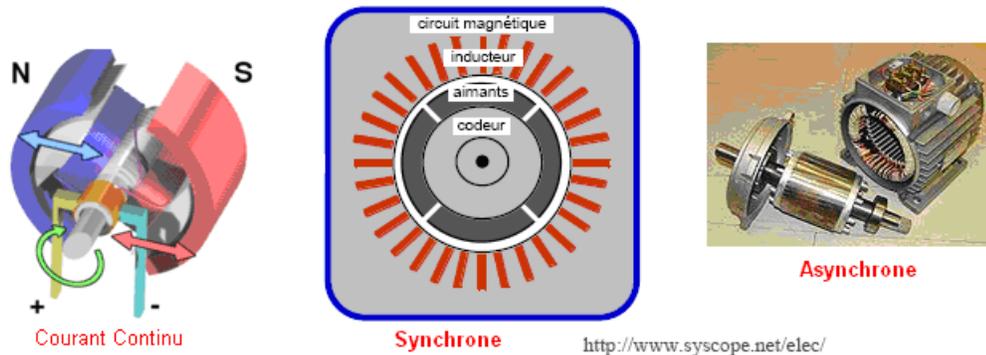


Figure 1.15 : Générateurs électriques

1.4.1 Machine synchrone

Cette machine est basée sur un rotor constitué d'un nombre de pôles bobinés. Lorsque ses bobinages sont parcourus par un courant continu d'excitation, les pôles magnétiques sont créés. Le nombre de pôles est pair. Chaque pôle consiste en un pôle sud et un pôle nord et il varie entre 2 et 24 pôles. Si la machine admet p paires de pôles et si le rotor tourne à n_G tr/min, alors un point fixe sur le stator verra un champ magnétique périphérique de fréquence :

$$f = p.n_G \quad (1.17)$$

Un stator avec normalement trois bobinages disposés de manière que lorsqu'un système de courant triphasé traverse les bobines avec une certaine fréquence, un champ magnétique est alors généré. Lorsque le rotor tourne à vitesse constante, le stator est balayé par un champ tournant qui produit une tension de fréquence constante (ceci est une condition nécessaire). Si le générateur éolien alimente un réseau indépendant, la variation de la vitesse est acceptable. En général, le rotor des machines synchrones est constitué de deux bagues collectrices qui servent à donner le courant continu aux bobinages. La tension produite est prise du stator d'un certain nombre de bobinage selon le nombre de phases. Il existe des alternateurs avec excitatrice qui consiste en une machine à courant alternatif avec redresseur qui alimente les enroulements induits du générateur synchrone. Alternateur à aimant permanent qui offre les avantages et inconvénients suivants :

- Les pertes causées par le courant d'excitation sont éliminées.
 - Moins de perte par frottement (pas de ballets).
 - Le champ magnétique moins puissant que le champ électromagnétique.
 - La possibilité de contrôler le débit du générateur par excitation est éliminée.
 - Le couple de démarrage est plus important.

1.4.2 Machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée dans la même base que la machine synchrone sauf que le rotor n'est pas alimenté par une source extérieure. Le bobinage du rotor est mis en court circuit que ce soit sous forme de cage d'écurie ou à l'extérieur pour les rotors bobinés, pour lesquels l'accès est assuré au moyen des bagues collectrices. Les courants induits dans les rotors produisent un champ tournant qui balaye les enroulements statoriques dans lesquels est induite une *F.E.M*. Ce phénomène va en s'amplifiant jusqu'à atteindre le point de fonctionnement nominal de la machine asynchrone. Lorsque le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant, on dit que ni générateur ni moteur. Lorsque le rotor tourne à une vitesse supérieure à la vitesse du champ magnétique implique moteur. Ces différentes situations entraîne un glissement défini par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1.18)$$

Avec ω_s vitesse de synchronisation et ω_r vitesse du rotor. En pratique le taux de glissement est de 4%. Afin d'amorcer le générateur, il lui faut de l'énergie du réseau auquel il est alimenté. Si elle assure la même fonction dans un réseau isolé sans apport d'énergie on a recourt à un artifice d'amorçage. Ceux ci considèrent le branchement d'une batterie aux bornes des enroulements statoriques qui formeront un circuit oscillant. Lorsque la vitesse du rotor désirée est atteinte, le champ rémanent dans le rotor de la machine induit une *F.E.M* dans les enroulements statoriques. L'énergie réactive mise en jeu par le circuit *LC* permet la création d'un champ tournant statorique à titre comparatif, les machines synchrone et asynchrone présentent quelques particularités :

- La machine synchrone ne peut fonctionner qu'à la vitesse de synchronisme. A cette vitesse le couple demandé par le rotor peut varier jusqu'à Q_{\max} .
- La machine doit fonctionner à en mode n_0 (ni moteur ni générateur) lorsqu'elle est connectée à un réseau puissant de fréquence constante. Le couplage au réseau nécessite la vérification de la fréquence de fonctionnement f et l'ordre de succession des phases.
- La machine asynchrone peut fonctionner dans une certaine gamme autour de la vitesse de synchronisme. La gamme des vitesses qui permet un fonctionnement stable peut être élargie lorsque le rotor est bobiné par l'adjonction d'une résistance.
- Le rendement des machines synchrones est généralement meilleur d'environ de 10 % par rapport aux machines asynchrones (génératrices).

1.4.3 Machine à courant continu

C'est l'une des machines les plus vieilles. Elle est constituée d'un enroulement inducteur formant un ou plusieurs paires de pôles fixées au stator (les pôles induits par aimants permanents) d'un enroulement induit distribué sur le rotor d'accès et permet par collecteurs et des balais le courant collecté de l'induit est alors un courant continu. La maintenance du collecteur exige de placer cette machine au second plan relativement aux autres machines synchrones et asynchrones. Les machines à courant continu sont adéquates pour les systèmes fonctionnant à vitesse variable.

1.4.4 Application des générateurs électriques à l'énergie éolienne

Presque tous les types de générateurs électriques ont été utilisés dans les applications des énergies éoliennes. Pour les systèmes éoliens connectés directement au réseau la machine asynchrone est préférable du fait de sa facilité de sa synchronisation à la fréquence du réseau, de sa maintenance minimale et de son prix relativement réduit. La machine synchrone au point de vue vitesse doit tourner d'une manière constante, la variation de la vitesse du rotor éolien induit des variations importantes dans le couple et le courant du générateur. Les premières variations sont indésirables du point de vue mécanique, et les dernières sont indésirables du point de vue électrique. Ces fluctuations peuvent être amorties à l'aide des systèmes mécaniques ou électriques. Les machines à courant continu sont toujours utilisées dans les petits systèmes en chargeurs de batteries.

1.5 Comportement aérodynamique d'une voile de navire

La compréhension de la puissance extraite d'un rotor éolien passe par l'analyse d'une voile de navire (**Figure 1.16**) afin de distinguer entre les machines à portance et les machines à traînée.

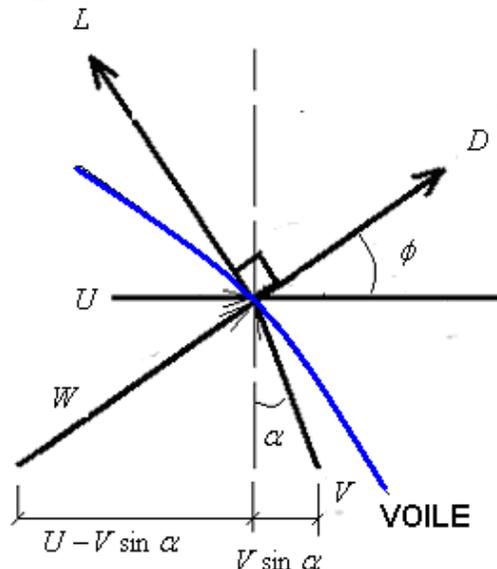


Figure 1.16 : Comportement aérodynamique d'une voile de navire

Chapitre I: Etat de l'art sur l'éolien et les machines mues par le vent

La puissance extraite du profil à partir du vent est donnée en fonction de la force tangentielle dans la direction du mouvement F_t (force propulsive) et la vitesse tangentielle à la section du voile U par l'expression :

$$P = F_t U \quad (1.20)$$

La décomposition de la force propulsive en tenant compte de l'angle d'incidence apparent du vent ϕ donne :

$$F_t = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (1.21)$$

La force de portance est donnée par l'expression

$$L = c_L \frac{1}{2} \rho (cb) W^2 \quad (1.22)$$

Et la force de traînée est donnée par l'expression

$$D = c_D \frac{1}{2} \rho (cb) W^2 \quad (1.23)$$

c_L , c_D , c , b et W sont les coefficients de portance, de traînée, la corde, l'envergure du voile et la vitesse relative du vent.

L'angle d'incidence apparent peut être exprimé de la manière suivante :

$$\tan \phi = \frac{V \cos \alpha}{U - V \sin \alpha} \quad (1.24)$$

Avec α angle d'attaque et λ rapport spécifique des vitesses

$$\lambda = \frac{U}{V} \quad (1.25)$$

Et

$$W = V \left(\lambda^2 - 2\lambda \sin \alpha + 1 \right)^{1/2} \quad (1.26)$$

La substitution des expressions (1.24), (1.25) et (1.26) dans l'éq. (1.20) donne :

$$P = \frac{1}{2} \rho b V^3 \lambda \left\{ c_L \cos \alpha - c_D \left(\lambda^2 - 2\lambda \sin \alpha + 1 \right)^{1/2} \right\} \quad (1.27)$$

Selon la puissance convertie par le profil lui-même $P_{th} = \frac{1}{2} cb \rho V^3$ et la puissance disponible actuellement P , on peut distinguer deux cas :

1.5.1 Propulsion par la traînée $\alpha = 90^\circ \Rightarrow L = 0$

$$\frac{\partial P}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow P_{\max} = P|_{\lambda=1/3} = \frac{4}{27} c_D cb \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1.28)$$

Pour le cylindre $c_D = 2$, uniquement $\frac{8}{27} \approx 30\%$ du vent atteint le voile.

1.5.2 Propulsion par la portance $\alpha = 0$

En procédant de la même manière on trouve :

$$P_{\max} = \frac{4}{27} \left(\frac{c_L}{c_D} \right)^2 c_L cb \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1.29)$$

La puissance interceptée par le voile est fonction du carré de la finesse f .

$$f = \frac{c_L}{c_D} = \frac{1}{0.1} = 10 \Rightarrow P_{\max} = \frac{400}{27} c_L (cb) \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1.30)$$

Chapitre II

Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

2.1 Introduction

La méthode utilise les équations de conservation de la quantité de mouvement et des bilans énergétiques pour connaître les performances d'une hélice simple (disque) considérée comme étant un disque perforé uniformément chargé ayant un nombre infini de pales. L'étude est effectuée en considérant une hélice, mais en tenant compte qu'un rotor éolien est simplement une hélice de grand format. La méthode propose l'étude d'un volume de contrôle (tube de courant) entourant le rotor éolien et respectant les hypothèses suivantes :

- L'écoulement est permanent et turbulent.
- L'écoulement est homogène et incompressible $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$.
- La pression de l'air extérieur au tube de courant est égale à la pression atmosphérique P_a .
- Le fluide est non visqueux, sans perte de charge.
- La résistance à la traînée est négligeable.
- La rotation de l'écoulement est négligée.
- Le nombre de pales est infini.
- La pression statique à l'infini est égale à la pression atmosphérique P_a .
- La vitesse du vent est constante loin du plan du rotor.
- Les vitesses dans les différentes sections du tube de courant sont unidirectionnelles.

2.2 Effet du déplacement axial du fluide

Étant donné que la différence de vitesse à la sortie du volume de contrôle à pression constante, il existe nécessairement un flux d'air traversant les parois latérales du cylindre pour compenser cette différence. Le flux en direction radiale dans le volume de contrôle est donné par la différence des flux d'entrée et de sortie dans le tube de courant (**Figure 2.17**).

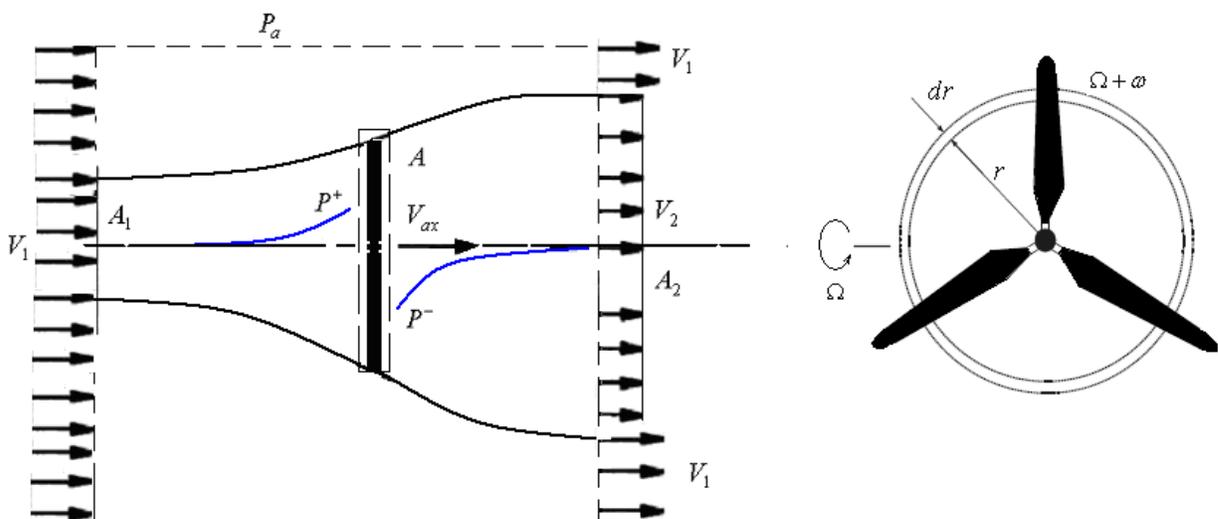


Figure 2.17 : Volume de contrôle associé au disque rotor

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

La conservation du flux massique dans le tube de courant donne :

$$\rho A_1 V_1 = \rho A V_{ax} = \rho A_2 V_2 \quad (2.31)$$

L'application de la conservation de la quantité de mouvement, montre que la poussée de l'hélice T peut se traduire par la différence entre la quantité de mouvement sortante du volume de contrôle et celle entrante :

$$T = \rho A V_{ax} (V_1 - V_2) \quad (2.32)$$

Il est également possible d'estimer la poussée générée par l'hélice sachant que cette dernière a pour effet d'augmenter la pression d'une valeur $\Delta P = (P^+ - P^-)$ lors du passage du fluide à travers elle de la manière suivante:

$$T = A (P^+ - P^-) \quad (2.33)$$

ΔP au niveau de l'hélice peut être retrouvée à l'aide des équations de Bernoulli :
En amont du rotor

$$P_a + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P^+ + \frac{1}{2} \rho V_{ax}^2 \quad (2.34)$$

En aval du rotor

$$P^- + \frac{1}{2} \rho V_{ax}^2 = P_a + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (2.35)$$

La combinaison des équations (2.34) et (2.35) donne :

$$P^+ - P^- = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.36)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.37)$$

La combinaison des équations (2.32) et (2.37) donne la vitesse axiale V_{ax} .

$$V_{ax} = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (2.38)$$

La vitesse axial du fluide V_{ax} traversant l'hélice, mesure la moyenne arithmétique des vitesses du fluide en amont V_1 et en aval V_2 .

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

L'introduction du facteur d'induction axial a mesurant le taux de chute de la vitesse du vent

$$V_{ax} = V_1 (1 - a) \quad (2.39)$$

$$V_2 = V_1 (1 - 2a) \Rightarrow C_V = \frac{V_2}{V_1} = 1 - 2a \quad (2.40)$$

La force de poussée est donnée par l'expression

$$T = 2\rho A V_{ax} (V_1 + V_{ax}) = 4a (1 - a) \frac{1}{2} \rho A V_1^2 \quad (2.41)$$

$C_f = 4a (1 - a)$ est le facteur de force.

La relation (2.41) est fondamentale dans la théorie aérodynamique du rotor éolien. Elle offre l'avantage de pouvoir être utilisée directement dans tous les cas de mouvement.

La puissance absorbée par le rotor est donnée en fonction du facteur de puissance $C_p = 4a (1 - a)^2$

et la puissance théorique du vent $\frac{1}{2} \rho A V_1^3$ sous la forme :

$$P = TV_{ax} = 4a (1 - a)^2 \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \Rightarrow C_p = 4a (1 - a)^2 \quad (2.42)$$

P est la puissance nécessaire sur le rotor, mesurant la somme de la puissance de propulsion et la puissance induite.

La puissance maximale extraite de l'écoulement est donnée par l'expression :

$$P_{\max} = P|_{a=1/3} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (2.43)$$

Le facteur $C_{p\max} = \frac{16}{27} \approx 59.3\%$ étant le coefficient de Betz. Ce facteur de puissance ne dépasse jamais les 40 % dans la pratique en raison des différentes causes nombre de pales considéré infini, perte en bout de pales etc.

On peut déduire que $V_{ax} = \frac{2}{3} V_1 \Rightarrow A_1 = \frac{2}{3} A$ et $V_2 = \frac{1}{3} V_1 \Rightarrow A_2 = 3A_1$. La puissance de l'air dans la

section A_1 provient exclusivement de son énergie cinétique volumique $P_0 = \frac{2}{3} \frac{1}{2} \rho A V_1^3$, ce qui donne

un rendement aérodynamique de $\eta_0 = \frac{16}{27} \frac{3}{2} = \frac{8}{9} = 0.8889$.

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

Cette puissance de l'air dans la section A_1 est à priori inconnue lorsque l'on conçoit une éolienne de section connue A . Le rapport $A = \frac{3}{2}A_1$, n'est valable que si la puissance maximale est récupérée. Ce raisonnement conduit à l'idée de regarder la puissance du vent, qui traverse la section A de l'éolienne lorsqu'elle est arrêtée $\eta_0 = C_{p \max} = \frac{16}{27}$.

La force de poussée maximale correspondante est égale à.

$$T_{\max} = \frac{8}{9} \frac{1}{2} \rho A V_1^2 = \rho A V_{ax}^2 \quad (2.44)$$

Les facteurs de vitesse, de force et de puissance issus de cette partie de l'écoulement axial de l'air sont représentés sur la (Figure 2.18).

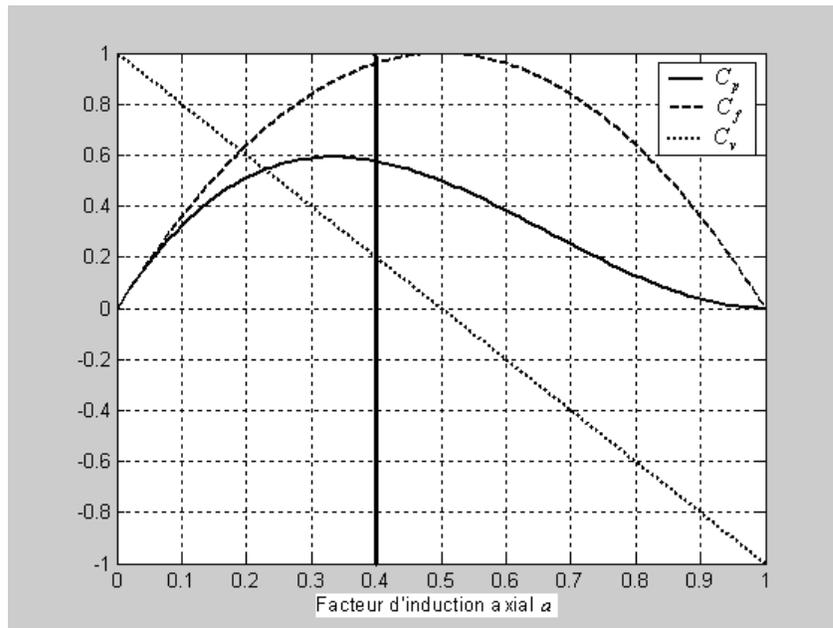


Figure 2.18 : Influence de l'induction axiale sur les performances du rotor

Le facteur de force C_f estimé pour une éolienne horizontale idéale en se basant sur le résultat de l'équation (2.41) est uniquement valable pour une induction axiale inférieure à environ 0.4. Au-delà de cette limite, la théorie du moment axial reste valable mais les vitesses deviennent négatives. Les meilleurs facteurs de poussée des éoliennes sont obtenus pour des faibles valeurs de la vitesse du vent. La théorie du moment axial n'est pas valable pour des valeurs d'induction élevées car la couche limite devient turbulente et instable si la vitesse dépasse la quantité $(V_1 - V_2)$ [7].

2.3 Effet de la rotation du fluide

Le modèle idéal d'un modèle complètement axial avant et après le rotor doit être modifié quand on sait que la rotation du rotor impose la génération d'un mouvement angulaire de l'air. Ceci veut dire que du fait de la réaction du couple exercé par l'écoulement sur le rotor, l'écoulement derrière le rotor tourne dans le sens opposé. Cette rotation induit une perte d'énergie cinétique du rotor et cela est d'autant plus important que le couple est grand. Il en résulte à faible rapport de vitesse spécifique λ et à couple élevé Q plus de perte de puissance que dans le cas inverse [13].

Pour une variation radiale du fluide autour du rotor d'un élément dr (Figure 2.17), la vitesse angulaire du rotor Ω augmente à la valeur $\Omega + \omega$, alors que la composante axiale de la vitesse reste inchangée ce qui permet d'écrire :

$$P^+ - P^- = \frac{1}{2} \rho (\Omega + \omega)^2 r^2 - \frac{1}{2} \rho (\Omega r)^2 = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \quad (2.45)$$

$$dT = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 2\pi dr \quad (2.46)$$

Le facteur d'induction tangentielle a' est défini de la manière suivante :

$$a' = \frac{\omega / 2}{\Omega} \quad (2.47)$$

$$dT = 4a' \left(1 + a' \frac{1}{2} \right) \rho \Omega^2 r^2 2\pi dr \quad (2.48)$$

En tenant compte de l'équation (2.41) pour un élément de section $dA = 2\pi r dr$ et en posant $V_1 = V$ on peut écrire :

$$dT = 4a' \left(1 - a' \frac{1}{2} \right) \rho V^2 2\pi r dr \quad (2.49)$$

En égalisant (2.49) et (2.48) on retrouve l'équation liant les facteurs d'induction axial et tangential avec la vitesse spécifique locale de l'éolienne λ_r .

$$\frac{a' \left(1 - a' \frac{1}{2} \right)}{a' \left(1 + a' \frac{1}{2} \right)} = \left(\frac{\Omega r}{V} \right)^2 = \lambda_r^2 \quad (2.50)$$

La conservation du moment angulaire implique que le couple exercé sur le rotor doit être égale au moment angulaire de l'écoulement.

$$dQ = \rho V_{ax} dA \left(-V_2 \right) r = \rho V_{ax} 2\pi r dr \left(\Omega r \right) r \quad (2.51)$$

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

En introduisant les facteurs d'induction a et a' et en tenant compte de l'équation (2.40), on peut écrire les expressions du couple et de la puissance élémentaires absorbés.

$$dQ = 4a' \left(-a \frac{1}{2} \rho V \Omega r^2 \right) 2\pi r dr \quad (2.52)$$

$$dP = \Omega dQ = 4a' \left(-a \frac{1}{2} \rho V \Omega^2 r^2 \right) 2\pi r dr \quad (2.53)$$

En tenant compte de l'équation (2.50), la puissance totale absorbée par le rotor peut être exprimée sous la forme intégrale suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \frac{\int_0^\lambda 8a' \left(-a \right) \lambda_r^3 d\lambda_r}{\lambda^2} \quad (2.54)$$

Ce qui donne un facteur de puissance :

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a' \left(-a \right) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (2.55)$$

Afin de maximiser la puissance produite par le rotor éq. (2.54), il est nécessaire de maximiser le terme $f(a, a') = a' \left(-a \right)$ à partir de la résolution de l'équation (2.50) par rapport à $a' = a'(a, \lambda_r)$.

$$\frac{d}{d\lambda_r} \left[a' \left(-a \right) \right] = 0 \Rightarrow \lambda_r = \sqrt{\frac{\left(-a \right) \left(4a - 1 \right)^2}{1 - 3a}} \quad (2.56)$$

La substitution de λ_r dans l'équation (2.50), donne la loi de variation du facteur d'induction tangentielle en fonction du facteur d'induction axiale qui optimise le facteur de puissance :

$$a' = \frac{1 - 3a}{4a - 1} \quad (2.57)$$

Les performances théoriques optimales du rotor sont résumées dans la (Table 2.2) ci-dessous :

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

Table 2.2 : Caractéristiques aérodynamiques optimales théorique du rotor éolien

a	a'	λ_r	λ	$C_{p\max}$	$C_{q\max}$	$C_{f\max}$
0.2500	∞	0.0000	0	0	---	0.7500
0.2600	5.5000	0.0734	0.5	0.288	0.5760	0.7696
0.2700	2.3750	0.1568	1	0.416	0.4160	0.7884
0.2800	1.3333	0.2546	1.5	0.481	0.3207	0.8064
0.2900	0.8125	0.3739	2	0.513	0.2565	0.8236
0.3000	0.5000	0.5292	2.5	0.533	0.2132	0.8400
0.3100	0.2917	0.7535	5	0.570	0.1140	0.8556
0.3200	0.1429	1.1545	5.5	0.5718	0.1040	0.8704
0.3300	0.0313	2.6193	6	0.5737	0.0956	0.8844
0.3330	0.0030	8.5743	6.5	0.5761	0.0886	0.8884
0.3333	0.0003	27.2063	7	0.5797	0.0828	0.8888
1/3	0.0000	∞	7.5	0.585	0.0780	8/9
			8	0.5926	0.0741	
			∞	16/27	0.0000	

Les facteurs de couple et de puissance maximaux (**Table 2.2**) sont représentés sur la (**Figure 2.19**) après interpolation des points en fonction de la vitesse spécifique de la machine. On remarque que nous avons plus de perte de puissance à faible vitesse spécifique et à couple élevé que dans le cas contraire.

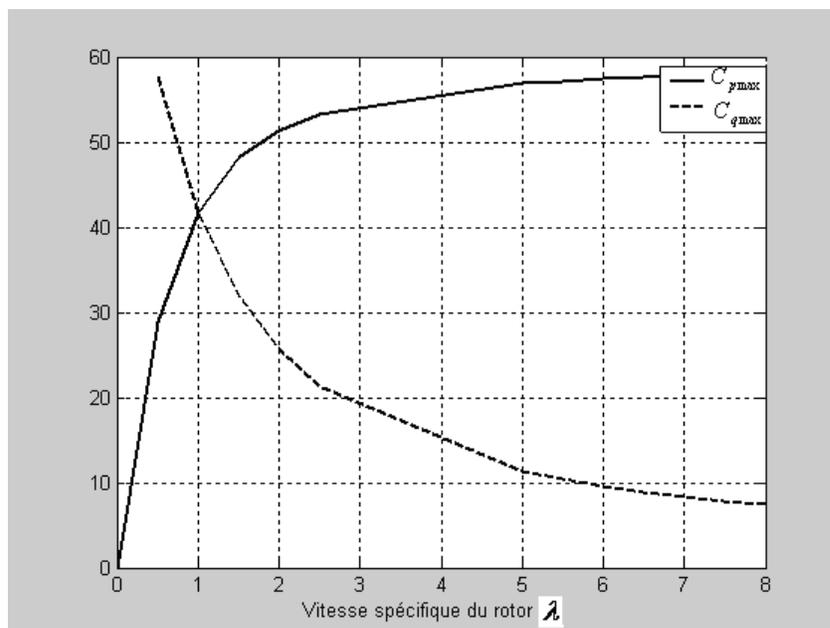


Figure 2.19 : Performances énergétiques du rotor $C_{p\max}$, $C_{q\max}$ en fonction de λ

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

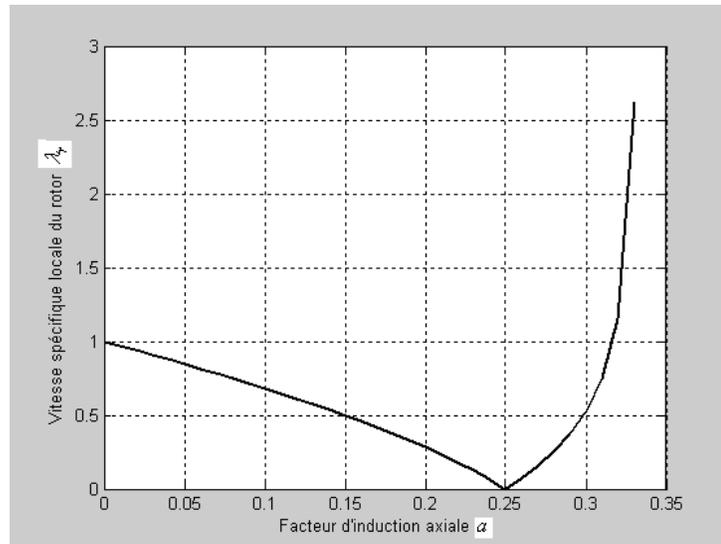


Figure 2.20 : Influence de l'induction axiale α sur la vitesse spécifique locale du rotor λ_r .

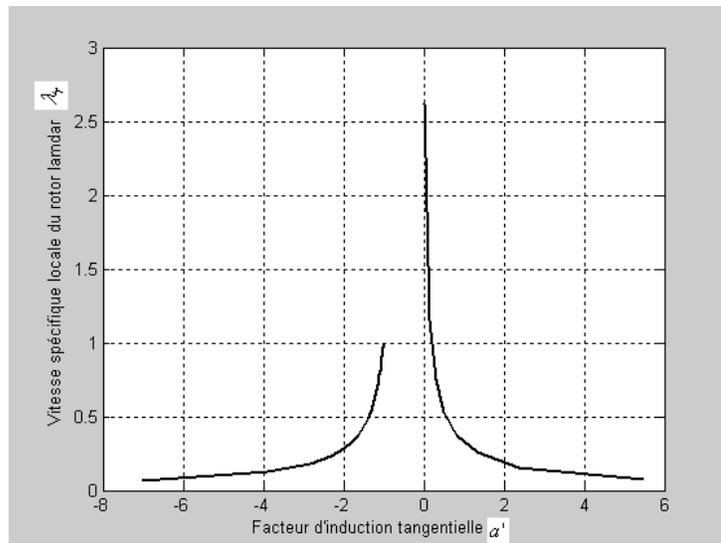


Figure 2.21 : Influence de l'induction tangentielle α' sur la vitesse spécifique locale du rotor λ_r .

Les (Figures 2.20 et 2.21) sont obtenues à partir des conditions de fonctionnement optimales du rotor données par les équations (2.56 et 2.57). On a choisi cette représentation afin d'identifier la plage de variation des paramètres d'interférence axiale et tangentielle qui conduisent à une puissance élevée et à un couple réduit. On note que pour chaque position locale le long de la pale, on intègre le facteur de puissance et de couple sur une plage de vitesse spécifique choisie selon la précision désirée. Les inductions tangentielles négatives et les inductions axiales qui conduisent à une chute de la vitesse spécifique de l'éolienne ne sont pas donc prises en considération.

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

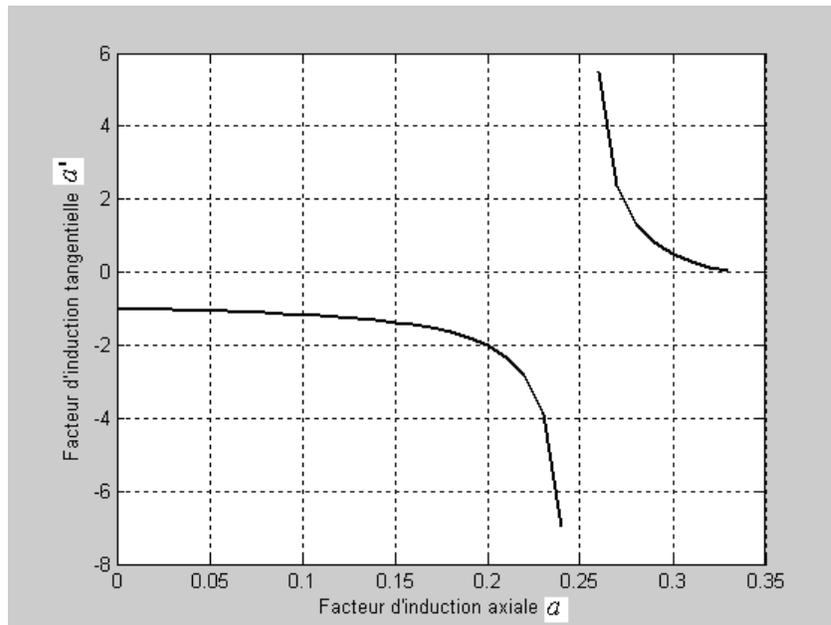


Figure 2.22 : Variation de l'induction axiale a sur l'induction tangentielle a' .

La (Figure 2.22) de la variation de l'induction tangentielle en fonction de l'induction axiale est obtenue à partir de l'équation (2.57). Elle montre clairement l'intervalle de la variation de l'induction axiale qui fait chuter l'induction tangentielle à zéro et augmente par conséquent la vitesse spécifique de l'éolienne et la puissance.

2.4 Théorie de l'élément de pale

Cette théorie s'assigne de modéliser les forces et les moments agissant sur une section de pale connaissant les caractéristiques aérodynamique et géométrique de l'élément. Les hypothèses admises pour cette théorie sont [6]:

- Absence d'interférence entre les éléments de pale adjacents le long de celle-ci.
- Les forces agissantes sur un élément de pale sont seulement dues aux caractéristiques de portance et de traînée du profil aérodynamique de section de référence $dA = c dr$ (c : corde du profile) considéré.

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

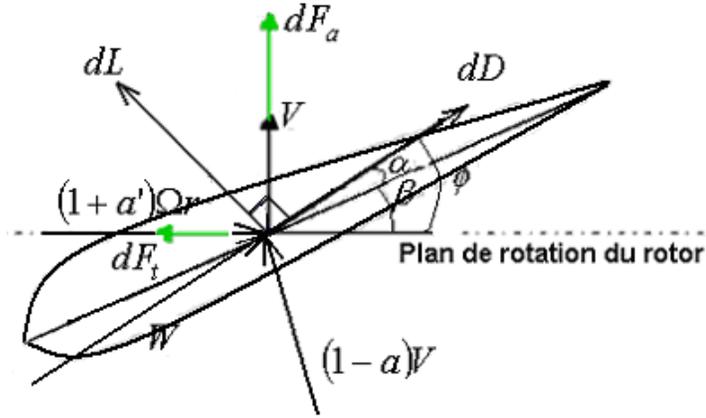


Figure 2.23 : Forces aérodynamiques locales agissant sur un élément de pale

$$dL = c_L \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.58)$$

$$dD = c_D \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.59)$$

Les coefficients de portance c_L et de traînée c_D dépendent de l'angle d'attaque α fonction de l'angle d'incidence du vent ϕ sur le rotor et de l'angle de calage des pales β et du type de profile de la pale. A partir de ces forces aérodynamiques élémentaires on calcule les forces de poussée axiales et tangentielles dF_a , dF_t (**Figure 2.23**) et le couple aérodynamique dQ agissant sur un élément de pale de la manière suivante :

$$dF_a = \frac{1}{2} \rho W^2 [c_L(\alpha) \cos \phi + c_D(\alpha) \sin \phi] c dr \quad (2.60)$$

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho W^2 [c_L(\alpha) \sin \phi - c_D(\alpha) \cos \phi] c dr \quad (2.61)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho W^2 [c_L(\alpha) \sin \phi - c_D(\alpha) \cos \phi] c r dr \quad (2.62)$$

Les efforts aérodynamiques produits sur un rotor constitué de N_p pales résultent par sommation d'intégrales de la manière suivante :

$$T = \sum_{i=1}^{N_p} \int_{R_m}^R dF_a(r) = N_p \int_{R_m}^R dF_a(r) dr \quad (2.63)$$

$$Q = \sum_{i=1}^{N_p} \int_{R_m}^R r dF_t(r) = N_p \int_{R_m}^R r dF_t(r) dr \quad (2.64)$$

R_m et R sont les rayons du moyeu et du rotor de l'éolienne.

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

2.5 Couplage des deux méthodes (Moment axial et élément de pale)

La théorie du moment axial développée précédemment ne fournit pas l'information principale pour la conception de la pale du rotor, ce qui exige leur combinaison avec la théorie de l'élément de pale. L'identification des équations (2.48) ou (2.49) et (2.51) avec (2.60) et (2.62) donne :

$$dT = 4a \left(-a \frac{1}{2} \rho V^2 2\pi r dr \right) = N_p \frac{1}{2} \rho W^2 \left[c_L(\alpha) \cos \phi + c_D(\alpha) \sin \phi \right] \underline{c} dr \quad (2.65)$$

$$dQ = 4a' \left(-a \frac{1}{2} \rho V \Omega r^2 2\pi r dr \right) = N_p \frac{1}{2} \rho W^2 \left[c_L(\alpha) \sin \phi - c_D(\alpha) \cos \phi \right] \underline{c} r dr \quad (2.66)$$

La vitesse relative du vent W (Figure 2.23) ci-dessus est donnée par la relation :

$$W = \frac{\left(-a \right) V}{\sin \phi} = \frac{\left(+a' \right) \Omega r}{\cos \phi} \Rightarrow \tan \phi = \left[\frac{1-a}{1+a'} \right] \frac{1}{\lambda_r} \quad (2.67)$$

L'introduction du facteur de solidité local ν (paramètre de forme de l'éolienne), mesurant la surface développée par les pales divisée par l'aire interceptée par la voilure et la substitution de l'éq. (2.67) dans (2.65) et (2.66) donne :

$$\nu = N_p \frac{c}{2\pi r} \quad (2.68)$$

$$dT = (1-a)^2 \nu c_L \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} \left[1 + \frac{c_D}{c_L} \tan \phi \right] \frac{1}{2} \rho V^2 2\pi r dr \quad (2.69)$$

$$dQ = (1+a')^2 \nu c_L \frac{\sin \phi}{\cos^2 \phi} \left[1 - \frac{c_D}{c_L} \frac{1}{\tan \phi} \right] \frac{1}{2} \rho \left(\Omega r \right)^2 r 2\pi r dr \quad (2.70)$$

L'identification de (2.69) avec (2.65) et (2.70) avec (2.66) entraîne :

$$\frac{4a}{1-a} = \nu c_L \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} \left[1 + \frac{c_D}{c_L} \tan \phi \right] \quad (2.71)$$

$$\frac{4a'}{1+a'} = \nu c_L \frac{1}{\cos \phi} \left[1 - \frac{c_D}{c_L} \frac{1}{\tan \phi} \right] \quad (2.72)$$

Certains auteurs continuent à considérer la traînée à cause du nombre fini de pales. En revanche, d'autres auteurs pour les petites cordes la traînée n'induit pas de vitesse sur la pale, ils négligent le

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

terme en c_D , et retiennent la valeur optimale de c_L . Les expressions (2.71) et (2.72) se simplifient de la manière suivante [7, 40] :

$$\frac{4a}{1-a} = v c_L \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} \Rightarrow a = \frac{1}{1 + \frac{4 \sin^2 \phi}{v c_L \cos \phi}} \quad (2.73)$$

$$\frac{4a'}{1+a'} = v c_L \frac{1}{\cos \phi} \Rightarrow a' = \frac{1}{\frac{4 \cos \phi}{v c_L} - 1} \quad (2.74)$$

Avec ou sans la traînée, les expressions (2.71) et (2.72) ou (2.73) et (2.74) et les expressions des efforts aérodynamiques dT et dQ , permettent de déterminer le comportement du rotor entre autres, il faut connaître les caractéristiques $c_L(\alpha)$ et $c_D(\alpha)$ ainsi que l'équation de l'incidence du vent:

$$\phi = \alpha + \beta \quad (2.75)$$

$$dQ = 4a'(1-a) \left[1 - \frac{c_D}{c_L} \frac{1}{\tan \phi} \right] \frac{1}{\lambda_r} \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 r 2\pi dr \quad (2.76)$$

$$C_p = \frac{\int_0^{\lambda} 8a' \left(1 - a \left(1 - \frac{c_D}{c_L} \frac{1}{\tan \phi} \right) \right) \lambda_r d\lambda_r}{\lambda^2} \quad (2.77)$$

2.6 Correction des pertes de puissance

Afin que la méthode *BEM* donne de bons résultats [7], il est nécessaire d'appliquer à l'algorithme de calcul deux corrections : la première correction de Prandtl concerne les pertes de puissance en bout de pale qui corrigent l'hypothèse du nombre infini de pale et la seconde correction de Glauert qui corrige empiriquement la relation fonctionnelle de la force de poussée pour les inductions élevées.

2.6.1 Pertes de puissance en bout de pale

En bout de pale, il passe un court circuit entre la pression en amont et en aval du rotor, ceci conduit à la réduction de la portance. Ce phénomène devient de plus en plus prononcé au fur et à mesure qu'on s'approche du bout de la pale. Ce qui entraîne une réduction du couple exercé sur le rotor et donc la puissance produite. Il existe plusieurs théories de calcul de ces pertes, les une plus développées que les autres. Nous retenons dans ce mémoire le modèle présenté par Prandtl (Glauert 1935) [5,10]. L'idée considère que les vitesses dans le plan du rotor telles que vues par la pale sont altérées par la turbulence créée en bout de pale.

$$F = \frac{N_p \Gamma}{\Gamma_\infty} = \frac{2}{\pi} \arccos \left[\exp \left(-\frac{N_p}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi} \right) \right] \quad (2.78)$$

Γ et Γ_∞ sont la circulation effective de la pale à la distance r et la circulation d'une hélice ayant un nombre infini de pales. Le facteur des pertes F est utilisé pour le calcul des performances du rotor en affectant les coefficients d'induction axiales et tangentielles a et a' . On suppose que les corrections ne concernent que les formules dérivées de la théorie du moment axial (2.49) et (2.52).

$$dT = 4aF \left(-aF \frac{1}{2} \rho V^2 2\pi r dr \right) \quad (2.79)$$

$$dQ = 4a'F \left(-aF \frac{1}{2} \rho V \Omega r^2 2\pi r dr \right) \quad (2.80)$$

L'identification respective des efforts (2.79) et (2.80) déduits de la théorie du moment axial avec les formules de la théorie de l'élément de pale (2.69) et (2.70) donne :

$$(1-a)^2 v_{cL} \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} \left[1 + \frac{c_D}{c_L} \tan \phi \right] = 4a'F \left(+a'F \right) \quad (2.81)$$

$$(1+a')^2 v_{cL} \frac{\sin \phi}{\cos^2 \phi} \left[1 - \frac{c_D}{c_L} \frac{1}{\tan \phi} \right] = 4a'F \left(-aF \right) \quad (2.82)$$

En tenant compte de l'équation (2.67), on peut écrire :

$$\frac{4a'F \left(-aF \right)}{\left(-a \right) \left(+a' \right)} = \frac{v_{cL}}{\cos \phi} \left[1 - \frac{c_D}{c_L} \frac{1}{\tan \phi} \right] \frac{1}{\lambda_r} \quad (2.83)$$

L'apport de cette correction est négligé dans la pratique [7]. Les relations (2.81), (2.82), (2.83) et (2.75) et les expressions des coefficients $c_L(\alpha)$ et $c_D(\alpha)$, décrivent le comportement aérodynamique du rotor.

2.6.2 Pertes de puissance pour les inductions élevées

Pour des valeurs élevées de l'induction axiale (>0.4) (Figure 2.24), la théorie du moment axial devient impuissante de décrire le comportement aérodynamique du rotor. Les différentes relations empiriques entre le facteur de poussée et d'induction axiale sont établies par corrélation des données expérimentales. A titre d'exemple on donne la corrélation [7] :

$$C_f = \begin{cases} 4a(1-a) & a \leq a_{cr} \\ 4 \left[\frac{2}{a_{cr}} + (1-2a_{cr}) \right] a & a > a_{cr} \end{cases} \quad (2.84)$$

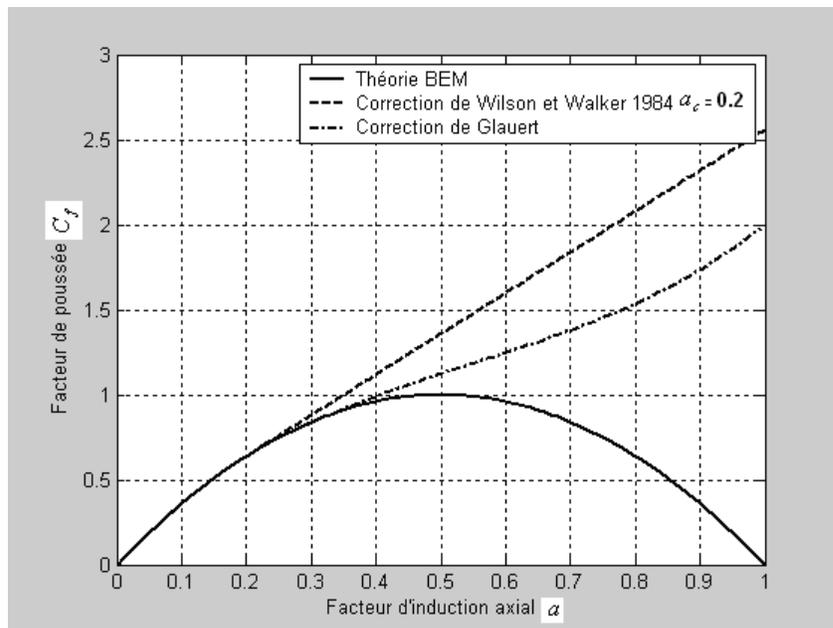


Figure 2.24 : Apport des corrections du facteur de poussée en fonction de l'induction

2.7 Conception du rotor pour le maximum de puissance

2.7.1 Optimisation de la corde des pales

La substitution de la relation (2.57) dans (2.72) et l'identification avec (2.71) donne une équation au second degré en $v.c_L$ dont la racine positive de cette équation est :

$$v.c_L = 4(1 - \cos \phi) \quad (2.85)$$

Ce qui donne l'expression optimale de la corde c le long de la pale sous la forme

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

$$c = \frac{8\pi \cdot r}{N_p c_L} \left(-\cos\phi \right) \quad (2.86)$$

Dans cette équation on utilise la valeur maximale de design c_{Ld} pour le facteur c_L .

2.7.2 Optimisation de l'écoulement d'air sur la pale

La substitution de (2.57) dans (2.67) donne :

$$\lambda_r = \left[\frac{4a - 1 - a}{a} \right] \frac{1}{\tan\phi} \quad (2.87)$$

La substitution de (2.73) dans (2.87) donne :

$$\phi = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{1}{\lambda_r}\right) \quad (2.88)$$

2.7.3 Linéarisation du coefficient de portance

Cette approche simplifiée consiste à supposer un coefficient $c_L(\alpha)$ linéaire et une corde constante.

$$c_L = c_{L0} + c'_L \alpha = c_{L0} + \frac{dc_L}{d\alpha} \alpha \quad (2.89)$$

$$\alpha = \frac{c_L - c_{L0}}{c'_L} \quad (2.90)$$

$c_{L0} = c_L(0)$ est applicable pour plusieurs profils et pour des angles d'attaque faibles.

Corrélation du coefficient de portance de design c_{Ld} en fonction de l'angle d'attaque α pour une corde constante.

$$c_{Ld} = 0.1\alpha_d + 0.13 \quad (2.91)$$

Les c_D des profils aérodynamiques se dégradent considérablement aux faibles nombres de Reynolds et leur valeur est de plus en plus incertaine. Il devient alors très hasardeux de travailler en dessous de la barre des $Re = 10^5$. Dans un ensemble de profils différents on classe faible du nombre de Reynolds, les valeurs de c_D minimum sont relativement semblables et la différence se fait surtout sur l'ampleur de la plage de c_L utilisable à une valeur proche du c_D minimal. Bien que ce soit évident, il est bon de rappeler que le meilleur rapport c_L/c_D s'obtient quand le c_D est

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

encore faible et le c_L est proche de son maximum. Pour fixer les idées à un nombre de $Re = 10^5$, les meilleurs c_D n'arrivent pas à descendre à 0.01, tandis que les meilleurs c_L/c_D passent difficilement la barre de 80. A ce petit jeu concernant la finesse, les profils à cambrure prononcée s'en tirent plutôt mieux. Mais il faut faire attention : par exemple, à diamètre rotor et portance donnés, il faut réduire la corde ou la vitesse de rotation à mesure que la cambrure augmente mais le nombre de Reynolds diminue...dilemme. Les profils candidats sont légion et s'il y avait un miracle çà se saurait ! En effet, il n'y a pas vraiment de solution unique pour un objectif de performance donné. La façon d'utiliser un profil est au moins aussi importante que le profil lui-même. Il faut donc s'impliquer sur deux aspects : savoir définir ce que l'on veut obtenir d'un profil et savoir l'utiliser de façon optimale.

2.7.4 Adéquation du calage des pales à la fabrication

$$\beta = \phi - \alpha = \phi - \frac{\frac{8\pi r}{N_p c} \left[\left(-\cos\phi \right) - c_{L0} \right]}{c'_L} \quad (2.92)$$

L'équation (2.92) est réarrangée sachant $r = \frac{\lambda_r}{\lambda} R$ et l'équation (2.89) sous la forme :

$$\beta = \phi - \frac{8\pi R}{c'_L c N_p \lambda} \left[\frac{\left(-\cos\phi \right)}{\tan\left(\frac{3}{2}\phi\right)} \right] + \frac{c_{L0}}{c'_L} \quad (2.93)$$

Le développement illimité des termes (numérateur et dénominateur entre crochet de l'éq. (2.93)) permet d'écrire :

$$\frac{\left(-\cos\phi \right)}{\tan\left(\frac{3}{2}\phi\right)} = \frac{1 - \left(1 - \frac{1}{2}\phi^2\right) + \frac{1}{2 \cdot 2^2}\phi^4 + \dots}{\frac{3}{2}\phi + \frac{27}{24}\phi^3 + \dots} \approx \frac{1}{3}\phi \quad (2.94)$$

Pour maintenir un angle de calage constant $\beta = Cte$ (adéquat pour la fabrication des pales), il faut satisfaire à la condition suivante :

$$\frac{8\pi R}{N_p c'_L c \lambda} = 3 \Rightarrow \beta = \frac{c_{L0}}{c'_L} = Cte \quad (2.95)$$

2.8 Modélisation et simulation géométrique de la corde

La géométrie de la corde est décrite par une distribution elliptique, ajustable via ses exposants. En connaissant des données de l'emplanture et le bout de la pale, l'équation elliptique basique, élevée à la puissance n permet de décrire la distribution de la corde en fonction du rayon r le long de la

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

pale sous la forme [22]:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^n + \left(\frac{y}{b}\right)^n = 1 \quad (2.96)$$

La formulation d'un système de deux équations à deux inconnues permet de déterminer les rayons de courbures de l'ellipse a et b .

$$\begin{cases} \left(\frac{r_1}{a}\right)^n + \left(\frac{c_1}{b}\right)^n = 1 \\ \left(\frac{r_2}{a}\right)^n + \left(\frac{c_2}{b}\right)^n = 1 \end{cases} \quad (2.97)$$

$\{r_1, r_2\}$ et $\{c_1, c_2\}$ sont les rayons et les cordes à l'emplanture et en bout de la pale. La solution de ce système donne les rayons a et b suivants :

$$\begin{cases} a = \left[\frac{r_2^n}{1 - \frac{c_2^n}{b^n}} \right]^{\frac{1}{n}} \\ b = \frac{c_1^n r_2^n - c_2^n r_1^n}{r_2^n - r_1^n} \end{cases} \quad (2.98)$$

La (Figure 2.25) illustre l'influence de l'exposant n sur la distribution de la corde. Le concepteur pourra ajuster la répartition de la corde pour contrôler la distribution des vitesses induites le long du rayon, ajuster le nombre de Reynolds, et également s'assurer que mécaniquement la pale fonctionne dans les limites du matériau. Cette distribution de la corde n'est utilisée que pour connaître les grandeurs locales de la corde nécessaires au calcul des vitesses induites. Le concepteur pourra par la suite positionner les profils par rapport à leurs bords d'attaque, de fuite ou un axe quelconque situé à un certain pourcentage de la corde des profils. En général, les profils sont positionnés par rapport à un axe un peu déporté vers le bord d'attaque par rapport au centre de pression du profil pour réduire les efforts de torsion à l'arbre de la pale et assurer une certaine stabilité.

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

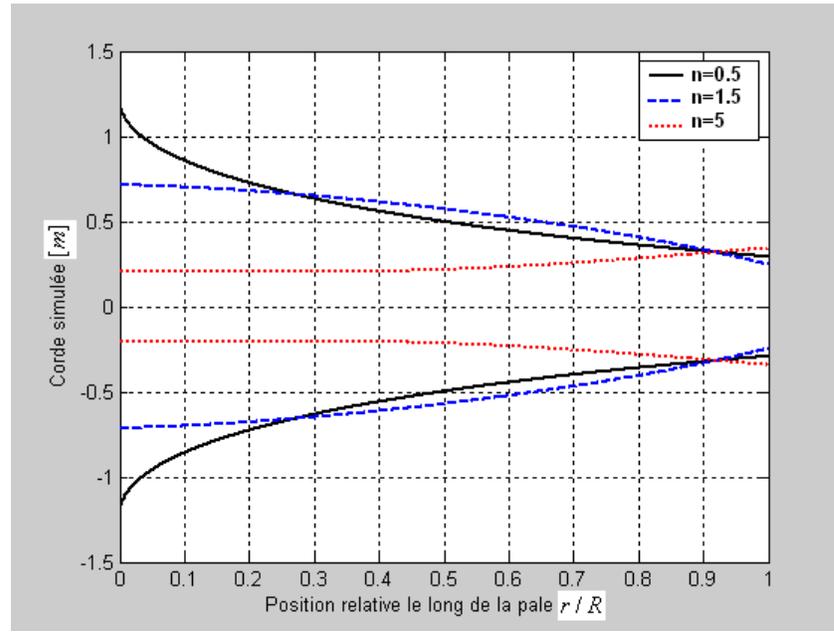


Figure 2.25 : Distribution géométrique de la corde

2.9 Algorithme de conception aérodynamique optimale du rotor éolien

Table 2.3: Rayon du rotor éolien en fonction de la vitesse moyenne du vent.

$$V_{in} = 4[m/s], V_{out} = 25[m/s], R = 6.3m$$

Vit. moy.	Energie spécif.	Energie de référence		Energie produite par l'éolienne		
		E_r	E_r	E	E	E
\bar{V} [m/s]	e_{sys} [.]	[MWh/m ² /an..]	[MWh/an..]	[MWh/m ² /an..]	[MWh/an..]	[kJ]
3.61	2.34	0.13	16.10	0.30	37.72	4.30
4.51	2.18	0.25	31.45	0.55	68.47	7.81
5.42	1.88	0.44	54.35	0.82	102.02	11.64
6.32	1.56	0.69	86.31	1.08	134.63	15.36
7.22	1.27	1.03	128.84	1.32	163.99	18.71
8.12	1.03	1.47	183.44	1.52	188.92	21.55
9.03	0.83	2.02	251.64	1.68	209.03	23.85
10.83	0.54	3.49	434.83	1.89	235.57	26.87
12.64	0.36	5.54	690.49	1.98	247.29	28.21

L'adaptation de l'éolienne au régime du vent (**Table 2.3**) permet de déterminer le rayon du rotor éolien. Cette question est traitée en détail en **Chapitre 5**.

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

Table 2.4 : Caractéristiques optimales de quelques profils aérodynamiques

Type de profil	c_D/c_L	α [°]	c_L
Plaque plane	0.1	5	0.8
Plaque courbe	0.02	3	1.25
Plaque courbe + tube sur la face concave	0.03	4	1.1
Plaque courbe + tube sur la face convexe	0.2	14	1.25
Profil NACA 4412	0.01	4	0.8

La conception d'un rotor éolien consiste à trouver les valeurs de la corde c et l'angle de calage β des pales pour un certain nombre de positions le long de la pale. Le rayon du rotor R est calculé à partir de la quantité d'énergie voulue annuelle ou une période critique, connaissant la vitesse moyenne du vent et sa distribution. Les paramètres d'entrées nécessaires pour la résolution du système d'équation non linéaire décrit plus haut sont les suivants :

- $R = 6.3m$: rayon du rotor. $R_{\min} = 0.75m$, $R_{\max} = 6.25m$.
- $\beta(r) = -1.8743r + 15.0259$ ou $\beta(r) = Cte$: angle de calage optimal prise linéaire ou constante pour cette simulation.
- $c(r)$: corde optimale le long de la pale.
- $\lambda_d = 7$: vitesse spécifique de design du rotor.
- $N_p = 3$: nombre de pales.
- $c_{Dd}(\alpha)$; $c_{Ld} = 0.1\alpha_d + 0.13$: coefficients aérodynamiques de design pour le profil NACA1244.

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

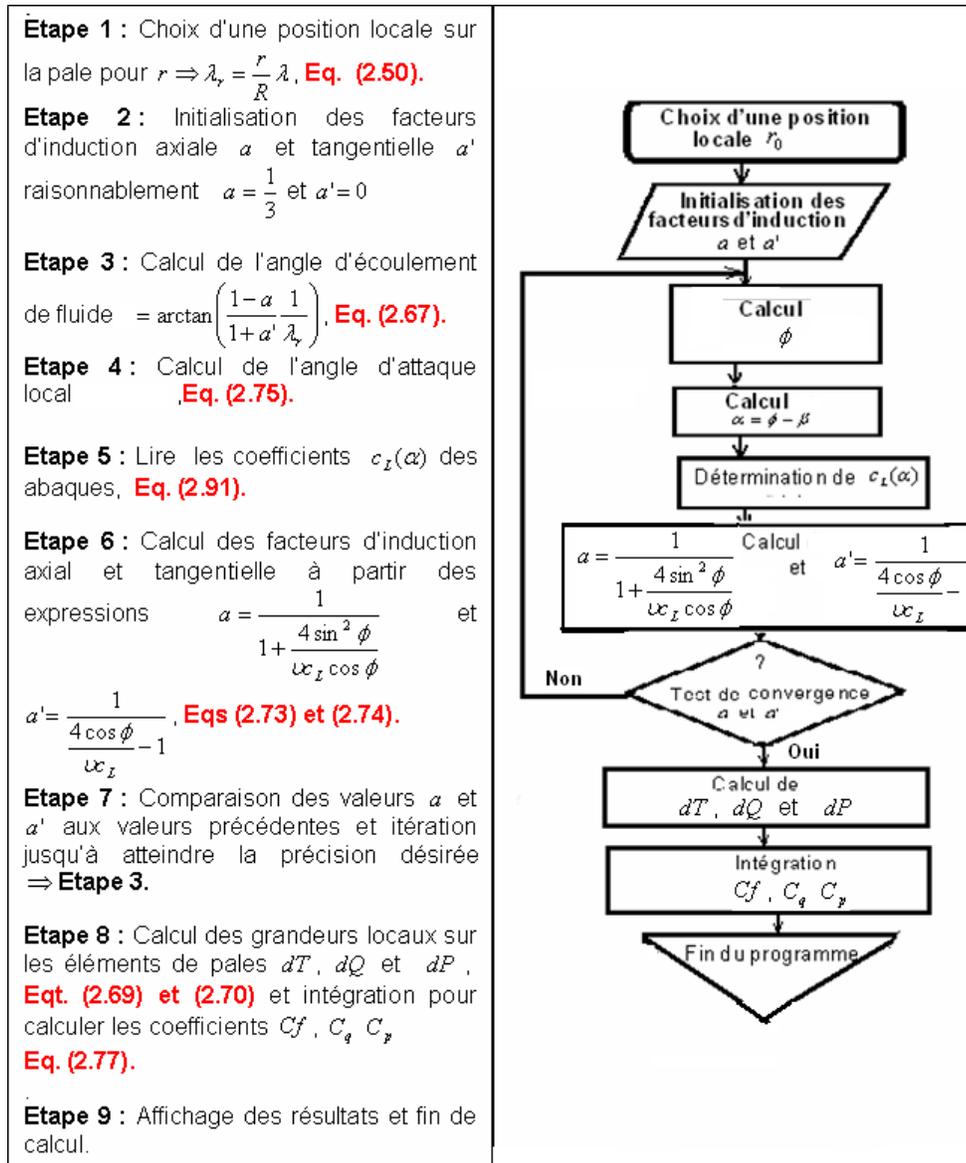


Figure 2.26 : Algorithme de calcul des performances aérodynamiques optimales du rotor [7,15, 40]

A l'exception de la corde, toutes les variables d'entrées pour un angle d'attaque fixe sont constantes le long de la pale. Le coefficient de portance peut influencer les valeurs des vitesses induites aux éléments de la pale est la grandeur de la corde. Cette dernière variable sera utilisée pour satisfaire la condition de Betz. Cette condition, expliquée en détail dans l'oeuvre de McCormick (1980), spécifie que le rotor optimal engendrera une vitesse d'impact constante traversant la surface du rotor. De plus, sachant que l'épaisseur du profil est directement lié à la longueur de la corde, la distribution de la corde influencera également les propriétés mécaniques de la pale. En effet, à l'aide de la distribution de la corde, on pourra contrôler la distribution des contraintes dans la section de la pale.

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

Table 2.5 : Forme aérodynamique optimale de la pale

Posit. Sur la pale	Coefficient de portance constant $c_L = cte$					Corde constante $c = cte$			
	r/R [-]	λ_r [-]	ϕ [°]	β [°]	c_{opt} [m]	c_{sim} [m]	c_L [-]	α [°]	β [°]
0.29	2.0000	17.7100	13.7100	0.8933	0.7258	1.1071	7.9101	9.7999	11.6522
0.30	2.1111	16.8975	12.8975	0.8590	0.7090	1.0646	7.4411	9.4563	11.4647
0.32	2.2222	16.1518	12.1518	0.8267	0.6928	1.0246	6.9994	9.1524	11.2773
0.33	2.3333	15.4657	11.4657	0.7963	0.6771	0.9869	6.5837	8.8820	11.0899
0.35	2.4444	14.8327	10.8327	0.7677	0.6621	0.9514	6.1926	8.6400	10.9024
0.37	2.5556	14.2471	10.2471	0.7408	0.6475	0.9181	5.8248	8.4223	10.7150
0.38	2.6667	13.7040	9.7040	0.7155	0.6334	0.8867	5.4786	8.2254	10.5276
0.40	2.7778	13.1993	9.1993	0.6916	0.6197	0.8572	5.1526	8.0467	10.3401
0.41	2.8889	12.7290	8.7290	0.6692	0.6065	0.8293	4.8454	7.8836	10.1527
0.43	3.0000	12.2900	8.2900	0.6480	0.5936	0.8031	4.5557	7.7343	9.9653
0.44	3.1111	11.8793	7.8793	0.6280	0.5811	0.7783	4.2822	7.5971	9.7778
0.46	3.2222	11.4943	7.4943	0.6091	0.5690	0.7548	4.0238	7.4705	9.5904
0.48	3.3333	11.1328	7.1328	0.5912	0.5572	0.7327	3.7793	7.3535	9.4030
0.49	3.4444	10.7928	6.7928	0.5742	0.5457	0.7117	3.5478	7.2450	9.2155
0.51	3.5556	10.4724	6.4724	0.5582	0.5345	0.6918	3.3284	7.1440	9.0281
0.52	3.6667	10.1701	6.1701	0.5430	0.5236	0.6729	3.1202	7.0499	8.8407
0.54	3.7778	9.8843	5.8843	0.5285	0.5129	0.6550	2.9224	6.9619	8.6532
0.56	3.8889	9.6138	5.6138	0.5148	0.5026	0.6380	2.7344	6.8795	8.4658
0.57	4.0000	9.3575	5.3575	0.5017	0.4925	0.6217	2.5554	6.8021	8.2784
0.59	4.1111	9.1142	5.1142	0.4892	0.4826	0.6063	2.3849	6.7293	8.0909
0.60	4.2222	8.8830	4.8830	0.4773	0.4729	0.5915	2.2223	6.6607	7.9035
0.62	4.3333	8.6631	4.6631	0.4659	0.4635	0.5775	2.0671	6.5960	7.7161
0.63	4.4444	8.4536	4.4536	0.4551	0.4543	0.5640	1.9188	6.5348	7.5286
0.65	4.5556	8.2538	4.2538	0.4447	0.4453	0.5512	1.7770	6.4768	7.3412
0.67	4.6667	8.0632	4.0632	0.4348	0.4365	0.5389	1.6414	6.4218	7.1538
0.68	4.7778	7.8810	3.8810	0.4253	0.4279	0.5271	1.5114	6.3696	6.9663
0.70	4.8889	7.7068	3.7068	0.4162	0.4194	0.5158	1.3869	6.3199	6.7789
0.71	5.0000	7.5400	3.5400	0.4075	0.4112	0.5050	1.2674	6.2726	6.5915
0.73	5.1111	7.3801	3.3801	0.3991	0.4031	0.4946	1.1526	6.2275	6.4041
0.75	5.2222	7.2269	3.2269	0.3910	0.3952	0.4846	1.0424	6.1845	6.2166
0.76	5.3333	7.0798	3.0798	0.3832	0.3874	0.4750	0.9364	6.1433	6.0292
0.78	5.4444	6.9385	2.9385	0.3758	0.3798	0.4657	0.8345	6.1040	5.8418
0.79	5.5556	6.8026	2.8026	0.3686	0.3724	0.4568	0.7363	6.0663	5.6543
0.81	5.6667	6.6720	2.6720	0.3617	0.3651	0.4483	0.6418	6.0302	5.4669
0.83	5.7778	6.5462	2.5462	0.3550	0.3579	0.4400	0.5506	5.9956	5.2795
0.84	5.8889	6.4250	2.4250	0.3486	0.3509	0.4320	0.4627	5.9623	5.0920
0.86	6.0000	6.3082	2.3082	0.3424	0.3440	0.4243	0.3778	5.9304	4.9046
0.87	6.1111	6.1955	2.1955	0.3364	0.3372	0.4169	0.2959	5.8997	4.7172
0.89	6.2222	6.0868	2.0868	0.3306	0.3306	0.4097	0.2167	5.8701	4.5297
0.90	6.3333	5.9818	1.9818	0.3250	0.3241	0.4028	0.1401	5.8416	4.3423
0.92	6.4444	5.8803	1.8803	0.3196	0.3177	0.3961	0.0661	5.8142	4.1549

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

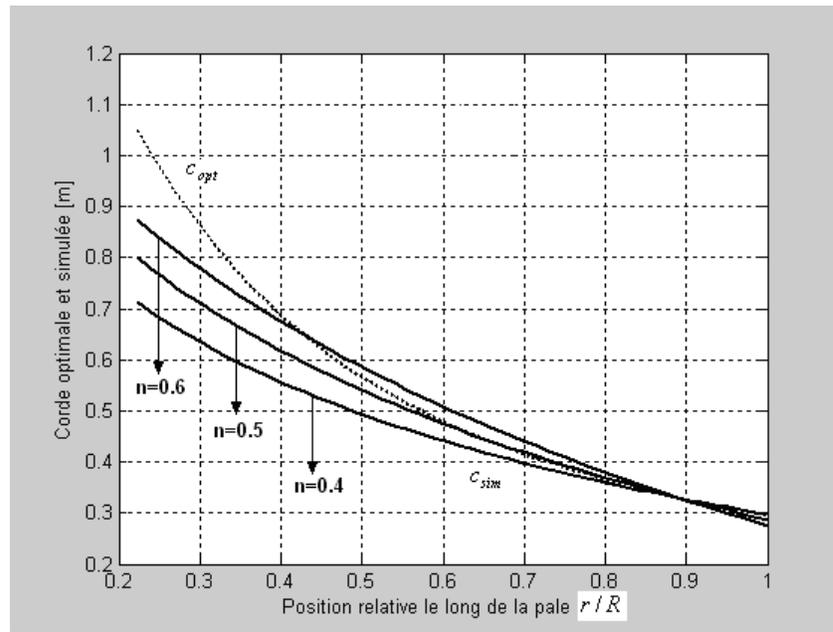


Figure 2.27 : Distribution de la corde optimale et simulée le long de la pale.

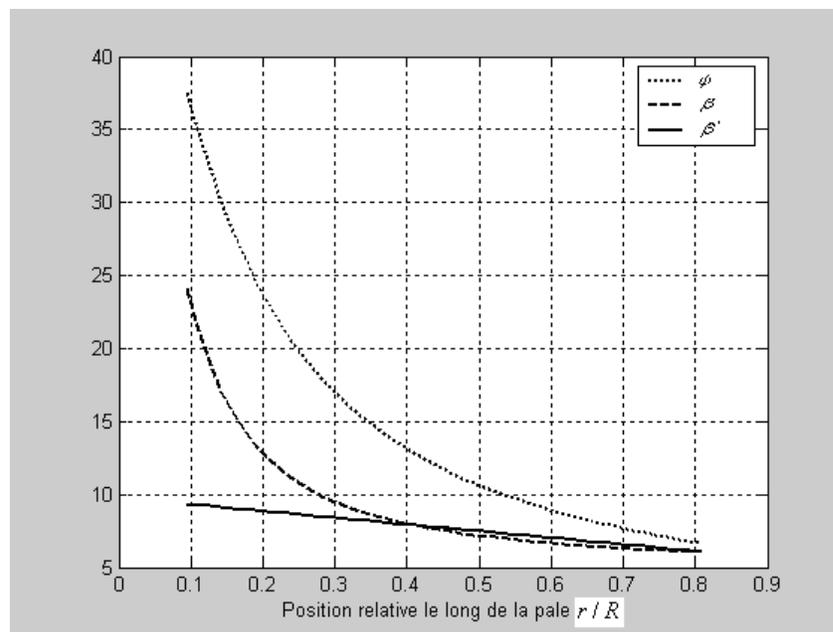


Figure 2.28 : Distribution de l'angle de calage et d'écoulement d'air le long de la pale

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

Table 2.6 : Simulation des efforts aérodynamiques sur le rotor ($V = 25\text{m/s}$, $\beta(r)$: Linéaire)

Position relative r/R [-]	Induction axiale a [-]	Induction tang. a' [-]	Force axiale [kN/m]	Force tang. [kN/m]	Force résult. [kN/m]	Moment de torsion [kNm/m]	Puissance absorbée [kW]
0.12	0.3126	0.2480	0.5182	0.3351	0.6171	0.2513	06.9810
0.16	0.3192	0.1527	0.6978	0.3620	0.7861	0.3620	10.0555
0.20	0.3233	0.1028	0.8773	0.3772	0.9549	0.4714	13.0955
0.24	0.3259	0.0737	1.0564	0.3860	1.1247	0.5790	16.0820
0.28	0.3276	0.0552	1.2353	0.3912	1.2958	0.6846	19.0154
0.32	0.3288	0.0429	1.4139	0.3942	1.4678	0.7884	21.9003
0.36	0.3297	0.0342	1.5923	0.3959	1.6408	0.8907	24.7414
0.40	0.3303	0.0279	1.7705	0.3966	1.8144	0.9915	27.5428
0.44	0.3308	0.0232	1.9487	0.3968	1.9886	1.0911	30.3075
0.48	0.3312	0.0196	2.1267	0.3965	2.1633	1.1894	33.0379
0.52	0.3315	0.0167	2.3046	0.3958	2.3384	1.2865	35.7360
0.56	0.3318	0.0145	2.4825	0.3950	2.5137	1.3825	38.4032
0.60	0.3320	0.0126	2.6603	0.3940	2.6893	1.4775	41.0405
0.63	0.3321	0.0111	2.8381	0.3928	2.8651	1.5714	43.6489
0.67	0.3323	0.0099	3.0158	0.3916	3.0411	1.6642	46.2289
0.71	0.3324	0.0088	3.1935	0.3903	3.2173	1.7561	48.7813
0.75	0.3325	0.0079	3.3712	0.3888	3.3936	1.8470	51.3064
0.79	0.3325	0.0071	3.5489	0.3874	3.5700	1.9370	53.8046
0.83	0.3326	0.0065	3.7265	0.3859	3.7464	2.0259	56.2762
0.87	0.3327	0.0059	3.9041	0.3844	3.9230	2.1140	58.7214
0.91	0.3327	0.0054	4.0817	0.3828	4.0996	2.2011	61.1405
0.95	0.3328	0.0050	4.2593	0.3812	4.2764	2.2872	63.5337
0.99	0.3328	0.0046	4.4369	0.3796	4.4531	2.3724	65.9010

Table 2.7 : Influence du calage de la pale sur les efforts sur le rotor

Effort sur le rotor	β : calage linéaire	β : calage constant	Erreur relative %
Force axiale totale F_a [kN]	13.607	12.5229	7.97
Force tang. totale F_t [kN]	3.455	2.0071	41.91
Force résultante T [kN]	14.0388	12.7263	9.35
Couple totale Q [kNm]	7.489	6.8772	8.17
Puissance produite P [kW]	213.67	191.0326	10.59
Facteur de force C_f [%]	88.6	80.31	9.36
Facteur de couple C_q [%]	7.5	6.89	8.13
Facteur de puissance C_p [%]	53.94	48.22	10.60

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

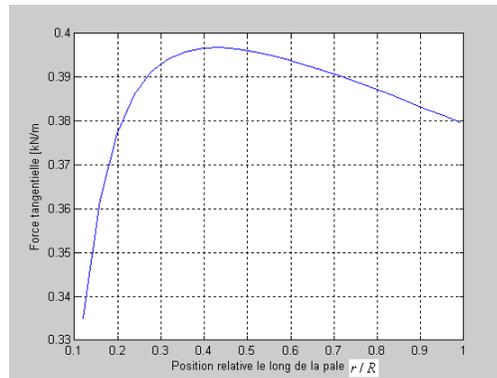


Figure 2.29 : Distribution de la force tangentielle le long de la pale

La force tangentielle (**Figure 2.29**) fonction de la corde et de l'angle d'attaque est caractérisée par une distribution de forme triangulaire le long de la pale profilée à partir du centre de poussée. L'erreur commise sur l'intensité de cette force est importante (plus de 40 %) si on utilise un angle de calage constant au lieu d'un angle linéaire.

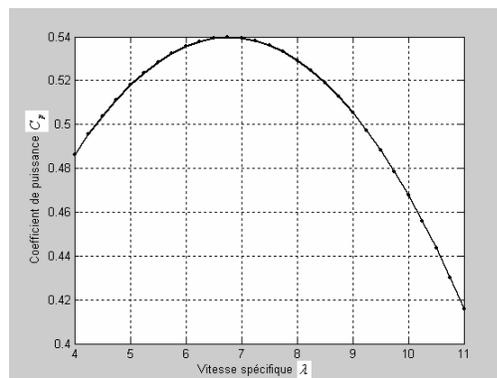


Figure 2.30 : Influence de la vitesse spécifique sur le facteur de puissance

La figure (**Figure 2.30**), montre que le facteur de puissance dépasse les 50% pour des vitesses spécifiques supérieures à 4.5 relatives aux éoliennes rapides, atteint son maximum 54 % pour une vitesse d'environ 6.75 et commence à diminuer à partir d'une vitesse spécifique de 11 à cause de la chute de la portance.

La variation du pas d'incrémentation (**Figure 2.31**), le long de la pale de 0.1 à 1 avec une précision de 10^{-4} induit une erreur de 0.7 à 1.5 % sur le facteur de puissance de l'éolienne.

Chapitre II : Modélisation aérodynamique optimale du rotor par la méthode BEM (Blade Element Momentum Theory)

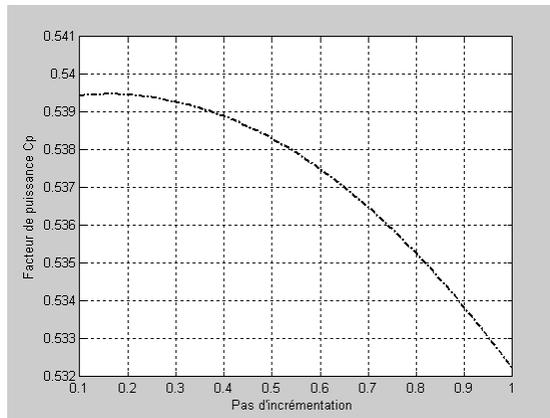


Figure 2.31 : Influence du pas d'incrément sur le facteur de puissance

2.10 Conclusion :

La méthode BEM est basée sur la détermination du point de fonctionnement (puissance) optimal du rotor obtenu par l'intersection de deux méthodes : moment axial et élément de pale. Elle est illustrée par un algorithme (Figure 2.26) basé sur un seul test de convergence (puissance désirée). Sous Matlab6.5, on utilise une seule instruction: **while and(norm(a- a')>0,norm(a'-a'*)>0)**. Vu que la méthode est analytique, on peut procéder sans recours à la discrétisation numérique et on arrête le calcul dès que la puissance désirée par rapport à la limite de Betz est obtenue.

Procédure d'application de la méthode BEM

- L'hypothèse du nombre infini de pales est corrigée par la corrélation de Prandtl pour le maximum des pertes en bout de pale $F = 1$.
- Le facteur de traînée est négligé devant le facteur de portance car la corde de la pale est faible $c = 0.63m$.
- La vitesse spécifique de design optimale est déterminée par la méthode du moment axial égale à $\lambda = 7$ pour le maximum de puissance.
- La fourchette des paramètres d'induction axiale et tangentielle $0.25 < a < 0.33$ et $0 < a' < \infty$ d'initialisation de l'algorithme est déterminée par la méthode du moment axial pour le maximum de puissance. Le choix judicieux des facteurs d'interférence axial et tangentiel facilite la convergence de la méthode itérative avec un temps de calcul minimal.
- L'angle de calage optimal et linéarisé est déterminé selon des considérations aérodynamiques sur le profil avant son utilisation dans l'algorithme.
- La condition de conception optimale $\frac{8\pi R}{N_p c'_L c \lambda} = 3 \Rightarrow \beta = cte$ adéquate pour la fabrication est déterminée en fonction des paramètres aérodynamiques.
- La simulation de l'écoulement sur le rotor est effectuée pour le cas le plus défavorable $V = 25m/s$: limite de fonctionnement des éoliennes de moyennes puissances.

La méthode BEM est basée uniquement sur des sollicitations aérodynamiques (portance et traînée) exercées sur le rotor sans tenir compte des autres charges (massiques, inertielles et dynamiques). Une modélisation des contraintes mécaniques sur le rotor s'avère plus que nécessaire. Elle permettrait de cerner les problèmes de : charge dynamique, facteur de sécurité...

Chapitre III

Modélisation des contraintes mécaniques sur le rotor

3.1 Introduction

La machine éolienne fonctionne grâce aux forces du vent exercées sur son rotor. Ces forces sont transmises à la charge (générateur) et l'interaction entre le rotor et la charge est la cause de la variation des efforts (forces ou moments) dans chaque partie de la structure de l'éolienne.

Un système éolien classique typique est constitué par les éléments rigides de la **(Figure 3.32)** :

- Une roue éolienne qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.
- Un multiplicateur de vitesse qui augmente la vitesse de rotation et diminue le couple.
- Un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

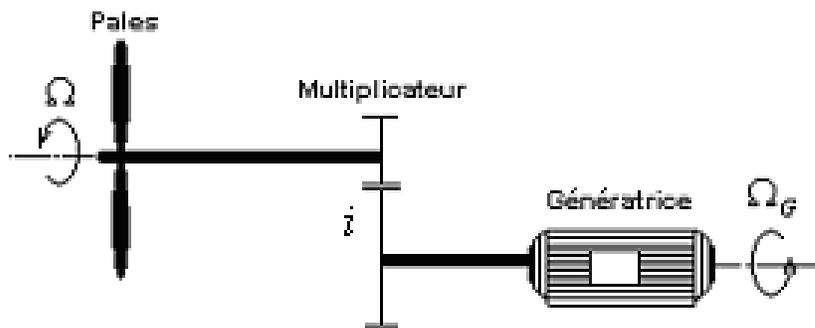


Figure 3.32 : Modèle d'une éolienne typique

- Les pales exercent des couples, des forces de poussée, des forces d'inertie et des forces exercées par la charge.
- L'arbre est sollicité à la flexion et à la torsion.
- Les roulements de l'arbre sont sollicités à des forces axiales et radiales.
- Le gouvernail est soumis à des forces aérodynamiques du vent et le poids.
- Le pylône est soumis à des forces de compression, aérodynamiques, poids et tension.

En principe, les contraintes qui s'exercent dans n'importe quelle partie de la structure peuvent être calculées là où la vitesse du vent est maximale en minimisant chaque boulon, chaque soudure et collerette, dans les parties les plus vitales de la structure en analysant les pales, les roulements et le pylône. Étant donné que la charge maximale a lieu près du moyeu du rotor, la section trouvée de la pale près du moyeu est dans la plupart des cas la section normalisée ait que de plus la charge sur une pale dépend de la position de la pale dans le plan du rotor. Il est considéré que le centre aérodynamique de poussée de la pale se trouve sur le rayon du rotor à une distance de $\frac{1}{3}R$. Les forces aérodynamiques imposent uniquement un moment de flexion et non de torsion sur le support de la pale, cette question sera traitée avec plus de détail dans la partie vibratoire. Afin de faciliter la lecture des grandeurs physiques traitées, on adopte le système d'indexation X_{ijk} suivant :

Chapitre III : Modélisation des contraintes mécaniques sur le rotor

- Le premier indice décrit l'élément de l'éolienne sur lequel agit un effort (moment ou force), exemple I_r inertie du rotor, F_b force sur une pale (Blade) et Q_G moment exercé par le générateur.
- Le second indice se réfère à l'origine de l'effort exemple F_{rt} force sur le rotor due à la poussée (Thrust), M_{bq} moment sur la pale du au couple (Torque).
- Le troisième indice indique le sens de l'effort exercé (axiale, radial ou tangential) exemple : F_{rit} force exercée sur le rotor due à l'inertie tangentielle et M_{bga} moment exercé sur la pale du à la gravité axiale.

3.2 Les charges sur le rotor de l'éolienne [37, 59, 60, 61]

Les charges sur les pales du rotor proviennent des forces aérodynamiques (couples et poussées), forces de gravitation (poids et inertie) et couple exercé par le générateur électrique. La rotation du rotor est causée par l'action du moment sur son axe de rotation. Ces moments sont dus aux forces aérodynamiques agissant sur les pales dans le plan du rotor et créent un couple aérodynamique Q et un couple du générateur électrique Q_G . On considère que le moment d'inertie du moyeu I_m et de l'arbre I_a sont petits par rapport au moment d'inertie du rotor (des pales) $I = \int_p I_b$.

3.2.1 Forces de cisaillement de la pale

L'application de la loi fondamentale de la dynamique à un élément de pale dm en rotation dans le plan oyz autour de l'axe ox (Figure 3.33) donne :

$$dF = \frac{d^2\theta}{dt^2} r dm \quad (3.99)$$

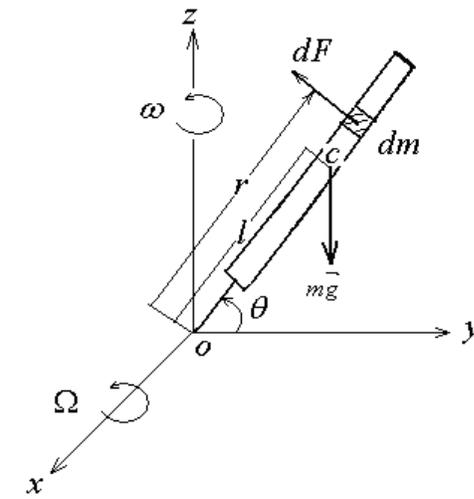


Figure 3.33 : Élément de pale en rotation

La force de cisaillement F_{bq} sur la pale due au couple agissant près du moyeu est la résultante de toutes les forces d'accélération dF .

$$F_{bq} = \int_0^R dF = \frac{d^2\theta}{dt^2} \int_0^R r dm = I_b \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (3.100)$$

I_b : Moment statique de la pale.

L'identification de l'équation (3.99) avec (3.100) permet de déterminer la force de cisaillement F_{bq} exercée sur la pale de la manière suivante :

$$F_{bq} R = \left[C_q \frac{1}{2} \pi \rho V^2 R^3 - Q_G \right] \quad (3.101)$$

3.2.2 Forces de poussée sur la pale

La force de poussée F_{bt} agissant sur le rotor est la résultante des forces axiales admises linéaires le long du rayon exercées sur le rotor (Figure 3.34). La poussée produit une force de cisaillement de même qu'un moment de flexion sur la pale au niveau du moyeu.

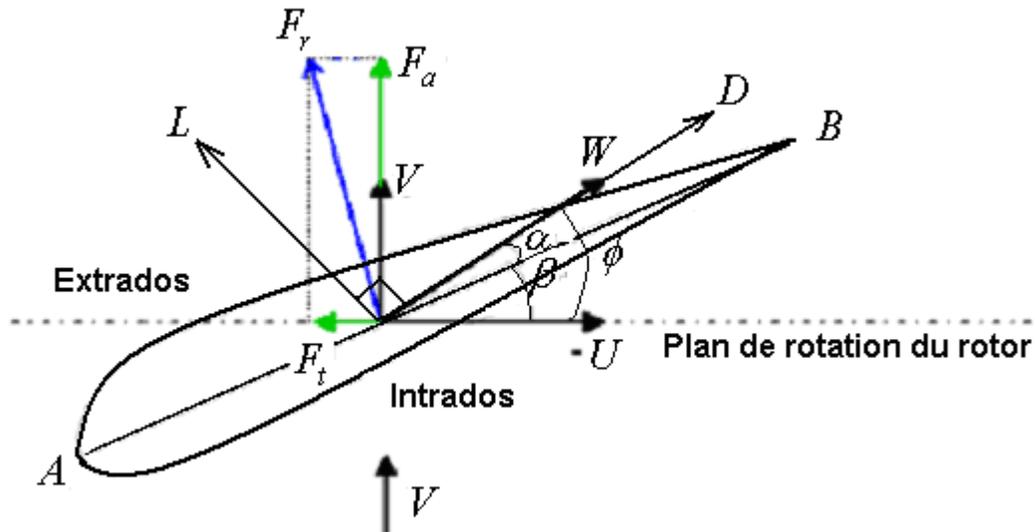


Figure 3.34 : Forces axiales et tangentielles sur un élément de pale

$$F_{bt} = \frac{C_f \frac{1}{2} \rho V^2 \pi R^2}{N_p} \quad (3.102)$$

En tenant compte du centre de poussée aérodynamique situé à $(2/3)R$, le moment de flexion sur la pale est donné par l'expression :

$$M_{bt} = F_{bt} \left(\frac{2}{3} R \right) = \frac{C_f \frac{1}{3} \pi \rho V^2 R^3}{N_p} \quad (3.103)$$

3.2.3 Forces de masse sur la pale

Le poids de la pale $m\vec{g}$ induit un moment de flexion M_{bgt} , une force tangentielle F_{bgt} et une force radiale F_{bgr} .

$$M_{bgt} = -mgl \sin \theta \quad (3.104)$$

$$F_{bgt} = -mg \sin \theta \quad (3.105)$$

$$F_{bgr} = mg \cos \theta \quad (3.106)$$

3.2.4 Forces d'inertie sur la pale (Effet gyroscopique)

Le mouvement simultané de la tête d'orientation ω avec la rotation du rotor Ω (Figure 3.35), produit des forces d'inertie et des moments sur les pales (effet gyroscopique). Ce mouvement composé de l'éolienne autour de l'axe oz_1 et de rotation du rotor autour de l'axe ox est modélisé par un paramétrage de deux angles d'Euler θ et ψ mesurant la rotation propre de la pale et l'orientation de la tête de l'éolienne.

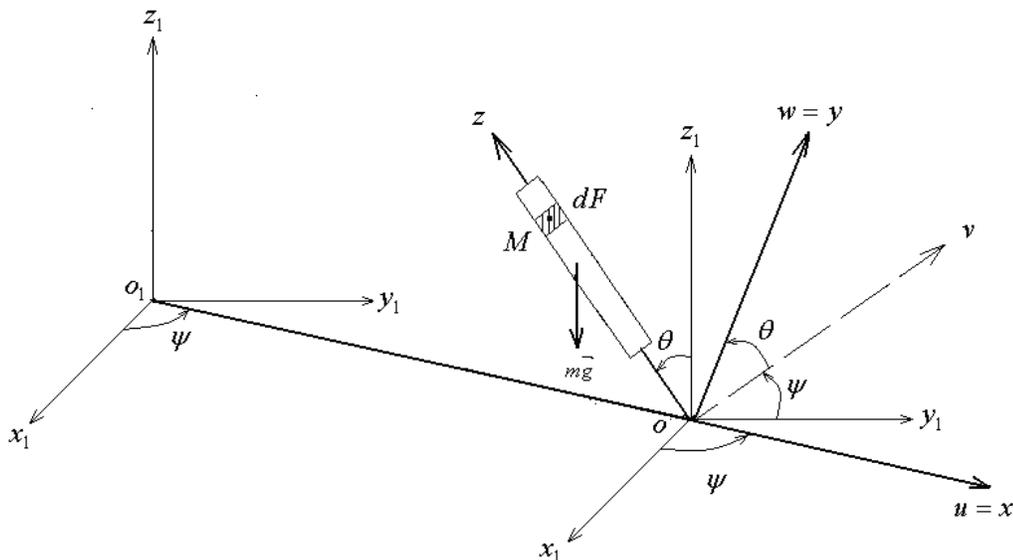


Figure 3.35 : Mouvement simultané du rotor et de la tête de l'éolienne

Chapitre III : Modélisation des contraintes mécaniques sur le rotor

La rotation du repère fixe $\mathfrak{R}_1 \langle x_1 y_1 z_1 \rangle$ autour de l'axe oz_1 d'un angle ψ donne le repère lié au boîtier d'orientation $\mathfrak{R}_2 \langle uvz_1 \rangle$ ensuite par une rotation d'un angle θ par rapport à $ou = ox$ donne le repère lié à la pale $\mathfrak{R}_3 \langle uwz = xyz \rangle$. ox axe de rotation de la pale, oz l'axe de la pale. $o_1o = e$ excentricité et $\overline{oM} = r$ rayon vecteur le long de la pale. Les coordonnées du point M dans le repère \mathfrak{R}_1 sont :

$$\begin{cases} x_1 = e \cdot \cos \psi + r \sin \theta \sin \psi \\ y_1 = e \cdot \sin \psi - r \sin \theta \cos \psi \\ z_1 = r \cos \theta \end{cases} \quad (3.107)$$

En tenant compte des conditions initiales du mouvement :

$$\begin{cases} t = 0 \Rightarrow \ddot{\psi} = \ddot{\theta} = \dot{\psi} = 0 \\ \dot{\theta} = \Omega, \dot{\psi} = \omega \end{cases} \quad (3.108)$$

Les forces exercées par l'élément de masse dm sur le reste de la pale sont :

$$\begin{cases} dF_{x_1} = \ddot{x}_1 dm = \langle e \cdot \Omega^2 + 2r\Omega\omega \cos \theta \rangle dm \\ dF_{y_1} = \ddot{y}_1 dm = \langle \omega^2 \sin \theta + r\Omega^2 \sin \theta \rangle dm \\ dF_{z_1} = \ddot{z}_1 dm = \langle r\omega^2 \cos \theta \rangle dm \end{cases} \quad (3.109)$$

Expression de ces forces en termes de forces axiales, tangentielles et radiales en tenant compte des coordonnées du point M dans les trois repères :

$$\mathfrak{R}_2 \begin{cases} u = 0 \\ -v = r \sin \theta \\ z_1 = r \cos \theta \end{cases} \Rightarrow \mathfrak{R}'_1 \begin{cases} x'_1 = v \sin \psi = r \sin \theta \sin \psi \\ -y'_1 = -v \cos \psi = r \sin \theta \cos \psi \\ z'_1 = r \cos \theta \end{cases} \Rightarrow \mathfrak{R}_1 \begin{cases} x_1 = e \cdot \cos \psi + r \sin \theta \sin \psi \\ y_1 = e \cdot \sin \psi - r \sin \theta \cos \psi \\ z_1 = r \cos \theta \end{cases} \quad (3.110)$$

$$\begin{cases} dF_{bia} = dF_{x_1} \Rightarrow F_{bia} = \int_0^R \langle e \cdot \Omega^2 + 2r\Omega\omega \cos \theta \rangle dm \\ dF_{bit} = dF_y \cos \theta + dF_z \sin \theta \Rightarrow F_{bit} = \int_0^R \langle \Omega^2 \sin \theta \cos \theta \rangle dm \\ dF_{bir} = dF_y \sin \theta - dF_z \cos \theta \Rightarrow F_{bir} = \int_0^R \langle \omega^2 + r\Omega^2 \sin^2 \theta \rangle dm \end{cases} \quad (3.111)$$

En négligeant l'excentricité $e = 0$, les équations (3.111) donnent :

$$\begin{cases} F_{bia} = I_b 2\omega\Omega \cos\theta \\ F_{bit} = I_b \Omega^2 \sin\theta \cos\theta \\ F_{bir} = I_b (\omega^2 + \Omega^2 \sin^2\theta) \end{cases} \quad (3.112)$$

F_{bia} et F_{bit} engendrent les moments de flexion tangentiel M_{bit} et axial M_{bia} suivants :

$$\begin{cases} M_{bia} = \int_0^R \Omega^2 \sin\theta \cos\theta r dm = I_b \Omega^2 \sin\theta \cos\theta \\ M_{bit} = \int_0^R r \Omega \omega \cos\theta dm = 2I_b \Omega \omega \cos\theta \end{cases} \quad (3.113)$$

3.3 Contrainte dans le support de la pale [55]

Afin de déterminer les contraintes de flexion, de cisaillement et de traction compression dues aux efforts calculés précédemment et agissant sur le support de la pale à la liaison avec le moyeu, nous considérons que le support a une section transversale A_b et un moment d'inertie I_b .

3.3.1 Contrainte de cisaillement

Les forces axiales et tangentielles sont orthogonales et agissent dans un plan perpendiculaire au rayon du rotor (support de la pale). La contrainte de cisaillement résultante est fonction de l'angle de rotation des pales θ et est donnée par l'expression.

$$\tau_{bc} = \frac{F_{tot}}{A_b} = \frac{\sqrt{\sum F_a^2 + \sum F_t^2}}{A_b} \quad (3.114)$$

3.3.2 Contrainte de traction_compression

Les forces radiales agissent sur le rotor et produisent une contrainte de tract_comp. fonction de l'angle θ et est considérée comme constante dans la section A_b .

$$\sigma_{br} = \frac{\sum F_r}{A_b} \quad (3.115)$$

3.3.3 Contrainte de flexion

La résultante des moments orthogonaux tangentiels et axiaux produit une contrainte de flexion σ_{ba} dans le support de la pale à la liaison avec le moyeu sous la forme :

$$\sigma_{ba} = \frac{M_{tot}}{W_b} = \frac{\sqrt{\sum M_a^2 + \sum M_t^2}}{\frac{I_b}{d}} \quad (3.116)$$

d distance de l'axe neutre au fibre la plus éloignée. Cette contrainte de flexion est fonction de l'angle de rotation θ . Pour une section transversale de géométrie arbitraire, le moment d'inertie est directionnel et σ_{ba} dépend de la direction du moment total. Pour les rotors avec support annulaire, I_b est non directionnel et la contrainte de flexion σ_{ba} dépend seulement de la valeur maximale du moment M_{tot} .

3.3.4 Contrainte équivalente

L'effet combiné des contraintes τ_{bc} , σ_{br} et σ_{ba} peut être appréciée par une tension de référence σ_{HH} de Huber-Henky majorée par la contrainte admissible du matériau $\bar{\sigma}$.

$$\sigma_{HH} = \sqrt{(\sigma_{ba} + \sigma_{br})^2 + 3\tau_{bc}^2} \leq \bar{\sigma} \quad (3.117)$$

3.3.5 Section admissible du support de la pale

a. Cas du support circulaire $A_b = \pi a^2$ et $W_b = \pi \frac{a^3}{2}$

$$a^6 - \frac{3F_{tot}^2 + F_r^2}{\pi^2 \bar{\sigma}^2} a^2 - 4 \frac{M_{tot} F_r}{\pi^2 \bar{\sigma}^2} a - 4 \frac{M_{tot}^2}{\pi^2 \bar{\sigma}^2} = 0 \quad (3.118)$$

b. Cas du support carré $A_b = a^2$ et $W_b = \frac{a^3}{6}$

$$a^6 - \frac{3F_{tot}^2 + F_r^2}{\bar{\sigma}^2} a^2 - 12 \frac{M_{tot} F_r}{\bar{\sigma}^2} a - 36 \frac{M_{tot}^2}{\bar{\sigma}^2} = 0 \quad (3.119)$$

c. Cas du support rectangulaire $A_b = bh = \frac{h^2}{2}$ et $W_b = \frac{h^3}{12}$

$$h^6 - 4 \frac{3F_{tot}^2 + F_r^2}{\bar{\sigma}^2} h^2 - 48 \frac{M_{tot} F_r}{\bar{\sigma}^2} h - 144 \frac{M_{tot}^2}{\bar{\sigma}^2} = 0 \quad (3.120)$$

Table 3.8: Section admissible du support de la pale A_b [cm²]

Calculée pour $V = 25m/s$

	Section circulaire	Section carrée	Section rectangulaire
$\omega = 0$	571.4025	792.8530	638.3953
$\omega = 0.1\Omega$	582.7225	808.6551	651.0708
$\omega = 0.25\Omega$	689.8821	970.3060	774.7135

Le mouvement de la tension de référence $\sigma_{HH} = \sigma_b \leq \bar{\sigma}$ coïncide avec le mouvement du moment total M_{tot} qui est défini par l'angle χ de la manière suivante :

$$\chi = \arctan \left[\frac{\sum M_t}{\sum M_a} \right] \tag{3.121}$$

Le mouvement de M_{tot} est fonction de la position de la pale définie par l'angle θ et la position relative des pales.

3.3.6 Simulation des contraintes maximales sur le rotor ($V = 25m/s$)

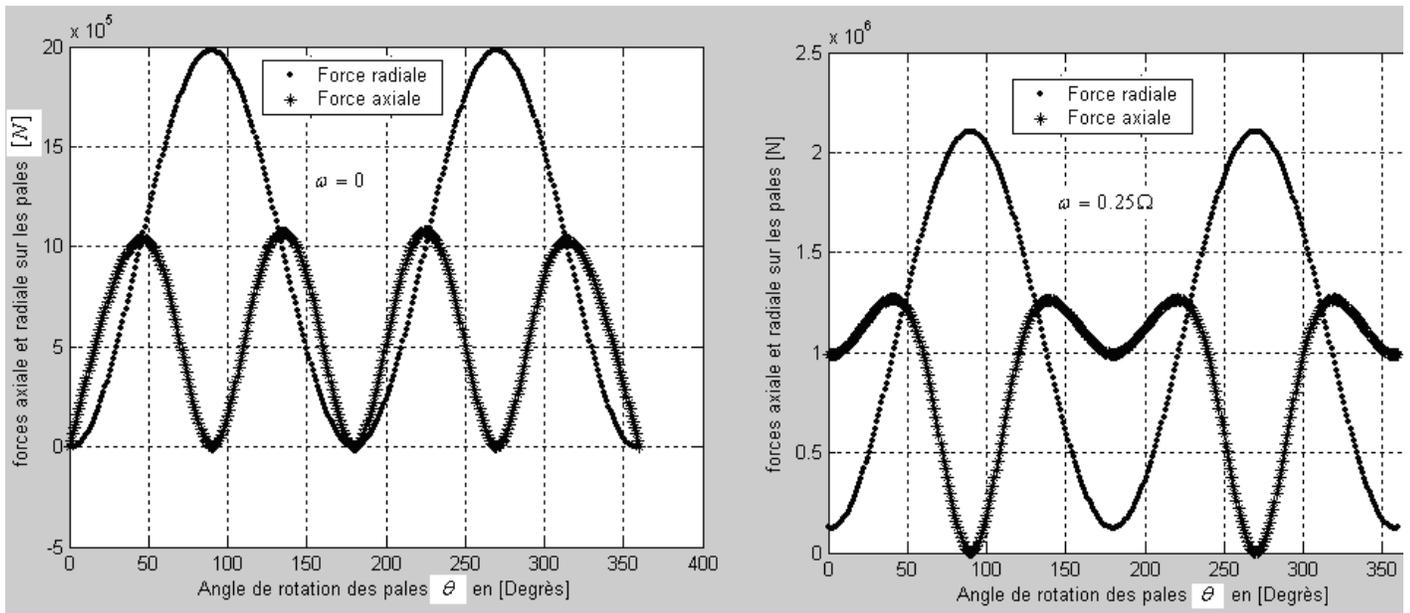


Figure 3.36 : Forces sur le rotor

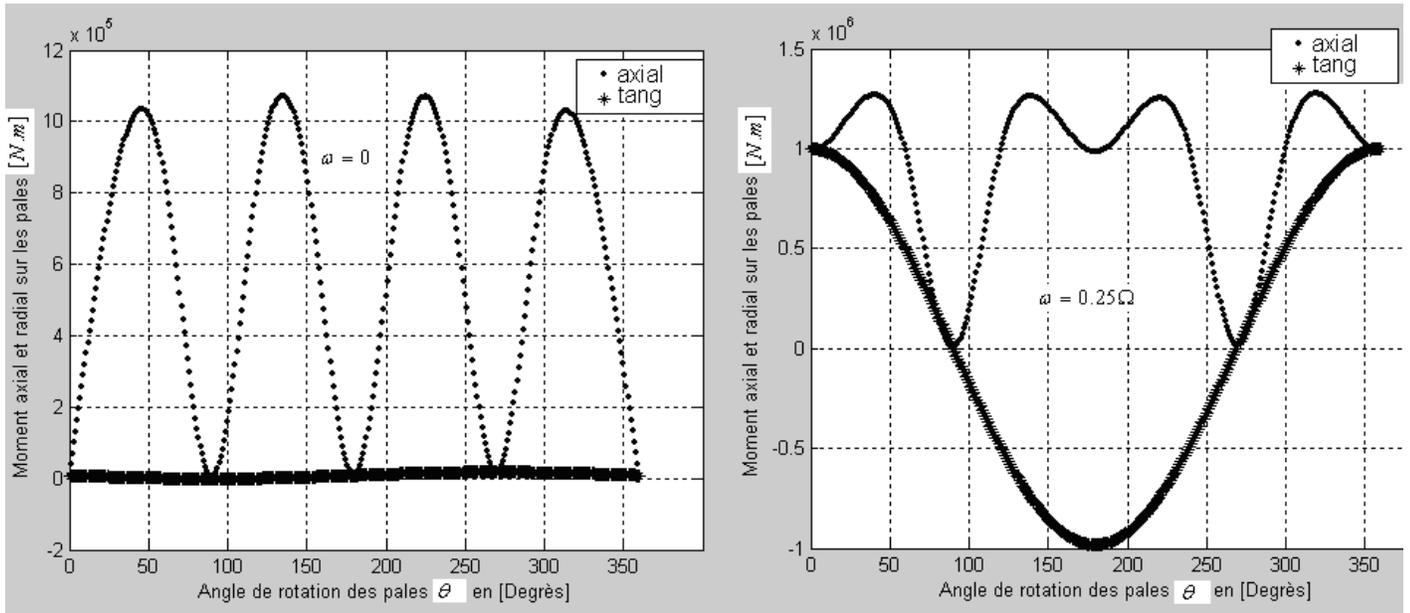


Figure 3.37 : Moments sur le rotor.

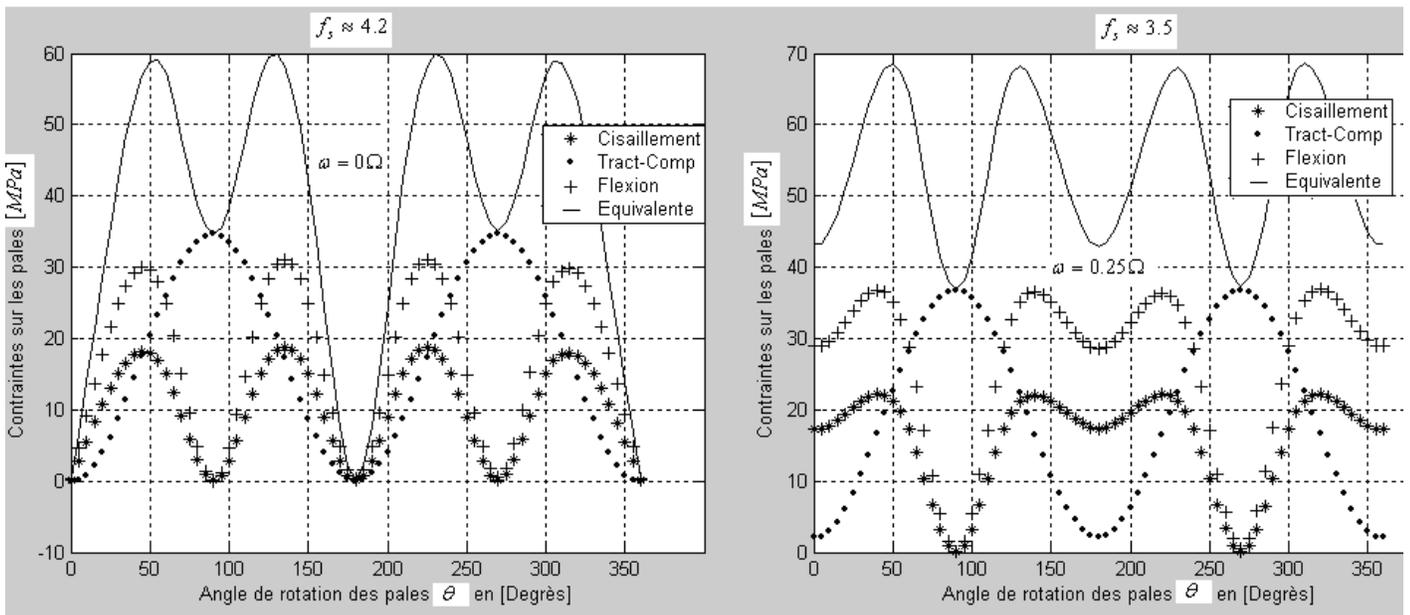


Figure 3.38 : Contraintes sur le rotor.

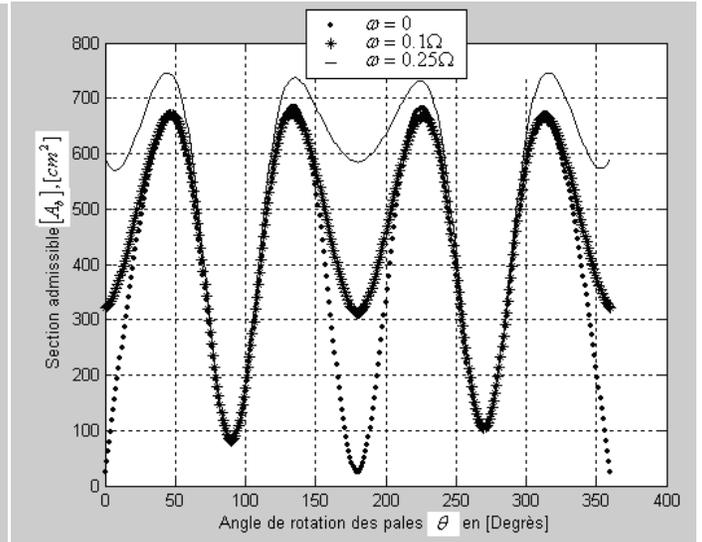
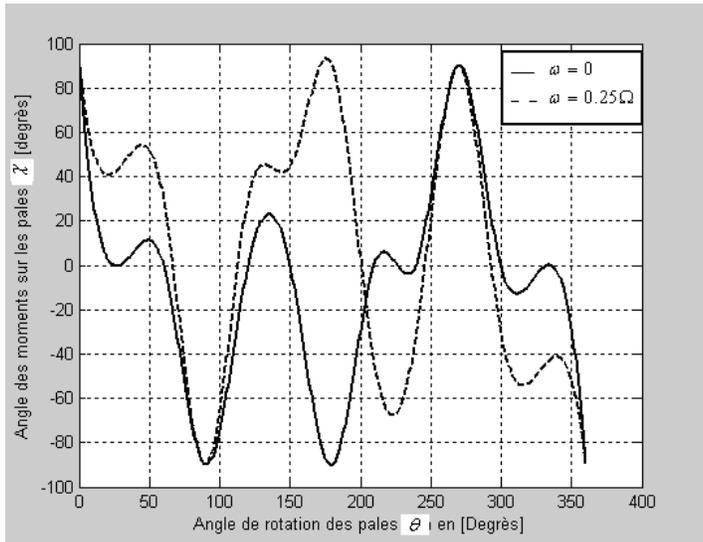


Figure 3.39 : Direction du moment total sur le rotor χ . **Figure 3.40** : Section admissible de la pale.

- Pour les faibles vitesses de rotation de la tête d'orientation de l'éolienne $\omega \ll \Omega$ (**Figure 3.40**), la section dangereuse admissible de la pale reste pratiquement inchangée.
- Le mouvement de la tension de référence σ_{HH} pour une section circulaire de la pale coïncide pratiquement avec le mouvement du moment total M_{tot} et pour des vitesses de rotation faibles induisant des forces négligeables sur le rotor (**Figures 3.38 et 3.39**).
- L'augmentation de la vitesse de rotation de la tête de l'éolienne induit une forte fluctuation des charges indésirables sur le rotor. Le facteur de sécurité passe de 4.5 à 3.2 pour une augmentation de la vitesse d'orientation de l'éolienne de 0 à 25% de la vitesse de rotation du rotor (**Figure 3.39**).

3.4 Conclusion

Cette étude complète l'étude de dimensionnement et d'optimisation aérodynamique du rotor éolien donné au **Chapitre II**. Cette modélisation des contraintes mécaniques sur le rotor a permis de mieux comprendre l'interaction des différentes sollicitations entre la charge et le rotor éolien ainsi que la détermination de la contrainte et la section admissible sur le support de la pale. Les calculs sont basés sur les constantes de temps des différents éléments de l'éolienne et appréciés par des facteurs de sécurité observés par la conception pour le cas le plus défavorable (vitesse du vent égale 25 m/s) en tenant compte de l'effet gyroscopique créée par les forces d'inertie sous l'effet de la rotation de la tête de l'éolienne.

Chapitre IV

Modélisation et analyse vibratoire de l'éolienne

4.1 Introduction

Les systèmes complexes discrets ou continus sont susceptibles de vibrations multiples et de types variés. En pratique, c'est souvent la vibration de la plus basse fréquence d'un type déterminé qui semble la plus inquiétante. L'assimilation du système réel à une simple combinaison masse_ressort permet d'obtenir rapidement une première approximation souvent suffisante de la fréquence considérée. La difficulté de cette approche est la définition du paramètre de déplacement qui représente le degré de liberté du système masse_ressort équivalent. On choisit souvent le déplacement d'un point où se concentre une grande partie de la masse du système ou bien d'un point susceptible de représenter un mouvement simple de grande amplitude pendant la vibration [4].

L'approximation de la pulsation fondamentale ω_{app} du système est obtenue en fonction de la raideur équivalente k_{eq} et la masse équivalente m_{eq} selon la relation classique de la RDM.

$$\omega_{app} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \tag{4.122}$$

Le problème est réduit à l'estimation de la fréquence fondamentale d'une pale éolienne de rayon R (Figure 4.41) soumise à l'action d'une force aérodynamique F_{bt} du vent appliquée au centre de poussé à $\frac{2}{3}R$. Cette pale est assimilée à une poutre homogène de densité volumique ρ de section rectangulaire $A_b = bh$ et de module d'élasticité longitudinale E .

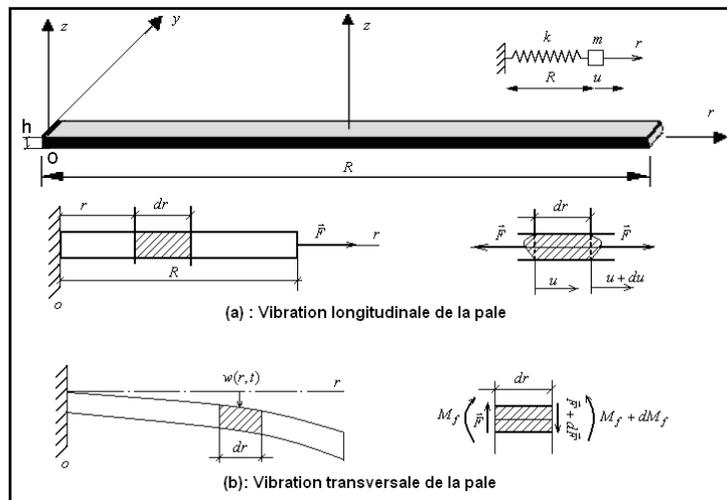


Figure 4.41 : Modèle poutre de la pale de l'éolienne

Les systèmes continus simples ou composés (poutres, plaques, barre etc.), sont des systèmes dont les caractéristiques physiques (masse, rigidité, amortissement) sont réparties et distribuées sur tout le volume du matériau, il est pratiquement impossible de séparer ces caractéristiques. Le comportement des systèmes continus est régit par des équations différentielles aux dérivées partielles alors que les systèmes discrets sont régit par des équations différentielles.

L'analyse du comportement des deux systèmes est différente quoiqu'elle présente certaines similitudes au niveau du problème aux valeurs propres. La pale de l'éolienne est assimilée à un barreau de section A_b , de densité ρ_0 , de module d'élasticité longitudinal E_0 et de moment d'inertie I_b . La pale est encastree d'un coté et libre de l'autre coté. La théorie des résistances des matériaux nous offre les équations des ondes de vibration de cette pale sous les différentes sollicitations traction_compression, torsion et flexion :

4.2 Vibration longitudinale de la pale

L'équilibre en traction compression de la pale (**Figure 4.41 (a)**) est régit par l'équation d'onde suivante [57]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[E_0 A_b \frac{\partial u}{\partial r} \right] - \rho_0 A_b \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - f(r, t) = 0 \quad (4.123)$$

$f(r, t)$ est la force aérodynamique d'excitation de la pale sous l'action de la force centrifuge. La recherche d'une solution décomposée dans la base modale donne :

$$u(r, t) = \sum_{k=0}^{\infty} U_k(r) q_k(t) \quad (4.124)$$

L'introduction de la décomposition éq. (4.124) dans l'équation d'équilibre (4.123) en multipliant chaque membre par U_k et en intégrant le long de la pale on obtient la projection de la force imposée sur le mode k :

$$Q_k(t) = \int_0^R U_k f(r, t) dr \quad (4.125)$$

L'utilisation des propriétés d'orthogonalité des modes donne :

$$\ddot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = F_k(t); \quad k = 0.. \infty \quad (4.126)$$

La résolution du problème de vibrations forcées de la pale comme système continu se ramène donc à la résolution d'un ensemble de systèmes scalaires à un degré de liberté indépendants. Compte tenu des hypothèses de petites déformations, la solution de cette équation ne sera acceptable que dans la mesure où l'amplitude de vibration reste petite devant l'épaisseur de la poutre. Pour les vibrations libres, la solution de l'équation d'onde (4.123) pour des caractéristiques physiques constantes est :

$$u(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \left[k - 1 \frac{\pi r}{2R} \right] \left[C_k \cos \omega_k t + D_k \sin \omega_k t \right] \quad (4.127)$$

Les constantes C_k et D_k dépendent des conditions initiales du problème. Avec les pulsations propres de vibration

$$\omega_k = \sqrt{k-1} \frac{\pi}{2R} \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \quad (4.128)$$

$\omega_k R \sqrt{\frac{\rho_0}{E_0}} = \sqrt{k-1} \frac{\pi}{2} = \{5708, 4.7124, 7.8540, 10.9956, 14.1372\}$. A chacune de ces pulsations propres est associé un profil d'amplitude de déformée (mode propre de vibration) (Figure 4.35).

$$U_k(r) = \sin \sqrt{k-1} \frac{\pi r}{2R} \quad (4.129)$$

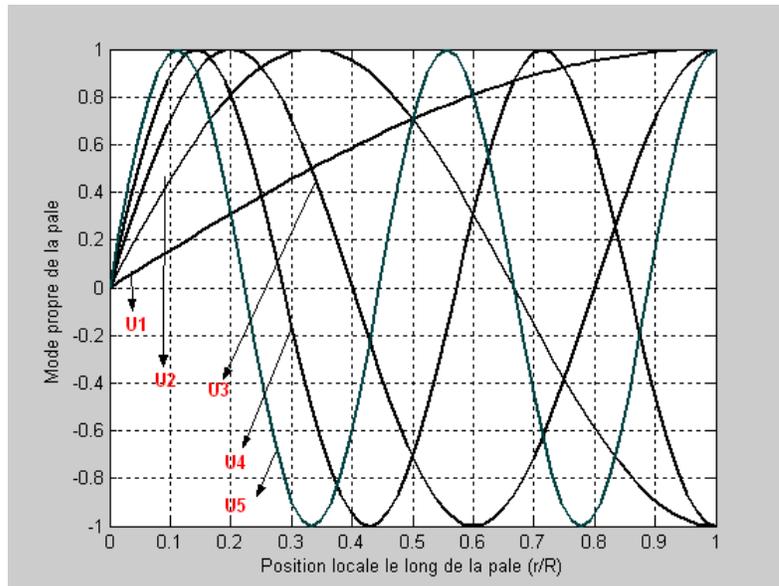


Figure 4.42 : Modes propres en traction-compression des pales de l'éolienne

4.3 Vibration latérale de la pale

L'équilibre de la pale sous l'effet d'une excitation de flexion de faibles amplitudes (Figure 4.41 (b)) en tenant compte que les termes d'inertie dus à la rotation des sections sont négligeables devant les termes d'inertie dus à la translation [56, 57].

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \left[E_0 I_b \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right] = -\rho_0 A_b \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (4.130)$$

La solution générale exacte de cette équation en flexion encastree-libre pour des caractéristiques physiques constantes est :

$$w(r,t) = \sum_{k=1}^{\infty} W_k(r) \left[E_k \cos \omega_k t + F_k \sin \omega_k t \right] \quad (4.131)$$

Les constantes E_k et F_k dépendent des conditions initiales du mouvement.

$$W_k(r) = -\frac{1}{2} \delta_k \frac{\sin(\beta_k R) - sh(\beta_k R)}{\sin(\beta_k R) + sh(\beta_k R)} \left[\sin(\beta_k r) - sh(\beta_k r) + \frac{\cos(\beta_k R) + ch(\beta_k R)}{\sin(\beta_k R) - sh(\beta_k R)} (\cos(\beta_k r) - ch(\beta_k r)) \right] \quad (4.132)$$

δ_k flèche maximale du mode k . Les pulsations propres de vibration positives sont données par la fonction des modes propres :

$$f_k(\beta R) = ch(\beta R) \cos(\beta R) + 1 = 0 \quad (4.133)$$

$$(\omega)_k = \beta R \sqrt{\frac{E_0 I_b}{\rho_0 A_b}} \quad (4.134)$$

Les solutions sont : $(\beta R)_1 = 1.8751$, $(\beta R)_2 = 4.6941$, $(\beta R)_3 = 7.854 \dots$; $(\beta R)_k = (k+1) \frac{\pi}{2}$, $k > 2$.

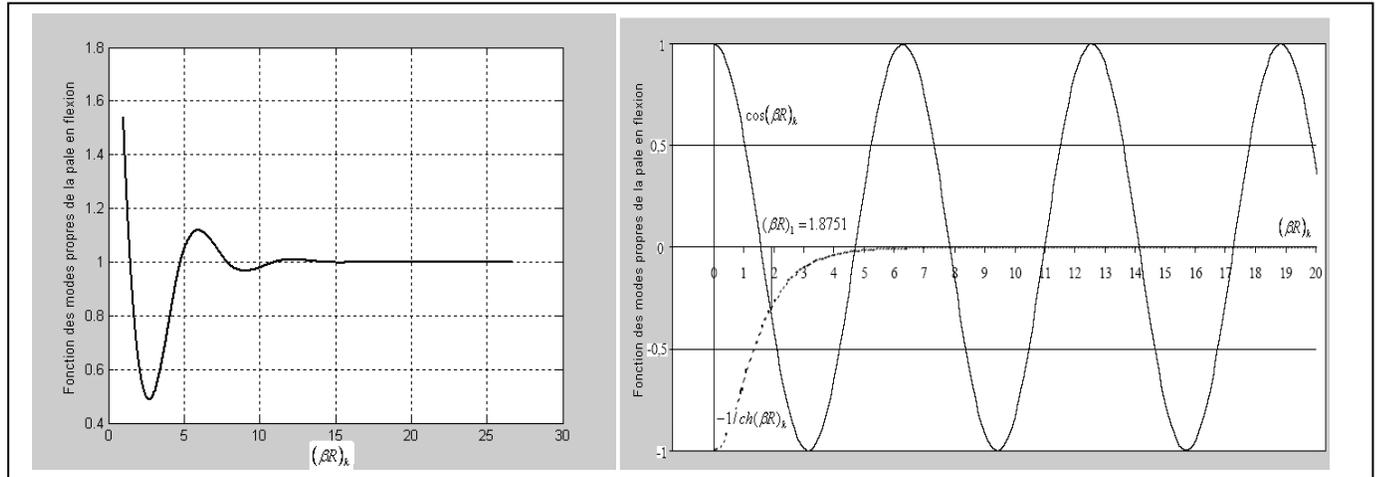


Figure 4.43 : Fonction et fréquence des modes propres en flexion des pales de l'éolienne

Au-delà du mode fondamental (Figure 4.43), les fréquences propres sont régulièrement espacées car le terme de l'équation (4.133) $(-1/ch(\beta R)_k \rightarrow 0)$ très rapidement de sorte que l'équation aux fréquences propres se réduit à $\cos(\beta R)_k = 0$. Les fréquences propres sont la combinaison des propriétés intrinsèques du matériau : inertie et élasticité qui s'identifie à la vitesse de propagation du son dans la poutre $\sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}}$ et d'un terme caractérisant la géométrie de la structure $\frac{1}{R^2} \sqrt{\frac{I_b}{A_b}}$. A

chacune de ces fréquences de résonance résultent dans ce modèle de la compétition entre les forces d'inertie et les forces de rappel élastique. L'équation aux vibrations ne contient aucun terme susceptible de limiter l'amplitude des oscillations de sorte que la solution en amplitude ne sera définie qu'à une constante multiplicative arbitraire près.

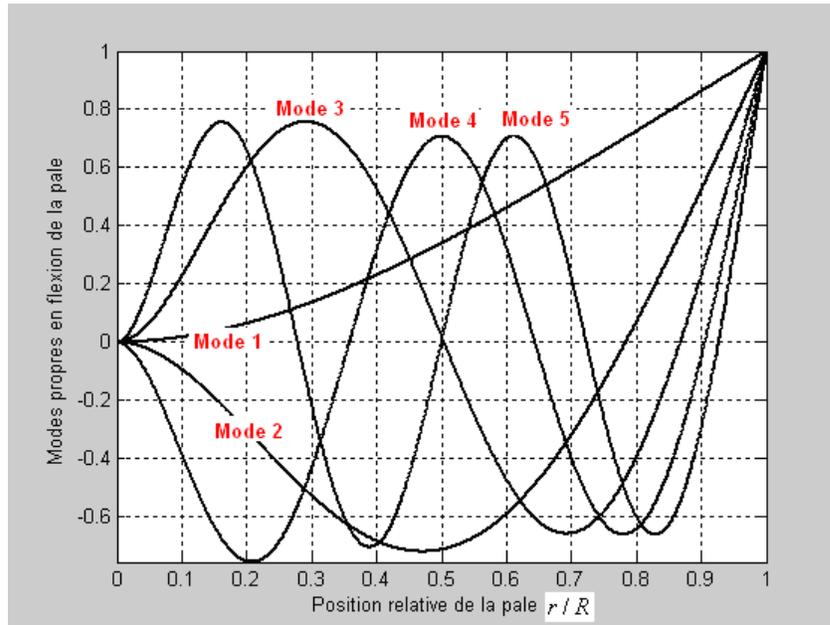


Figure 4.44 : Modes propres en flexion de la pale

La (Figure 4.44) schématise les premiers modes en flexion de la pale de l'éolienne. L'ordre des modes est indiqué par le nombre de nœuds. Le mode fondamental est le plus facile à exciter. La théorie des modes propres montre que la déformée statique peut être obtenue par la somme pondérée (les facteurs de pondération sont fonction du chargement statique imposé) des déformées des différents modes propres de vibration libre. Cependant, plus l'ordre du mode est élevé et plus faible est son coefficient pondérateur.

4.4 Approximation des modes propres de la pale par la méthode de Rayleigh [51].

4.4.1 1^{ère} approximation : Déformée quadratique

Le quotient de Rayleigh $R(U^I)$ mesure le rapport entre les énergies potentielles et cinétiques maximales pour un point donné (d'intérêt) du système.

$$R(U^I) = \omega_r^2 = \frac{\frac{1}{2} \int_0^R E_0 I_b \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right)^2 dr}{\frac{1}{2} \int_0^R \rho_0 A_b U^2 dr} = 20 \frac{E_0 I_b}{\rho_0 A_b R^4} \quad (4.135)$$

ω_r pulsation propre du système du mode considéré. Avec la forme test $U^I(r) = r^2$.

4.4.2 2^{ème} approximation : Déformée sous charge ponctuelle en bout

La déformée statique sous une charge ponctuelle en extrémité de la pale étant très voisine de la déformée de vibration libre du premier mode de vibration c-a-d le mode fondamental est le mode prépondérant dans la décomposition en mode propre pour ce type de chargement. La première forme considérée est la forme que prend la pale sous l'action d'un effort tranchant F en bout. On admet que la pale est principalement entraînée en mouvement par la force du vent. La solution de ce problème est donnée par la relation :

$$R(U^{II}) = \frac{140}{11} \frac{E_0 I_b}{\rho_0 A_b R^4} \quad (4.136)$$

Avec la forme propre $U^{II}(r) = R \frac{r^2}{2} - \frac{r^3}{6}$.

4.4.3 3^{ème} approximation : Déformée sous l'action du poids propre

On considère dans cette approche que les forces d'inertie agissant sur la poutre pendant son mouvement sont les actions dues au poids de la pale, on peut prendre comme forme approchée la déformée statique de la poutre sous l'action de son poids propre. La solution de ce problème est :

$$R(U^{III}) = \frac{162}{13} \frac{E_0 I_b}{\rho_0 A_b R^4} \quad (4.137)$$

Avec la forme propre $U^{III}(r) = R^2 \frac{r^2}{2} - R \frac{r^3}{3} + \frac{r^4}{12}$

Table 4.9 : Comparaison des méthodes de calcul de la fréquence fondamentale de la pale

Forme propre de la pale	Fréquence propre			Erreur relative %
	Hz			
	Acier	Aluminium	Polyester	
$U_1^{exacte}(r)$	2.2261	2.2810	0.6951	-----
$U_1^I(r)$	2.8314	2.9013	0.8841	27.19
$U_1^{II}(r)$	2.2587	2.3145	0.7053	1.47
$U_1^{III}(r)$	2.2350	2.2902	0.6979	0.40

La (**Table 4.9**) montre que la forme $U_1^{III}(r)$ est la plus adaptée pour la modélisation de la fréquence et mode propre de la pale assimilée à une poutre de Bernoulli encastree_libre, car la pale est entraînée par sa masse répartie. C'est le résultat qu'on peut obtenir par une méthode numérique telle que les éléments finis.

4.5 Estimation des modes propres de l'éolienne par la méthode de Rayleigh

On cherche à estimer la fréquence fondamentale de l'éolienne soumise au vent de la assimilée à une poutre de Bernoulli encastrée libre de la (Figure 4.45). L'éolienne est constituée d'un mat de hauteur $L[m]$ assimilable à un cylindre creux de rayon externe $r_t[m]$ et d'épaisseur $e_t[cm]$.

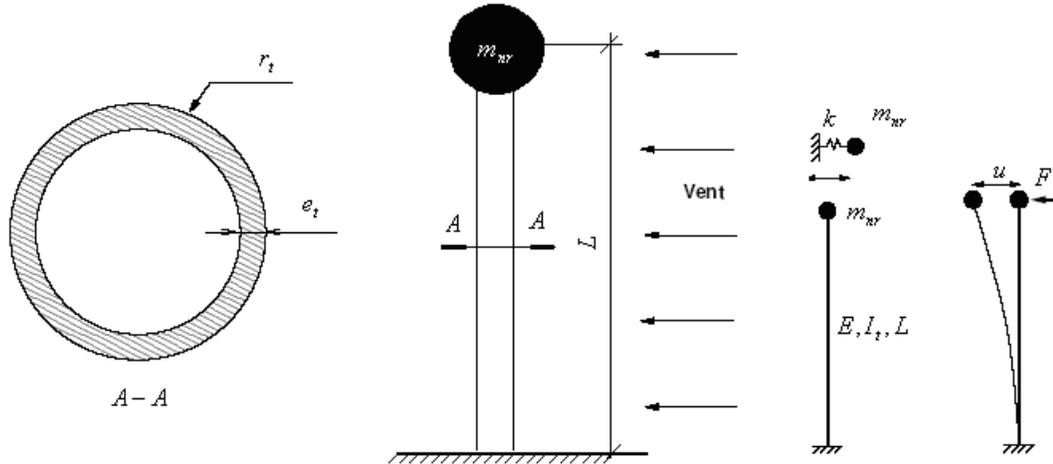
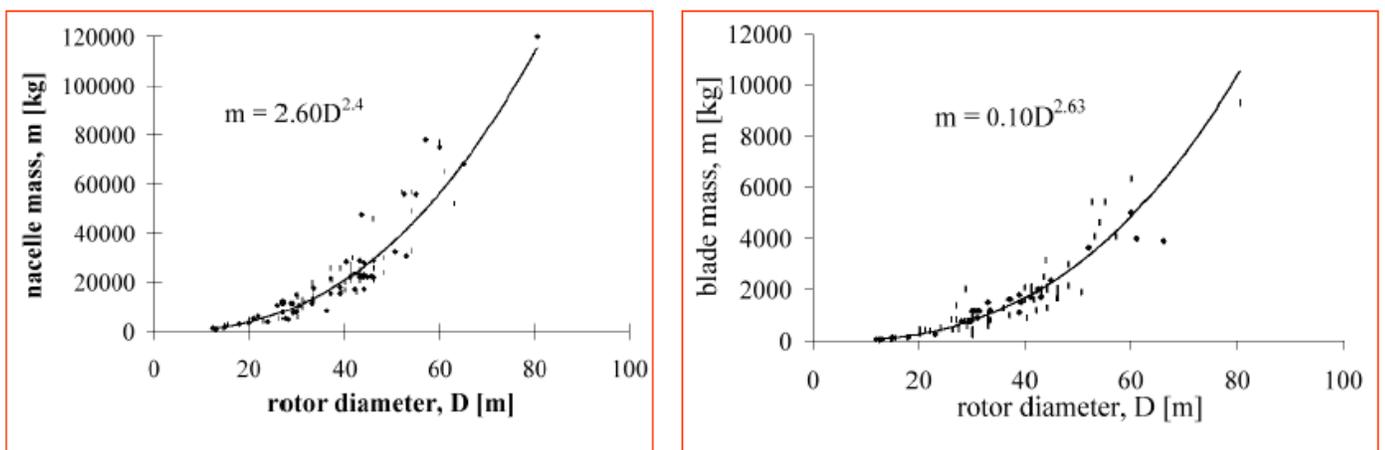


Figure 4.45 : Modèle simplifié de l'éolienne

Cette tour supporte une masse du (rotor+nacelle) $m_{nr} \approx 1215.6kgs$ qui est estimée par les corrélations de la (Figure 4.46) d'une part entre la masse du rotor et son diamètre $D=(2R)$ $m_r = 0.1D^{2.63}$ et de l'autre part la masse de la nacelle et le diamètre du rotor $m_n = 2.6D^{2.4}$. L'ensemble est soumis à un vent latéral.



nacelle

Source :
European Wind Energy Association

pales

Figure 4.46 : Modèle de la masse des pales et de la nacelle

Le quotient de Rayleigh de l'éolienne est donné par l'expression :

$$R(U) = \frac{\frac{1}{2} \int_0^L E_0 I_t \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right)^2 dr}{\frac{1}{2} \int_0^L \rho_0 A_t U^2 dr + m_{nr} (U(L))^2} \quad (4.138)$$

4.5.1 1^{ère} approximation : Modèle des résistances des matériaux

- la masse de la tour est négligeable devant la masse de la (nacelle+rotor).
- les déplacements possibles de la (nacelle+rotor) sont de faibles amplitudes et assimilables à une translation horizontale. On adopte un modèle des résistances des matériaux de la tour pour faire l'équivalence avec un système à un degré de liberté. La masse considérée est la masse de la (nacelle+rotor) et la raideur est le rapport entre le déplacement horizontal du haut de la poutre et l'effort qui crée ce déplacement (Figure 4.45).

Le moment quadratique de la tour est $I_t = \frac{\pi r_t^4}{4} - \frac{\pi (e_t)^4}{4}$. La raideur équivalente du mat est

$k_{eq} = \frac{F}{U_{max}} = \frac{3E_0 I_t}{L^3} \Rightarrow U_{max} = \frac{L^3}{3E_0 I_t}$. L'énergie cinétique du mat est négligée devant celle du (rotor+nacelle). La pulsation propre du système masse ressort équivalente est

$$\omega_{app} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} = \sqrt{\frac{3E_0 I_t}{m_{nr} L^3}} \quad (4.139)$$

4.5.2 2^{ème} approximation : Déformée quadratique

$$U^{II}(x) = x^2 \Rightarrow R(U^{II}) = \frac{20E_0 I_t}{\rho_0 A_t L^4 + 5m_{nr} L^3} \quad (4.140)$$

4.5.3 3^{ème} approximation : Déformée sous l'action d'un effort tranchant en bout

$$U^{III}(x) = \frac{Lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \Rightarrow R(U^{III}) = \frac{\frac{E_0 I_t L^3}{3}}{\frac{11\rho_0 A_t L^7}{420} + m_{nr} \frac{L^6}{9}} \quad (4.141)$$

4.5.4 4^{ème} approximation : Déformée sous l'action du poids propre

La deuxième forme est la forme que prend la poutre sous l'action d'un effort F réparti sur toute sa longueur. La structure est entraînée principalement par le poids propre de la tour.

$$U^{III}(x) = \frac{L^2 x^2}{2} + \frac{x^4}{12} - \frac{Lx^3}{3} \Rightarrow R(U^{III}) = \frac{\frac{E_0 I_t L^5}{5}}{\frac{13 \rho_0 A_t L^9}{810} + m_{nr} \frac{L^8}{16}} \quad (4.142)$$

Table 4.10 : Comparaison des méthodes de calcul de la fréquence fondamentale de l'éolienne.

Forme propre	Fréquence propre Hz			Erreur relative %
	Acier $L = 20m; r_t = 1m;$ $e_t = 20cm$	Aluminium $L = 25m; r_t = 1.5m;$ $e_t = 32cm$	Polyester $L = 26m; r_t = 4.75m;$ $e_t = 20cm$	
$U_1^{exacte}(r)$	4.5360	4.4332	4.3046	-----
$U^{(0)}$	26.9198	26.2123	25.9690	493.4769 ; 491.2748; 503.2871
$U^{(I)}(r)$	5.6726	5.5434	5.3861	25.0580 ; 25.0425 ; 25.1252
$U^{(II)}(r)$	4.5366	4.4333	4.3072	0.0144 ; 0.0038 ; 0.0603
$U_1^{III}(r)$	4.4942	4.3920	4.2668	-0.9197 ; -0.9293 ; -0.8779

La deuxième forme $U^{(II)}(r)$ donne une bonne approximation de la fréquence fondamentale du système. La troisième forme sous estime la fréquence fondamentale du système donc elle ne respecte pas la théorie de Rayleigh et par conséquent elle n'est pas prise en compte.

4.6 Energie de déformation de l'éolienne [55,56]

La pale ou le mât de l'éolienne assimilé à une poutre de Bernoulli encastree_libre, constitue un système masse_ressort en vibration avec différentes cinématiques possibles (flexion, torsion et traction_compression). La dynamique de structure donne les méthodes de calcul des déplacements des points d'attaches de l'inertie en fonction de la charge correspondante par intégration des déformations, ou bien par des méthodes énergétiques (Clapeyron, Maxwell Mohr ou Castigliano etc.).

Chapitre IV : Modélisation et analyse vibratoire de l'éolienne

Les résultats d'estimation des déplacements obtenus permettent d'estimer les raideurs associés à chaque comportement : $k_{flexion} = \frac{3E_0 I_b}{R^3}$, $k_{torsion} = \frac{G_0 I_b}{R}$, $k_{tract_comp} = \frac{E_0 A_b}{R}$. L'énergie consommée par la poutre pour performer la fatigue dans le cas de la flexion est estimée par la relation suivante :

$$E_{rup} = \frac{1}{2} k u^2 = \frac{1}{2} k \left(\frac{F}{k} \right)^2 = \frac{F^2}{2k} = \frac{1}{2} F^2 \left(\frac{R^3}{3E_0 I_b} \right) = \left(\frac{F^2}{6E_0 I_b} \right) R^3 \quad (4.143)$$

Cette équation permet de déterminer la charge élastique de déformation maximale que peut supporter la pale.

4.7 Analyse vibratoire de la résonance de la pale en vibration transversale [54]

Les théories précédentes ne comportent aucun terme susceptible de limiter l'amplitude de la résonance donc le facteur de qualité de l'oscillateur associé Q est infini. Or dans la pratique tous les matériaux présentent des frottements internes (analogues aux pertes visqueuses) caractérisés par un coefficient de dissipation c . Afin d'exhiber les différences qualitatives entre le système réel et l'oscillateur isolé : physiquement, on doit considérer le cas non amorti comme une idéalisation d'un oscillateur réel observé sur une échelle de temps courte par rapport à l'amortissement

$t \ll \gamma^{-1} = \left(\frac{c}{m} \right)^{-1}$. γ^{-1} définie une échelle de temps supplémentaire à l'échelle des pulsations

propres $\omega_r^{-1} = \left(\frac{k}{m} \right)^{-0.5}$ qui est à 2π près mesure la période d'oscillation du système. Il existe un

paramètre sans dimension $Q = \frac{\omega_r}{\gamma}$ mesurant le comportement de l'oscillateur. Dans

l'approximation de Rayleigh le modèle de résonance (Figure 4.47) comporte un amortisseur visqueux de coefficient c en parallèle à un ressort de raideur k supportant la masse de la pale m .

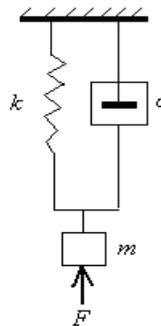


Figure 4.47 : Modèle vibratoire de Rayleigh pour la pale de l'éolienne

L'équation différentielle du mouvement du système s'écrit alors :

$$\frac{d^2r}{dt^2} + \frac{c}{m} \frac{dr}{dt} + \frac{k}{m} r = \frac{F_0}{m} \exp(j\omega t) \quad (4.144)$$

ω et F_0 sont la pulsation d'excitation et l'amplitude de la force harmonique. En régime permanent, la solution particulière du problème s'écrit sous la forme :

$$r = R_0 \exp(j\omega t + \varphi) \quad (4.145)$$

Vérifiant en amplitude et en phase les équations suivantes :

$$R = X = \frac{\frac{F_0}{m}}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_r^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}} \text{ et } \varphi = \arctan \left[-\frac{\gamma \omega \omega_r}{\omega^2 - \omega_r^2} \right] \quad (4.146)$$

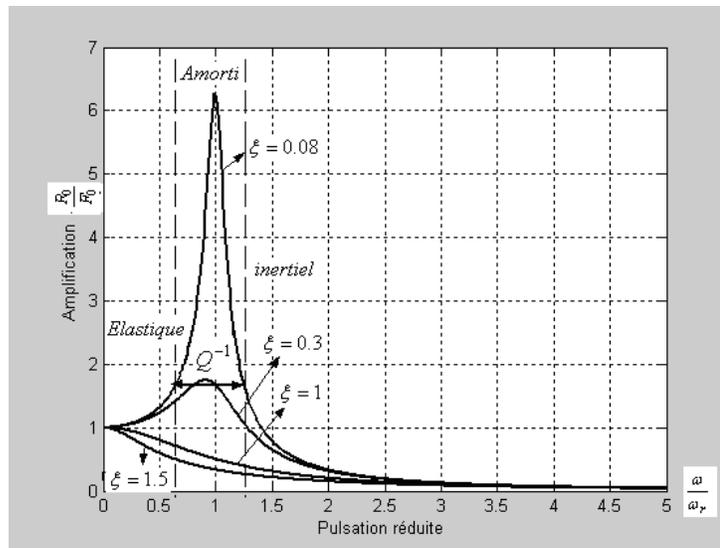


Figure 4.48 : Facteur d'amplification en fonction de la pulsation réduite

L'analyse de la (Figure 4.48) permet de distinguer plusieurs régimes distincts de fonctionnement de la pale.

a. Régime élastique

A basse fréquence, le rappel élastique domine et gouverne le mouvement de la pale.

$$\omega \ll \omega_r \Rightarrow R = R_0 \approx \frac{F_0}{k}, \varphi \approx 0 \Rightarrow kr = F_0 \exp(j\omega t) \quad (4.147)$$

b. Régime quasi statique

A haute fréquence, le terme d'inertie domine et gouverne le mouvement de la pale.

$$\omega \gg \omega_r \Rightarrow R = R_0 \approx \frac{F_0}{m\omega^2}, \quad \varphi \approx -\pi \Rightarrow m \frac{d^2 r}{dt^2} = F_0 \exp(j\omega t) \quad (4.148)$$

c. Régime inertiel

L'effet de la masse est celui d'un filtre passe bas avec une coupure en $\frac{1}{\omega^2}$.

d. Régime visqueux

Au voisinage de la fréquence de résonance $\omega \approx \omega_r$, le terme d'amortissement domine et gouverne le mouvement de la pale.

$$\omega \approx \omega_r \Rightarrow R = R_0 \approx \frac{F_0}{c\omega}, \quad \varphi \approx -\frac{\pi}{2} \Rightarrow c \frac{dr}{dt} = F_0 \exp(j\omega t) \quad (4.149)$$

e. Régime d'amortissement

Limitation du facteur de qualité Q du pic de la résonance qui s'accompagne d'un léger décalage de la résonance en général négligeable, l'amortissement étant en général faible.

$$\frac{R_0}{F_0} \left(\omega_r \pm \frac{\Delta\omega}{2} \right) \approx \frac{1}{\gamma\omega_r \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\omega}{\gamma} \right)^2}} = \frac{1}{2} \frac{R_0}{F_0} \omega_r = \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma\omega_r} \Rightarrow \Delta\omega = \gamma\sqrt{3} \quad (4.150)$$

Le facteur de qualité décroît quand l'amortissement augmente

$$Q = \frac{\omega_r}{\Delta\omega} = \frac{\omega_r}{\gamma\sqrt{3}} \quad (4.151)$$

4.8 Modélisation et analyse du flottement de la pale [53]

Le phénomène de flottement est produit dans les pales des éoliennes rapides sous l'effet de couplage d'oscillation de flexion verticale et de torsion. A une certaine vitesse, la pale est le siège de violentes vibrations, pouvant produire sa rupture. La pale est assimilée à un solide susceptible d'effectuer des oscillations élastiques de flexion et de torsion. L'application d'un couple de torsion statique à la pale, seule les points d'un certain axe Δ (Figure 4.49) demeurent neutres. L'application d'une force verticale (portance) constante en un point de cet axe provoque une flexion de la pale sans torsion.

Mais si l'on produit des oscillations de flexion de la pale, la force d'inertie appliquée au centre de gravité c_g (hors de l'axe Δ en général) a par rapport à cet axe un moment qui engendre la torsion de la pale. La flexion et la torsion définies respectivement par les angles φ_1 et φ_2 , sont donc couplées par inertie. Ceci est pour la pale au repos. En mouvement, si une torsion vient à se produire φ_2 représente la variation de l'angle d'inclinaison, par suite la torsion fait varier la force verticale admise appliquée à l'axe Δ la pale fléchit. Par contre, une flexion de la pale ne produit qu'une faible variation de la portance et n'entraîne pas de torsion de ce fait. Lorsqu'on tient compte des forces aérodynamiques, il s'introduit dans les équations du mouvement un terme de couplage dissymétrique, car il n'apparaît que dans l'équation différentielle relative à la flexion de la manière suivante :

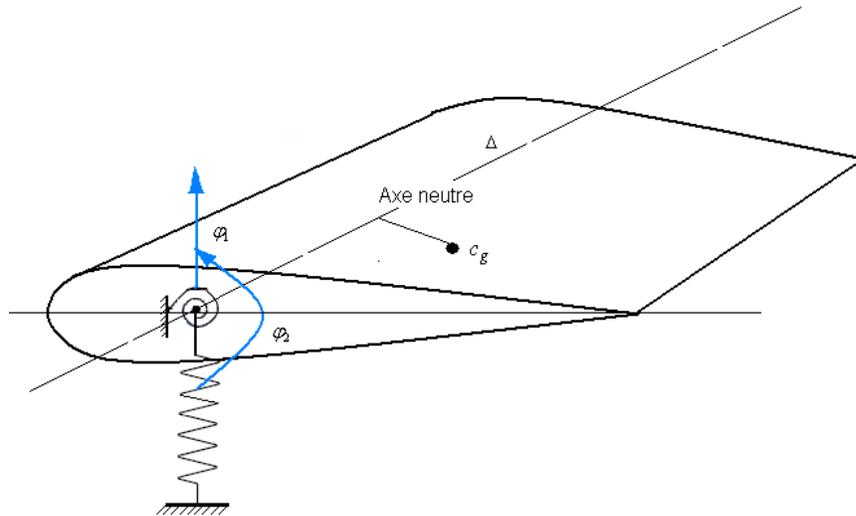


Figure 4.49 : Modèle 2D du flottement de la pale

$$I_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + C_1 \varphi_1 + I \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = C \varphi_2 \quad (4.152)$$

$$I \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + C_2 \varphi_2 + I_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = 0 \quad (4.153)$$

I_1 et I_2 sont les inerties de flexion et de torsion, C_1 et C_2 les coefficients des couples des rappels élastiques, I le coefficient de couplage par inertie et C le coefficient de couplage dissymétrique. La recherche des solutions sinusoïdales de même pulsation propre $\omega_r = \sqrt{\lambda}$ conduit à la matrice caractéristique suivante :

$$\begin{vmatrix} I_2 - I^2 \lambda^2 & - (C_1 C_2 + I_2 C_1 - I C \lambda) \\ I C \lambda & I_1 I_2 \lambda^2 - (C_1 C_2 + I_2 C_1 - I C \lambda) \end{vmatrix} + C_1 C_2 = 0 \quad (4.154)$$

Cas : $\begin{vmatrix} I_1 I_2 = I^2 \end{vmatrix}$

$$\lambda = \frac{C_1 C_2}{I_1 C_2 + I_2 C_1 - IC} \quad (4.155)$$

Ce qui entraîne un coefficient de couplage dissymétrique

$$C > \frac{I_1 C_2 + I_2 C_1}{\sqrt{I_1 I_2}} \quad (4.156)$$

Si de plus $I_1 = I_2$ alors :

$$C > C_2 + C_1 \quad (4.157)$$

Ce résultat montre que le facteur de rappel dissymétrique C doit être supérieur à la somme des facteurs des couples de rappels élastiques fonctionnant en série.

Cas : $I_1 I_2 \neq I^2$

L'équation (4.154) correspond à des solutions réelles, si son discriminant est positif. Admettons que $I_1 I_2 - I^2 > 0$, le discriminant de l'équation caractéristique (4.154) est positif pour les valeurs de C contenues dans le domaine suivant :

$$C \in \left[\frac{I_1 C_2 + I_2 C_1 + 2\sqrt{(I_1 I_2 - I^2)} C_1 C_2}{I} ; +\infty \right) \quad (4.158)$$

Lorsque le coefficient de couplage dissymétrique C sort de la bande donnée par l'équation (4.158), le système devient instable. Des phénomènes analogues ont été à l'origine de la rupture des ponts suspendus. Les pulsations propres correspondantes sont :

$$\lambda_{1,2} = \frac{- (I_1 C_2 + I_2 C_1 - IC) \pm \frac{1}{2} \left(\left(\frac{I_1 C_2 + I_2 C_1 - IC}{I_1 I_2 - I^2} \right)^2 - \frac{4 C_1 C_2}{I_1 I_2 - I^2} \right)^{\frac{1}{2}}}{2 (I_1 I_2 - I^2)} \quad (4.159)$$

La substitution de la borne inférieure (limite de stabilité du système) de l'équation (4.158) dans (4.159) donne les pulsations propres suivantes :

$$\lambda_{1,2} = \sqrt{\frac{C_1 C_2}{I_1 I_2 - I^2}} \quad (4.160)$$

Si l'un des couples de rappels s'annule, l'équation (4.160) traduit le mouvement du système solide sans déformation.

4.9 Modélisation dynamique de l'éolienne par un modèle multimasses [8, 24, 25, 39]

L'arbre lent de l'éolienne, travaille en flexion et en torsion, il transmet le mouvement de rotation du rotor au multiplicateur. Il est supporté par des paliers possédant des roulements à simple ou double rangée de billes suivant les efforts transmis. Les efforts dynamiques ainsi que le poids du rotor sont transmis au châssis de la nacelle par le biais de ses supports, ce qui évite au multiplicateur de les supporter. L'autre avantage de l'arbre est d'écarter le rotor du mât évitant le contact de celui-ci avec les pales. Cet arbre est généralement creux pour permettre le passage du système de régulation par calage des pales. Le dimensionnement de l'arbre lent peut être réalisé par plusieurs méthodes. Cette méthode tient compte du chargement que peut supporter l'arbre lent du système éolien; elle est basée sur la théorie du cisaillement maximal et considère que l'arbre travaille simultanément en flexion et en torsion.

La fonction du multiplicateur est d'amener la vitesse de rotation du rotor à une vitesse convenable pour la génératrice. Le train d'engrenages utilisé est épicycloïdal, et peut posséder de un à trois étages suivant la taille de l'éolienne (plus l'éolienne est grande, moins elle tourne vite et donc plus le rapport de multiplication de la vitesse du rotor est important). Le premier type est bon marché mais lourd et volumineux, tandis que le second est plus léger, plus compact et peut s'utiliser pour des forts couples mais son prix est plus élevé. Le choix du type de multiplicateur et du nombre d'étages est fonction du rapport de multiplication et du couple maximal. D'où l'intérêt de rechercher des vitesses de rotation du rotor élevées avec les contraintes qui s'imposent (vitesse limite en bout de pale). En ce qui concerne le dimensionnement, il faut considérer les efforts de fatigue au niveau des dentures des engrenages. Ces efforts sont provoqués par les fluctuations de couple et dépendent du système de contrôle de l'éolienne. Le multiplicateur doit être assez proche de l'axe du mât pour réduire l'effort de flambement dû au poids supporté par le mât et réduire du même coup le dimensionnement du mécanisme d'orientation de la nacelle.

Le modèle de cette partie mécanique est défini en considérant un seul arbre équivalent [24]. L'application des équations de Lagrange sous forme scalaire permet d'établir l'équation générale du mouvement du système.

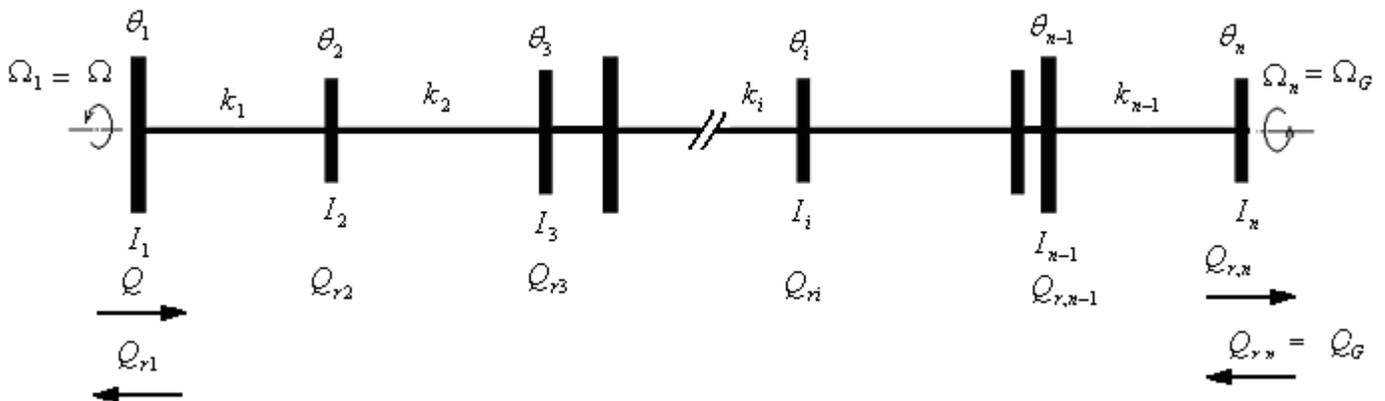


Figure 4.50 : Modèle d'entraînement électromécanique d'une ligne d'arbre en torsion

Le modèle équivalent du mécanisme de la **(Figure 4.50)** dont les éléments effectuent le même type de mouvement de rotation permet de les comparer en vue de déterminer ceux ayant la plus grande influence sur le fonctionnement du système. Les éléments du modèle équivalent sont référés donc à un élément préalablement choisi. En général, on choisit l'élément dont le mouvement présente le plus d'intérêt pour satisfaire les exigences du cahier de charges. Le principe de référence du schéma équivalent est basé sur la loi de la conservation de l'énergie : les énergies cinétiques ou potentielles de l'élément avant et après la référence doivent être égales.

4.9.1 Paramètres physiques de réduction du modèle [24]

En se référant à la vitesse de rotation du rotor Ω_1 , le moment d'inertie de l'élément d'ordre i tournant à la vitesse Ω_i s'écrit :

$$\frac{1}{2} I_i^* \Omega_1^2 = \frac{1}{2} I_i \Omega_i^2 \Rightarrow I_i^* = I_1 \frac{\Omega_i^2}{\Omega_1^2} = \frac{I_i}{i_{1,i}^2} \quad (4.161)$$

$i_{1,i}$ rapport de passage de l'arbre de référence vers l'arbre considéré du mécanisme. Le moment d'inertie totale de l'entraînement pour n éléments en rotation s'écrit.

$$I = I_1 + \sum_{i=2}^n \frac{I_i}{i_{1,i}^2} \quad (4.162)$$

Par analogie, le facteur de rigidité à la torsion s'écrit.

$$k_{i,i+1}^* = \frac{k_{i,i+1}}{i_{1,i}^2} \quad (4.163)$$

Le couple résistant total du système constitué de q couples, ramené à la vitesse Ω_1 est :

$$Q_i^* = \sum_{i=1}^q \frac{Q_i}{i_{1,i}} \quad (4.164)$$

Le mouvement du mécanisme en tenant compte de l'énergie dissipée est généralement décrit par l'équation de Lagrange **[8, 37]**.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{d\Omega_i} \right) - \frac{dL}{d\theta_i} + \frac{dE_d}{d\theta_i} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d(\mathcal{E}_c - E_p)}{d\Omega_i} \right) - \frac{d(\mathcal{E}_c - E_p)}{d\theta_i} + \frac{dE_d}{d\theta_i} = Q_i \quad (4.165)$$

Pour le mouvement de rotation θ_i , $\Omega_i = \frac{d\theta_i}{dt}$ et Q_i sont les déplacements, les vitesses angulaires et le couple appliqué à l'élément i . Les énergies cinétique E_c , potentielle E_p et dissipée E_d du système mécanique à n masses en rotation ont pour expressions :

$$E_c = \sum_{j=1}^n \frac{I_j \Omega_j^2}{2}, E_p = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{k_{j,j+1} (Q_j - Q_{j+1})^2}{2}, E_d = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\beta_{j,j+1} (\dot{Q}_j - \dot{Q}_{j+1})^2}{2} \quad (4.166)$$

4.9.2 Modèle numérique équivalent de l'éolienne à n masses

La substitution des expressions (4.166) et en passant au domaine de Laplace dans l'équation généralisée de Lagrange (4.165) donne le système d'équation différentielle du mouvement du système [25].

$$\begin{cases} Q_1 - \frac{k_{12}}{s} (Q_1 - Q_2) - \beta_{12} (\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2) - Q_{r1} = I_1 s \Omega_1 \\ \frac{k_{12}}{s} (Q_1 - Q_2) - \frac{k_{23}}{s} (Q_2 - Q_3) + \beta_{12} (\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2) - \beta_{23} (\dot{Q}_2 - \dot{Q}_3) - Q_{r2} = I_2 s \Omega_2 \\ \dots \\ \frac{k_{n-2,n-1}}{s} (Q_{n-2} - Q_{n-1}) - \frac{k_{n-1,n}}{s} (Q_{n-1} - Q_n) + \beta_{n-2,n-1} (\dot{Q}_{n-2} - \dot{Q}_{n-1}) - \beta_{n-1,n} (\dot{Q}_{n-1} - \dot{Q}_n) - Q_{r,n-1} = I_{n-1} s \Omega_{n-1} \\ \frac{k_{n-1,n}}{s} (Q_{n-1} - Q_n) + \beta_{n-1,n} (\dot{Q}_{n-1} - \dot{Q}_n) - Q_{r,n} = I_n s \Omega_n \end{cases} \quad (4.167)$$

I_i , Ω_i , $Q_1 = Q$, Q_{ri} , $k_{i,i+1}$, $\beta_{i,i+1}$ sont le moment d'inertie, la vitesse angulaire, le couple aérodynamique, le couple résistant, la rigidité à la torsion et le facteur l'amortissement du modèle.

4.9.3 Modèle numérique équivalent de l'éolienne à trois masses

Le système d'éq. (4.167) permet de déduire le modèle à trois masses (rotor, multiplicateur, générateur)

$$\underbrace{\begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix}}_{[M]} \underbrace{\begin{Bmatrix} \frac{d\Omega_1}{dt} \\ \frac{d\Omega_2}{dt} \\ \frac{d\Omega_3}{dt} \end{Bmatrix}}_{\dot{\mathbf{Q}}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \beta_{12} & -\beta_{12} & 0 \\ -\beta_{12} & \beta_{12} + \beta_{23} & -\beta_{23} \\ 0 & -\beta_{23} & \beta_{23} \end{bmatrix}}_{[\beta]} \underbrace{\begin{Bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{Bmatrix}}_{\mathbf{Q}} + \underbrace{\begin{bmatrix} k_{12} & -k_{12} & 0 \\ -k_{12} & k_{12} + k_{23} & -k_{23} \\ 0 & -k_{23} & k_{23} \end{bmatrix}}_{[K]} \underbrace{\begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{Bmatrix}}_{\mathbf{Q}} = \underbrace{\begin{Bmatrix} Q_1 - Q_{r1} \\ -Q_{r2} \\ -Q_{r3} \end{Bmatrix}}_{[f]} \quad (4.168)$$

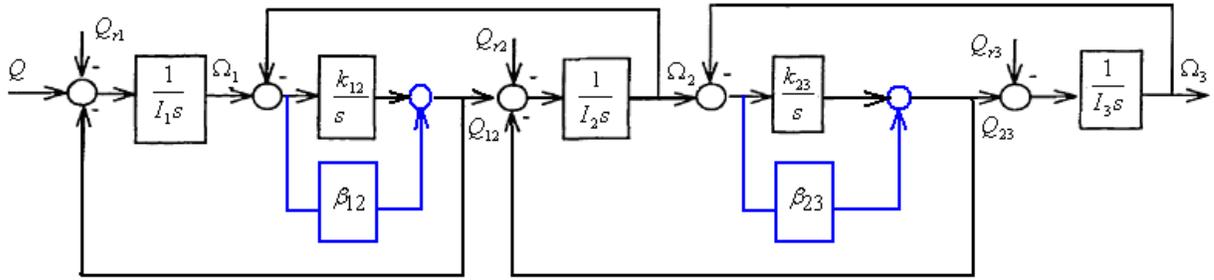


Figure 4.51 : Digramme structurel du modèle trimasses

4.9.4 Analyse modale du système dissipatif équivalent à trois masses

Le passage au domaine de Laplace permet d'écrire le système d'équation (4.168) sous la forme :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix}}_{[M]} + \underbrace{\begin{bmatrix} \beta_{12} & -\beta_{12} & 0 \\ -\beta_{12} & \beta_{12} + \beta_{23} & -\beta_{23} \\ 0 & -\beta_{23} & \beta_{23} \end{bmatrix}}_{[\beta]} + s^{-1} \underbrace{\begin{bmatrix} k_{12} & -k_{12} & 0 \\ -k_{12} & k_{12} + k_{23} & -k_{23} \\ 0 & -k_{23} & k_{23} \end{bmatrix}}_{[K]} \underbrace{\begin{Bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{Bmatrix}}_{\mathcal{Q}(s)} = \underbrace{\begin{Bmatrix} Q_1(s) - Q_{r1}(s) \\ -Q_{r2}(s) \\ -Q_{r3}(s) \end{Bmatrix}}_{\mathcal{Q}(s)} \quad (4.169)$$

La matrice caractéristique du système autonome $B(s)$ s'écrit :

$$\mathbf{B}(s) = \begin{bmatrix} s^2 I_1 + s \beta_{12} + k_{12} & -s \beta_{12} - k_{12} & 0 \\ -s \beta_{12} - k_{12} & s^2 I_2 + s(\beta_{12} + \beta_{23}) + k_{12} + k_{23} & -s \beta_{23} - k_{23} \\ 0 & -s \beta_{23} - k_{23} & s^2 I_3 + s \beta_{23} + k_{23} \end{bmatrix} \quad (4.170)$$

La matrice de transfert du système est donnée par la relation suivante :

$$[H(s)] = \frac{\text{sortie}}{\text{critère}} = \mathbf{B}(s)^{-1} \quad (4.171)$$

$$H_{11}(s) = \frac{\Omega_1(s)}{Q(s)} = \frac{I_2 I_3 s^4 + (I_2 + I_3) \beta_{23} + I_3 \beta_{12} s}{I_2 I_3 s^4 + (I_2 + I_3) \beta_{23} + I_3 \beta_{12} s} + \frac{(I_2 + I_3) k_{23} + I_3 k_{12} + \beta_{12} \beta_{23} s^2 + \beta_{12} k_{23} + \beta_{23} k_{12} s + k_{12} k_{23}}{B_0} \quad (4.172)$$

$$H_{12}(s) = H_{21}(s) = \frac{\Omega_2(s)}{Q(s)} = \frac{-(\beta_{12} \beta_{23} s^3 + (\beta_{12} k_{12} + \beta_{12} \beta_{23} s^2 + \beta_{12} k_{23} + \beta_{23} k_{12} s + k_{12} k_{23}))}{B_0} \quad (4.173)$$

$$H_{13} = H_{31} = \frac{\Omega_3(s)}{Q(s)} = \frac{\beta_{12} \beta_{23} s^2 + \beta_{12} k_{23} + \beta_{23} k_{12} s + k_{12} k_{23}}{B_0} \quad (4.174)$$

Chapitre IV : Modélisation et analyse vibratoire de l'éolienne

$$H_{22} = \frac{I_1 I_3 s^4 + (I_1 + I_3) \beta_{12} s^3 + [I_1 k_{23} + I_3 k_{12} + \beta_{12} \beta_{23}] s^2 + \beta_{12} k_{23} s + k_{12} k_{23}}{B_0} \quad (4.175)$$

$$H_{23} = H_{32} = \frac{(s^2 + \beta_{12} s + k_{12}) \beta_{23} s + k_{23}}{B_0} \quad (4.176)$$

$$H_{33} = \frac{I_1 I_2 s^4 + (I_1 + I_2) \beta_{12} s^3 + [I_1 + I_2] k_{12} + I_1 k_{23} + \beta_{12} \beta_{23}] s^2 + \beta_{12} k_{23} s + k_{12} k_{23}}{B_0} \quad (4.177)$$

Avec $B_0 = s^2 \left(\begin{array}{l} I_1 I_2 I_3 s^4 + I_1 I_2 \beta_{23} s^3 + I_1 I_2 k_{23} s^2 + I_1 I_3 \beta_{12} s^3 + I_1 \beta_{12} \beta_{23} s^2 + I_1 \beta_{12} k_{23} s + I_1 I_3 \beta_{23} s^3 + \\ + I_1 I_3 k_{12} s^2 + I_1 \beta_{23} k_{12} s + I_1 k_{12} k_{23} + I_1 I_3 k_{23} s^2 + I_2 I_3 \beta_{12} s^3 + I_2 \beta_{12} \beta_{23} s^2 + I_2 \beta_{12} k_{23} s + \\ + I_3 \beta_{12} \beta_{23} s^2 + I_3 \beta_{12} k_{23} s + I_2 I_3 k_{12} s^2 + I_2 \beta_{23} k_{12} s + I_2 k_{12} k_{23} + I_3 \beta_{23} k_{12} s + I_3 k_{12} k_{23} \end{array} \right)$

Une seule ligne ou colonne dans la matrice de transfert du système équivalent $[H]$ contient toute l'information nécessaire pour l'analyse modale du système. Donc une seule ligne sera déterminée H_{11} H_{12} H_{13} . En annulant successivement les termes de rigidité et d'amortissement correspondant à la troisième et au deuxième élément, on peut déduire les fonctions de transfert du modèle équivalent de l'entraînement mécanique à deux masses et une masse.

Table 4.11 : Pôles et résidus du modèle de l'éolienne à trois masses

Fonct.transfert	Pôles	Résidus (e-3=10 ⁻³)
H ₁₁		-0.000000000000000 ± j0.00000050006418e-3 0.000000000000000 ± j0.00004547141732e-3 -0.000000000000000 0.22796179360339e-3
H ₁₂		-0.000000000000000 ± j0.00002604476649e-3 0.000000000000000 ± j0.00008731704225e-3 -0.000000000000000 0.22796179360339e-3
H ₁₃	-0.0000 ± j2.4499e3	0.000000000000000 ± j0.00000270849102e-3 0.000000000000000 ± j0.00020990653225e-3 -0.000000000000000 0.22796179360339e-3
H ₂₂	-0.0000 ± j0.5746e3	0.000000000000000 ± j0.00135648559796 e-3 -0.000000000000000 ± j0.00016767161257ie-3 -0.000000000000000 0.22796179360339 e-3
H ₂₃	0	-0.000000000000000 ± j0.00014106592467 e-3 0.000000000000000 ± j0.00040307557200 e-3 -0.000000000000000 0.22796179360339 e-3
H ₃₃		-0.000000000000000 ± j0.00001466996416 e-6 0.000000000000000 ± j0.00096897688437 e-6 -0.000000000000000 0.22796179360339 e-6

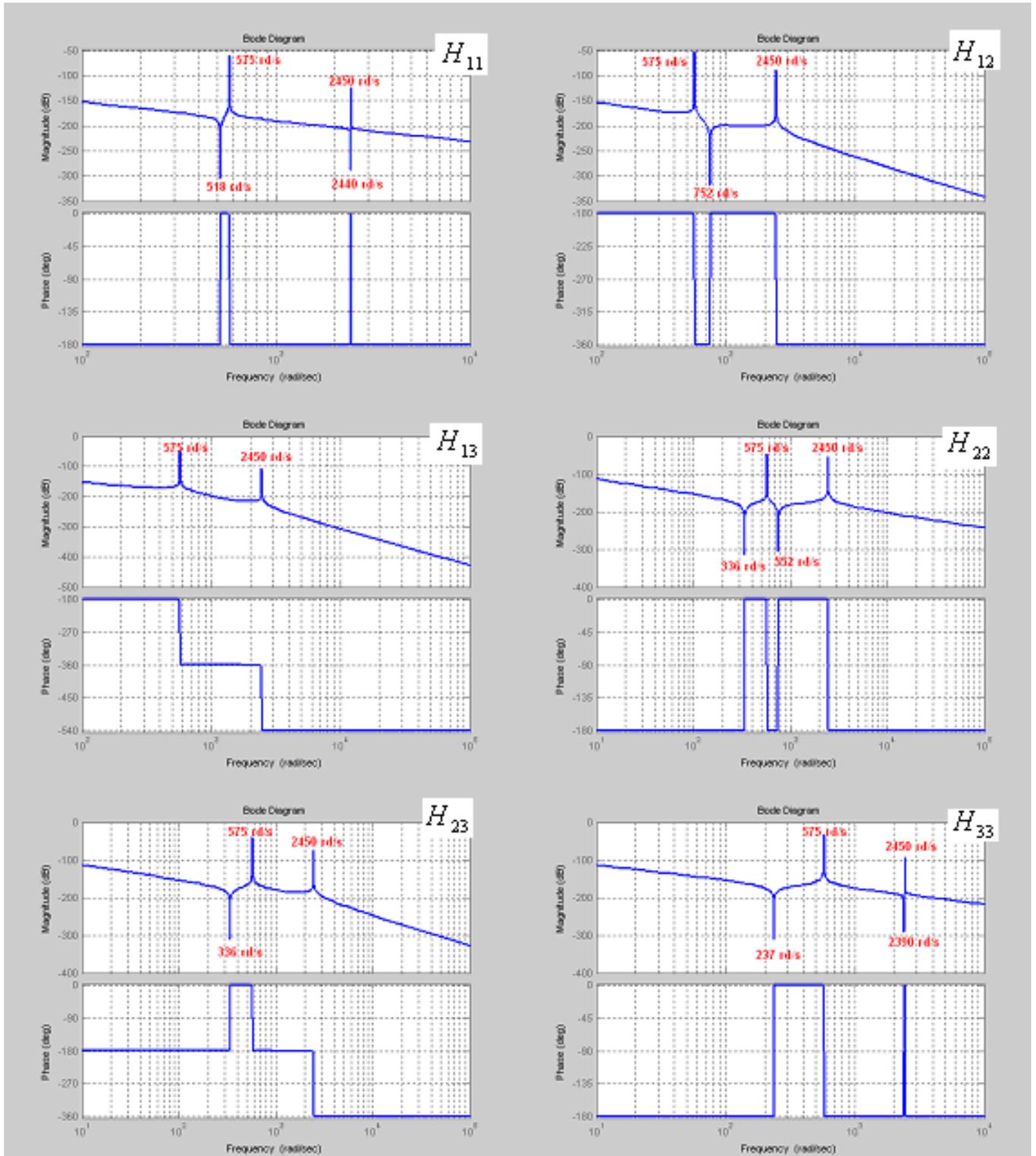


Figure 4.52 : Fonction de transfert du modèle trimasses $H(s) = \frac{\Omega(s)}{Q(s)}$

Chapitre IV : Modélisation et analyse vibratoire de l'éolienne

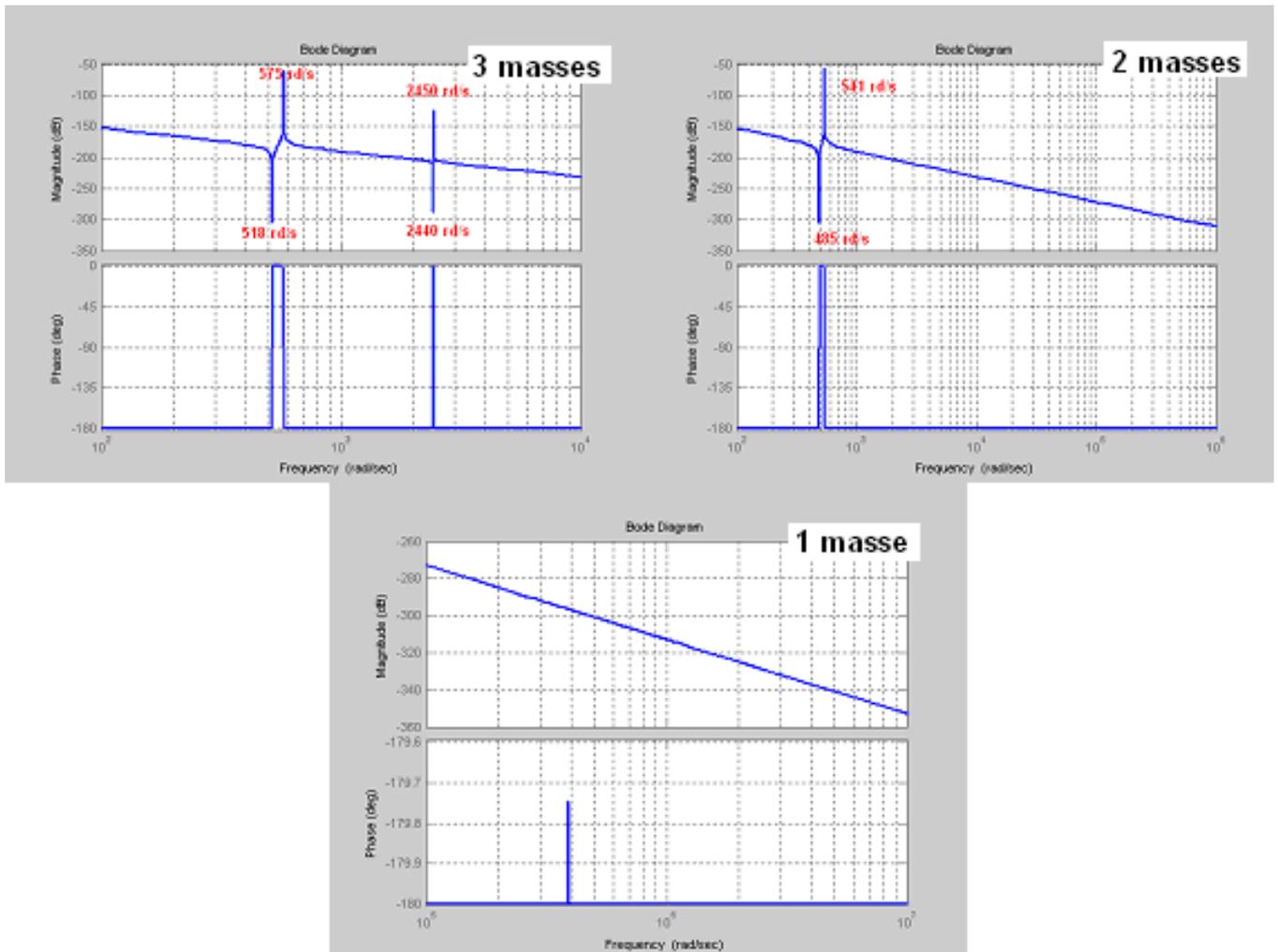


Figure 4.53 : Fonction de transfert H_{11} des différents modèles

Table 4.12 : Caractéristiques dynamiques du système amorti

Modèle	Valeurs propres	Amortissement	Fréquence (rd/s)
Trois masses	0.00	-1.00	0.00
	$-4.13e-005 \pm j5.75e+002$	$7.18e-008$	575
	$-7.50e-004 \pm j2.45e+003$	$3.06e-007$	2450
Deux masses	0.00e+000	-1.00e+000	0.00
	$-3.65e-005 \pm j5.40e+002$	$6.76e-008$	540
	$-1.00e+002 \pm j8.94e+005$	$1.12e-004$	894000
Une masse	0.00e+000	-1.00e+000	0.00
	$-1.91e+001 \pm j3.91e+005$	$4.89e-005$	391000
	$-1.31e+002 \pm j1.02e+006$	$1.28e-004$	102000

- L'analyse des fonctions de transfert du mécanisme multimasses permet de mieux comprendre les caractéristiques de fonctionnement de la partie de l'entraînement électromécanique. Le modèle d'étude dépend de la complexité de la partie mécanique et des informations utiles recherchées sur le fonctionnement de l'entraînement. Le modèle trimasses permet d'analyser les vitesses $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ et les positions $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ des différents éléments ainsi que les couples appliqués Q_{12}, Q_{23} . Les fonctions de transfert des différents modèles des systèmes oscillatoires sont caractérisées par des fréquences de résonance.
- Le système est asymptotiquement stable, car la partie réelle des pôles est négative ou nulle, ce qui montre que le système est stable ou à la limite de la stabilité (solide en rotation sans déformation) $\lambda_i = 0$ le mode est uniforme. La limite de la stabilité peut conduire à l'instabilité hyperbolique $\lambda_i > 0$; dans ces deux cas, il suffit de regarder la solution des équations du mouvement pour comprendre qu'après un temps suffisamment long, les déplacements seront tellement accrus qu'il ne sera plus possible de considérer valable l'hypothèse des petits déplacements, qui est à la base de la linéarisation des équations. En définitive, le système, pour un mode uniforme ou hyperbolique, s'échappe de la configuration d'équilibre, avec une vitesse croissante pour le mode hyperbolique, et donc l'équilibre est instable au sens de Lyapounov. En d'autres termes, le fait qu'une seule fréquence s'annule indique le passage de la stabilité à l'instabilité; voici donc une liaison entre stabilité et modes normaux; la première est analysée à partir des valeurs propres absolues du système découplé, alors que les deuxièmes sont analysés à partir des valeurs propres découplées relatifs au système non découplé. En général, une valeur propre λ_i dépend des forces agissantes sur le système, et des fréquences propres aussi; à la suite de la variation de ces forces, une valeur propre peut devenir nulle. Physiquement, cela signifie que la fréquence correspondante diminue de plus en plus jusqu'à ce qu'elle s'annule. Le mode, initialement oscillatoire, devient uniforme, et éventuellement si λ_i devient positive. L'équilibre initialement stable, devient alors instable. Le point de passage entre les deux cas est déterminé par $\lambda_i = 0$. Cela explique un fait bien connu, c'est-à-dire pourquoi près de l'instabilité les fréquences propres sont toujours faibles. Si on considère les coordonnées normales, et donc vecteurs propres relatifs et absolus coïncident (à une constante près). Cela explique un autre fait fondamental, c'est-à-dire pourquoi les modes de vibration coïncident, qualitativement, avec les modes d'instabilité d'une structure. Dans d'autres mots, la première déformée modale est qualitativement égale à la première déformée critique de flambement, et ainsi de suite pour tous les autres modes.

4.10 Conclusion

La modélisation dynamique du rotor éolien ou de l'aérogénérateur exacte ou approchée est effectuée par plusieurs méthodes (équation d'ondes, modèle vibratoire masse_ressort_amortisseur de Rayleigh, flottement de torsion_flexion et modèle multimasses d'une ligne d'arbre en rotation). L'intérêt de chaque méthode de détermination des fréquences et modes propres du système dépend du niveau de l'objectif recherché et la précision souhaitée. La connaissance des fréquences et des modes propres permet de déterminer la marge de stabilité du système et éviter les risques de sa résonance.

Chapitre V

Modélisation du couplage du rotor éolien au générateur électrique

5.1 Introduction

Lorsque la caractéristique (puissance_vitesse) du rotor éolien et du générateur électrique est connue, la procédure de couplage est directe. Mais du fait que le générateur électrique nécessite une grande vitesse de rotation (1000-1500) trs/min, le recours à un multiplicateur de vitesse pour lequel il faudrait déterminer le rapport de multiplication optimal est nécessaire. La tâche est plus compliquée qu'il nous paraît du fait que la relation puissance_vitesse dépend du type de générateur, du facteur de puissance, de la demande à satisfaire et du mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable, générateur connecté au réseau ou isolé) etc.

5.2 Couplage du rotor_générateur avec des caractéristiques connues

Lorsque les caractéristiques du rotor et du générateur sont connues (**Figure 5.54**), il reste uniquement à déterminer le rapport de transmission adéquat pour le multiplicateur de vitesse. La variation de la vitesse du générateur de 1000 à 1500 tr/min, permet de tirer un certain nombre de courbes du générateur pour différents rapports de transmission i de manière à trouver la courbe la plus proche de la puissance optimale du rotor éolien pour des vitesses de vent autour de la vitesse moyenne du site considéré. Une fois le rapport de transmission est trouvé, la puissance électrique de sortie du générateur est déduite en fonction de la vitesse du vent V . Les courbes données sur les figures ci-dessus sont des caractéristiques obtenues en souffleries, mais dans le cas réel la courbe $P(V)$ mesurée sur le terrain est légèrement inférieure à cause de la variation de la vitesse du vent et de sa direction.

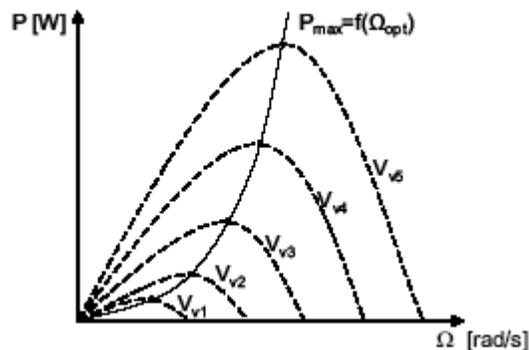


Figure 5.54 : Courbe caractéristique de couplage rotor_générateur

5.3 Couplage rotor_générateur avec des caractéristiques inconnues

Souvent, les caractéristiques du générateur et du rotor éolien ne sont pas disponibles, et on désire concevoir un rotor pour un générateur électrique donné. Dans ce cas, des informations supplémentaires sont nécessaires telles que la vitesse du vent de démarrage du système V_{in} et la vitesse nominale (de référence) de fonctionnement du système V_r . Ces vitesses peuvent être déterminées à partir des considérations énergétiques que nous verrons plus loin. Néanmoins les paramètres de la (**Table 5.13**) sont nécessaires :

Table 5.13 : Paramètres de conception d'un aérogénérateur avec des caractéristiques inconnues

Éléments	Paramètres connus	Paramètres inconnus
Générateur électrique	P_r : Puissance nominale du générateur. n_r : Vitesse de rotation nominal du générateur. η_G : Rendement du générateur à n_r . n_{in} : Vitesse de rotation du générateur à partir duquel commence à débiter. $P_{méc}(n_{in})$: Perte à vide du système (Générateur_Transmission). Q_{start} : Couple de démarrage.	
Roue (rotor)	$C_{p\max}$: coefficient de puissance maximal.	λ_d , vitesse spécifique de design. A : surface balayé par le rotor
Transmission	η_{tr} : Rendement de transmission.	i : rapport de transmission
Régime du vent	V : vitesse du vent du site. V_{in} : vitesse du vent à laquelle le générateur commence à débiter. V_r : vitesse du vent nominale du système.	V_{start} : vitesse du vent à laquelle l'aérogénérateur commence à tourner.

La vitesse de démarrage V_{start} est la vitesse à laquelle le rotor commence à tourner et arrive à vaincre le couple de démarrage du générateur et de la transmission. Cependant à V_{in} la roue délivre suffisamment de puissance pour couvrir les pertes à vide $P_{méc}(n_{in})$ et commence à produire de la puissance nette. Pour concevoir un rotor destiné à entraîner un générateur électrique, le choix du rapport spécifique des vitesses de design λ_d est limité. Souvent une roue bipales ou tripales restreignant un rapport spécifique de vitesse dans la fourchette ($5 \leq \lambda_d \leq 8$). La solution simple mais ennuyeuse sera de répéter la procédure de calcul un certain nombre de fois pour des rapports spécifiques (5, 6, 7 et 8). Pour chaque rotor on choisit le rapport de transmission adéquat et on tire la courbe de puissance $P(\bar{V})$, qui serait appréciée par rapport à ces vitesses V_{in} et V_r . Seulement, au lieu de cette approche itérative on propose la procédure suivante :

5.3.1 Couplage direct rotor_générateur à vitesse variable

Cette procédure est applicable pour un générateur à vitesse variable. Elle nécessite de veiller à ce que la puissance mécanique nécessaire pour entraîner le générateur et la transmission soit en permanence proche de la puissance maximale $C_p = C_{p\max}$ délivrée par la roue éolienne. Ceci est particulièrement vraie à basses vitesses de vent à V_{in} . Afin de conserver un rapport spécifique des vitesses λ_d constant, il faudrait que les vitesses de rotation de la roue et du générateur soient proportionnelles à la vitesse du vent.

$$\lambda_d = \frac{\Omega \cdot R}{V} = \frac{2\pi \cdot n_r \cdot R}{i \cdot V_r} = \frac{2\pi \cdot n_{in} R}{i \cdot V_{in}} \quad (5.178)$$

$$\Rightarrow n_r = n_{in} \frac{V_r}{V_{in}} \quad (5.179)$$

Si n_r est plus petite que la valeur donnée par l'équation (5.178), alors λ_d ne peut demeurer constante et il faut utiliser une autre méthode de conception. Mais par contre, si n_r est supérieure à la valeur calculée, alors la puissance nominale du générateur P_r ne sera probablement pas atteinte à V_r , de ce fait le choix est faux. Admettons que n_r a la bonne valeur et procédons comme suit :

- Calcul de la surface nécessaire du rotor A

$$C_{p \max} \eta_{tr} \frac{1}{2} \rho A V_{in}^3 = P_{méc}(n_{in}) \Rightarrow A = \frac{P_{méc}(n_{in})}{C_{p \max} \eta_{tr} \frac{1}{2} \rho V_{in}^3} \quad (5.180)$$

Le facteur η_G n'est pas pris en compte dans ce calcul.

- Vérification que la puissance nominale P_r peut bien se produire à V_r

$$C_{p \max} \eta_{tr} \eta_g \frac{1}{2} \rho A V_r^3 > P_r \quad (5.181)$$

Si cette condition n'est pas satisfaite, on augmente l'aire du rotor, ou on choisit une vitesse V_r plus supérieure.

Le coefficient de puissance $C_p = C_{p \max}$ est maximal à V_{in} .

$$\lambda_d i = \frac{2\pi \cdot n_{in} R}{V_{in}} \quad (5.182)$$

Fondamentalement, on peut faire n'importe quelle combinaison (λ_d, i) vérifiant l'équation (5.182). Cependant, il y'a une restriction du fait que plus que λ_d est grand et plus important le couple de démarrage de la roue. Il faut donc s'assurer que la roue peut démarrer à la vitesse $V_{start} < V_{in}$.

5.3.2 Linéarisation et optimisation du facteur de puissance de l'éolienne

Admettons que le couple du générateur $\bar{Q}_G = C_{te}$ et le couple du rotor éolien est linéaire en fonction de λ , $C_{q-\lambda}$.

Chapitre V : Modélisation du couplage du rotor éolien au générateur électrique

$$Q_G(V) = Q_G(V_d) \Leftrightarrow C_q \frac{1}{2} \rho A V^2 R = C_{qd} \frac{1}{2} \rho A V_d^2 R \Rightarrow \frac{C_q}{C_{qd}} = \frac{V_d^2}{V^2} \quad (5.183)$$

A partir de la courbe caractéristique sur le couple $C_q = C_q(\lambda)$

$$\frac{\lambda_{\max} - \lambda}{\lambda_{\max} - \lambda_d} = \frac{0 - C_q}{0 - C_{qd}} \Rightarrow \frac{\lambda}{\lambda_d} = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_d} + \frac{V_d^2}{V^2} \left(1 - \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_d} \right) \quad (5.184)$$

$$\frac{P(V)}{P(V_d)} = \frac{Q_d \Omega}{Q_d \Omega_d} = \frac{V}{V_d} \frac{\lambda}{\lambda_d} = \frac{V}{V_d} \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_d} - \frac{V_d}{V} \left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_d} - 1 \right) \quad (5.185)$$

$$\frac{P(V)}{P(V_d)} = \frac{C_p \eta \frac{1}{2} \rho V^3}{C_{p \max} \eta \frac{1}{2} \rho V_d^3} = \frac{C_p}{C_{p \max}} \frac{V^3}{V_d^3} \quad (5.186)$$

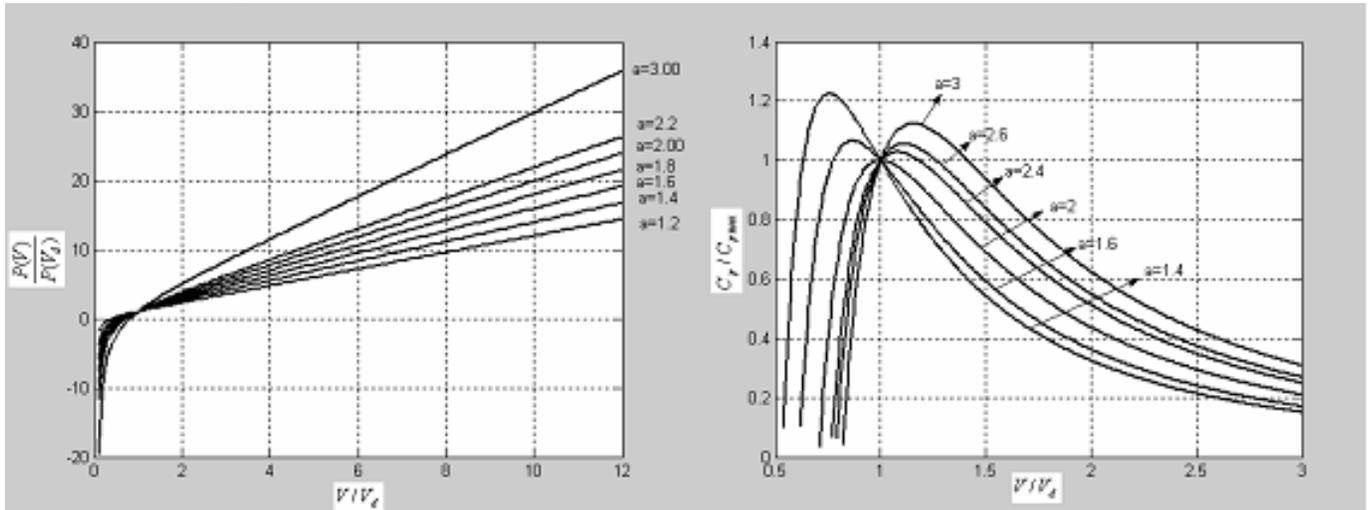


Figure 5.55 : Influence du facteur $a = \lambda_{\max} / \lambda_d$ sur le rapport de puissance $P(V)/P(V_d)$

$$\frac{C_p}{C_{p \max}} = \frac{P}{P_d} \left(\frac{V_d}{V} \right)^3 = \frac{V_d^2}{V^2} \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_d} \left[1 - \frac{V_d^2}{V^2} \left(1 - \frac{\lambda_d}{\lambda_{\max}} \right) \right] \quad (5.187)$$

$$P_r = Q_G \Omega_G = C_{p \max} \frac{1}{2} \rho A V_d^3 \quad (5.188)$$

$$Q_G = \frac{C_{p \max} \frac{1}{2} \rho A V_d^3}{\Omega_G} = \frac{C_{p \max} \frac{1}{2} \rho A R V_d^2}{\lambda} \quad (5.189)$$

$$\Omega_G = \frac{\lambda V_d}{R} = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_d} + \frac{V_d^2}{V^2} \left(1 - \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_d} \right) \quad (5.190)$$

$$C_{qstart} = \frac{0.5}{\lambda_d^2} \quad (5.191)$$

L'égalisation du couple fourni par la roue avec le couple disponible pour la charge donne :

$$\frac{0.5}{\lambda_d^2} \frac{1}{2} \rho V_{start}^2 AR = Q_{start} i \quad (5.192)$$

Dans cette expression, le couple de démarrage de la transmission est négligé, car il est généralement beaucoup plus faible que le couple de démarrage du générateur multiplié par le rapport de transmission.

$$\lambda_d^2 i = \frac{0.5}{Q_{start}} \frac{1}{2} \rho V_{start}^2 AR < \frac{0.5}{Q_{start}} \frac{1}{2} \rho V_{in}^2 AR \quad (5.193)$$

La combinaison des équations (5.192) et (4.193) donne :

$$\lambda_d < \frac{\rho V_{in}^3 A}{8\pi n_{in} Q_{start}} \quad (5.194)$$

5.3.3 Illustration de la méthode de couplage

Caractéristiques électromécaniques d'un aérogénérateur zenit@zenit.fr

Le générateur électrique : $P_r = 2kW$, $n_{in} = 10tr/s$, $Q_{start} = 0.6Nm$, $n_r = 30tr/s$, $\eta_G = 0.8$, $P_{mec} = 150W$.

La transmission : $\eta_{tr} = 0.9$.

La rotor : $C_{pmax} = 0.35$, $V_{in} = 4m/s$, $V_r = 11m/s$.

La règle heuristique de couplage est vérifiée car $n_r = 27.5 < 30$ tr/s. Cette valeur est inférieure à la valeur donnée et par conséquent le choix est bon. La surface du rotor $A = 12.4m^2 \Rightarrow R = 2m$. La puissance produite à V_r est $P(V_r) = 2495 > 2000$. Cette puissance est supérieure à la puissance donnée, donc le rotor est maintenu.

L'équation (5.182) donne $\lambda_d i = 31.4 \Rightarrow \lambda_d < 6.2832$. Le choix d'un rotor tripales pour lequel le rapport $\lambda_d = 6$ est raisonnable, le rotor démarrera à une vitesse inférieure à V_{in} et le rapport de transmission sera : $i = 5.2333$.

5.4 Modélisation de la puissance produite par l'aérogénérateur [45-49]

L'expression générale de la puissance produite par un aérogénérateur P_G est donnée en fonction de la vitesse instantanée du vent V par l'expression :

$$P_G = C_p \eta \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (5.195)$$

La dérivation de la puissance produite par un aérogénérateur à des vitesses de vent inférieures à la vitesse nominale de fonctionnement V_r , suppose que les aérogénérateurs limitent leurs puissances produites à la puissance nominale de référence donnée par le constructeur P_r dans la gamme des vitesses de vent entre V_r et V_{out} (Figure 5.56).

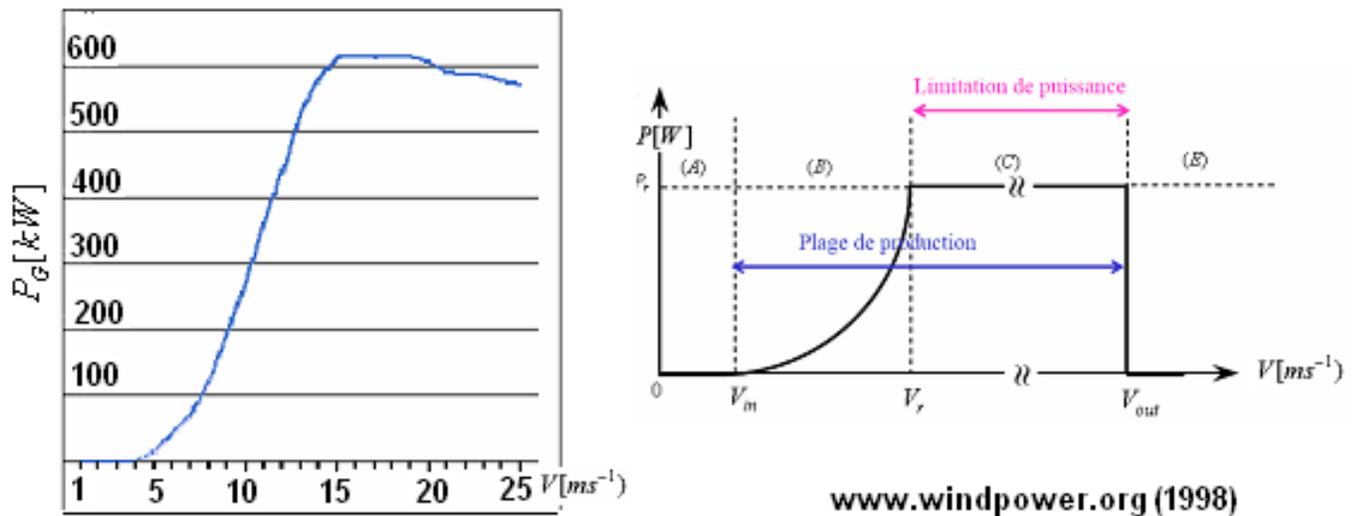


Figure 5.56 : Puissance produite par un aérogénérateur

Pour des vitesses de vent supérieures à V_{out} , la machine est mise en drapeau. Ceci implique que le facteur de puissance $C_p \eta$ devient proportionnel à V^{-3} pour $V_r < V < V_{out}$ et nul pour V_{out} . Théoriquement, le facteur $C_p \eta$ est maximal pour des vitesses de vent inférieures à V_r et l'équation (5.195) donne la forme cubique suivante :

$$P_G = C_p \eta \frac{1}{2} \rho A V^3 = Cte V^3 \quad (5.196)$$

La conception des aérogénérateurs nécessite de s'approcher de ce comportement cubique idéal malgré les contraintes technico-économiques. Ce résultat est moins idéal dans la pratique. L'aérogénérateur réel ne produira de puissance qu'à partir d'une certaine vitesse de vent V_{in} . Et puisque la courbe de puissance entre V_{in} et V_r peut prendre n'importe quelle forme, d'une manière générale, les courbes de puissance peuvent être divisées en deux groupes :

Chapitre V : Modélisation du couplage du rotor éolien au générateur électrique

Le premier groupe d'aérogénérateurs atteignent son rendement maximal η_{\max} entre V_{in} et V_r ce qui est le cas pour les caractéristiques linéaires et le deuxième groupe d'aérogénérateurs atteignent son rendement maximal η_{\max} à V_r . L'expression mathématique de la puissance délivrée en fonction de la vitesse du vent généralement mesurée sur site éq. (5.195), permet de dériver les expressions des caractéristiques optimales de la machine (vitesse de design, puissance produite à différentes vitesses nominales etc....).

5.4.1 Modèle linéaire

Ce modèle donne une bonne concordance avec l'expérimentation. La puissance produite par un aérogénérateur qui suit une loi linéaire s'écrit :

$$P_G = P_r \frac{V - V_{in}}{V_r - V_{in}} \quad (5.197)$$

Et d'après (5.196).

$$P_G = \left[C_p \eta \frac{1}{2} \rho A V_r^3 \right] \frac{V - V_{in}}{V_r - V_{in}} \quad (5.198)$$

$$\Rightarrow C_p \eta = C_p \eta \frac{V_r^3}{V^3} \frac{V - V_{in}}{V_r - V_{in}} \quad (5.199)$$

La dérivation de l'éq. (5.199) par rapport à la vitesse du vent permet de trouver la valeur de la vitesse de design V_d à laquelle par définition la valeur maximale du facteur $C_p \eta$ est atteinte :

$$\left. \frac{d(C_p \eta)}{dV} \right|_{V_d} = 0 \Rightarrow V_d = \frac{3}{2} V_{in} \quad (5.200)$$

$$\text{Pour } V_r = V_d \Rightarrow C_p \eta_{V_r} = C_p \eta_{\max}$$

$$C_p \eta = C_p \eta_{\max} 6.75 \frac{V_{in}^3}{V^3} \left(\frac{V}{V_{in}} - 1 \right) \quad (5.201)$$

L'indice spécifique de performance de la machine ISP est défini de la manière suivante :

$$ISP = \frac{C_p \eta}{C_p \eta_{\max}} = 6.75 \frac{V_{in}^3}{V^3} \left(\frac{V}{V_{in}} - 1 \right) \quad (5.202)$$

La puissance nominale produite sera :

$$P_r = C_p \eta_{\max} \frac{1}{2} \rho A V_d^3 \left(\frac{3V_r}{V_d} - 2 \right) \quad (5.203)$$

5.4.2 Modèle polynomial

Par analogie avec ce qui précède, on peut représenter la puissance produite par un aérogénérateur qui suit une loi polynomiale par l'expression de Powell [45]:

$$P_G = P_r \frac{V_r^{Cte} - V_{in}^{Cte}}{V_r^{Cte} - V_{in}^{Cte}} \quad (5.204)$$

Le facteur de puissance de la machine est donné par l'expression :

$$C_p \eta = C_p \eta_{\max} \frac{V_r^3}{V_r^{Cte} - V_{in}^{Cte}} \left(V^{Cte-3} - \frac{V_{in}^2}{V^3} \right) \quad (5.205)$$

En procédant de la manière précédente la vitesse de design V_d sera :

$$V_d = \left(\frac{3}{3-Cte} \right)^{\frac{1}{Cte}} V_{in} \quad (5.206)$$

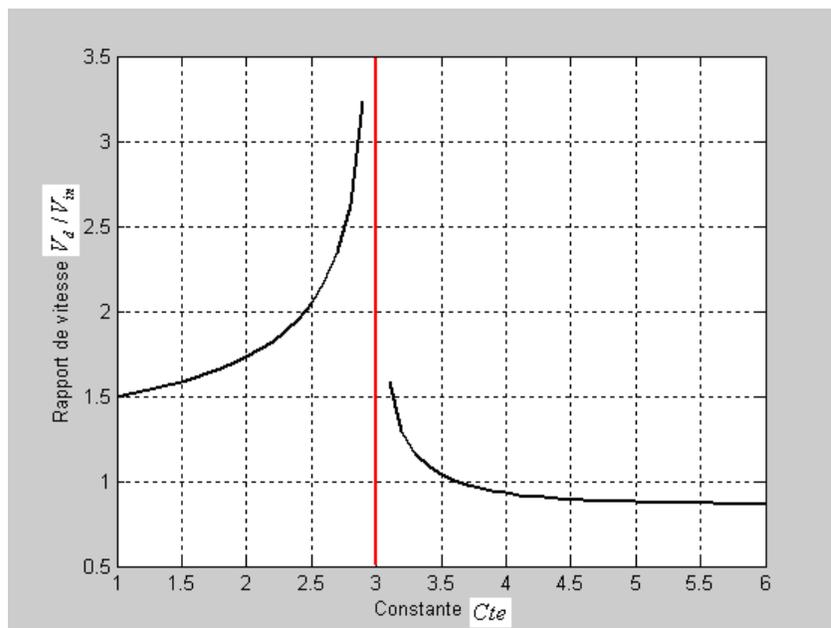


Figure 5.57: Influence de l'exposant Cte sur le rapport des vitesses V_d/V_{in}

L'indice de performance spécifique de la machine ISP est défini comme suit :

$$IPS = \frac{C_p \eta}{C_p \eta_{\max}} = \frac{3}{Cte} \left(1 - \frac{Cte}{3}\right)^{1 - \frac{3}{Cte}} \frac{V_{in}^3}{V^3} \left(\frac{V^{Cte}}{V_{in}^{Cte}} - 1\right) \quad (5.207)$$

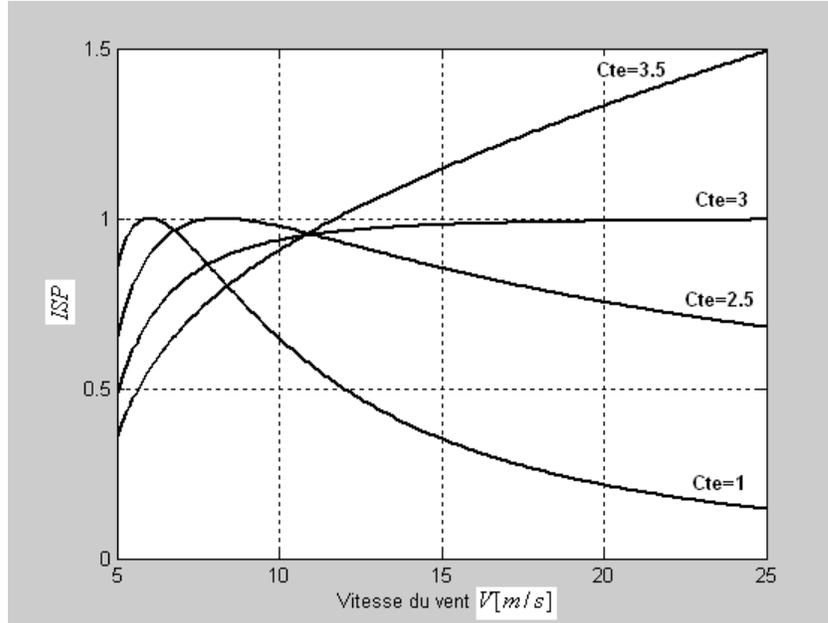


Figure 5.58 : Indice spécifique de performance ISP de l'aérogénérateur

Sur les (Figures 5.57 & 5.58), pour $Cte = 1$, on retrouve le modèle linéaire ; pour $Cte \geq 3$, l'équation (5.106) n'a pas de solutions réelles et par conséquent il n'est y'à pas de valeur de V_d , ceci est du au fait que la courbe correspondante est plus raide que la courbe idéale.

La puissance nominale produite par la machine est déduite sous la forme :

$$P_r = \frac{3}{Cte} \left(1 - \frac{Cte}{3}\right)^{1 - \frac{3}{Cte}} C_p \eta \frac{1}{2} \rho A V_{in}^3 \left(\frac{V_r^{Cte}}{V_{in}^{Cte}} - 1\right) \quad (5.208)$$

5.4.3 Modèle logarithmique

Par analogie avec ce qui précède, on peut représenter la puissance produite par un aérogénérateur en fonction de la vitesse du vent V par une expression logarithmique sous la forme :

$$P_G = P_r \frac{\log(V) - \log(V_{in})}{\log(V_r) - \log(V_{in})} \quad (5.209)$$

Le facteur de puissance est déduit sous la forme :

$$C_p \eta = C_p \eta_r \frac{V_r^3}{V^3} \left(\frac{\log(V) - \log(V_{in})}{\log(V_r) - \log(V_{in})} \right) \quad (5.210)$$

En procédant de la même manière précédente, la vitesse de design V_d sera donnée par l'équation suivante :

$$\left. \frac{d C_p \eta}{dV} \right|_{V_d} = 0 \Rightarrow V_d = \exp(1 + \log(V_{in})) \quad (5.211)$$

L'équation (5.211) donne la relation reliant la vitesse de design V_d à la vitesse de démarrage de la roue V_{in} qui optimise le facteur de puissance (Figure 5.59) .

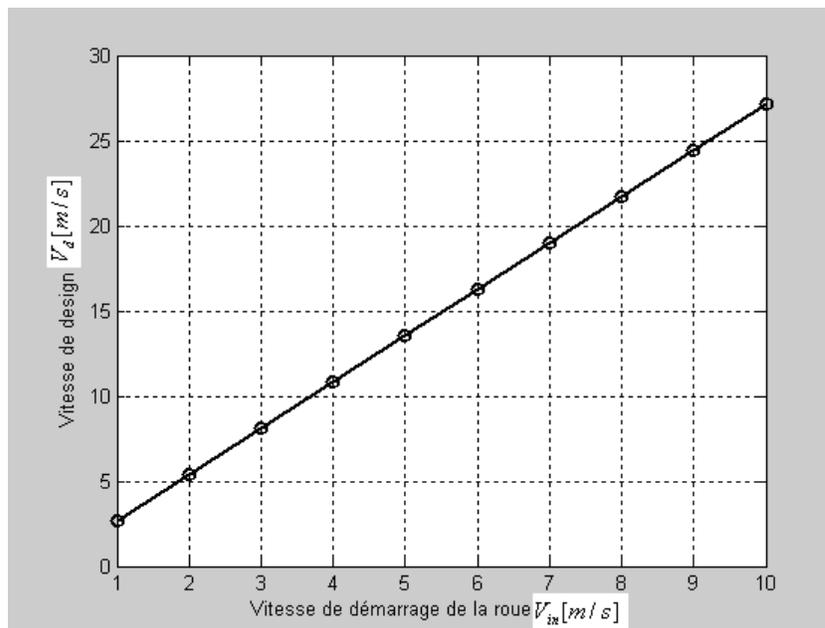


Figure 5.59 : Vitesse de design en fonction de la vitesse de démarrage de la roue $V_d = f(V_{in})$

$$IPS = \left(\frac{V_d}{V} \right)^3 \left[\frac{\log(V) - \log(V_{in})}{\log(V_d) - \log(V_{in})} \right] \quad (5.212)$$

La puissance nominale produite par la machine éolienne est donnée par l'expression :

$$P_r = C_p \eta \frac{1}{2} \rho A V_d^3 \left(\frac{\log(V_r) - \log(V_{in})}{\log(V_d) - \log(V_{in})} \right) \quad (5.213)$$

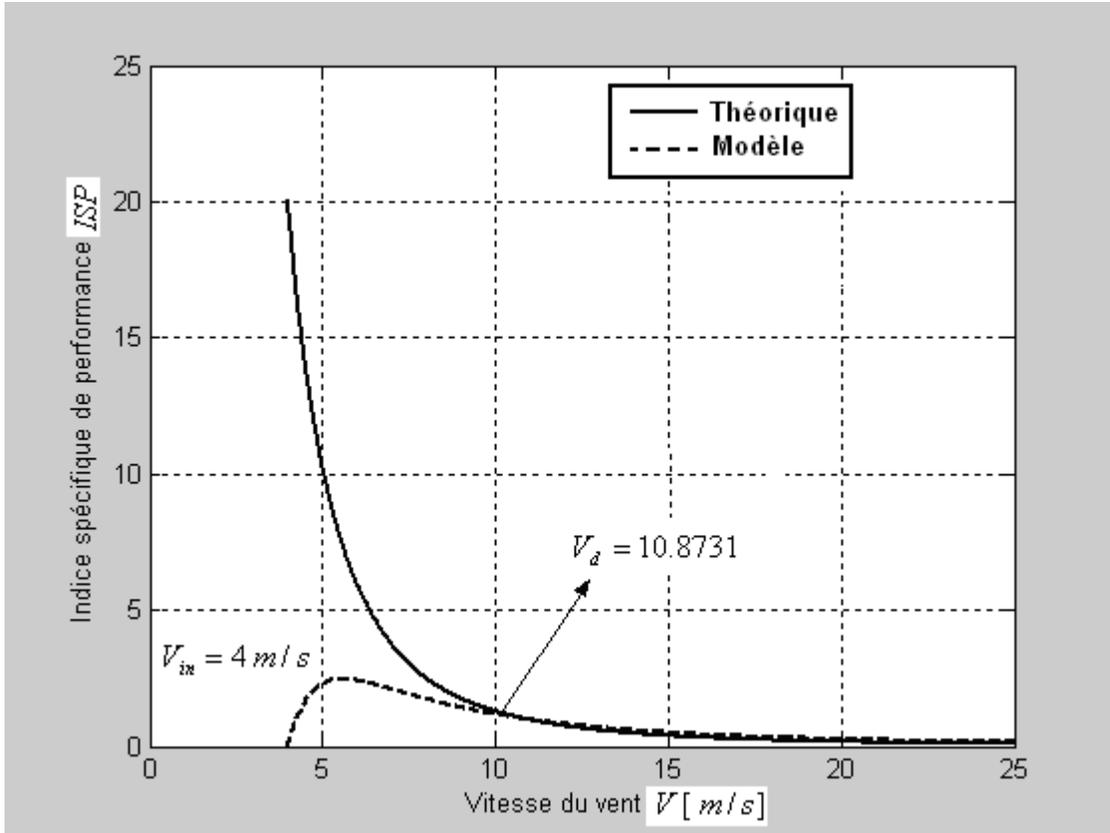


Figure 5.60 : Indice de performance de l'aérogénérateur $ISP = f(V)$

Quand la vitesse du vent s'approche de la vitesse de design de la machine, les performances théoriques de la machine se concordent parfaitement avec le modèle de simulation (Figure 5.60).

5.5 Adaptation de la machine éolienne au régime du vent [49]

La combinaison de la caractéristique de sortie d'une éolienne et la distribution des vitesses du vent détermine la production et la disponibilité énergétique d'une éolienne. La disponibilité énergétique est une problématique, car une production élevée implique presque toujours une faible disponibilité. La raison est que l'éolienne produit une grande puissance lorsqu'elle est conçue pour des vitesses de vent élevées avec comme conséquence, la machine ne pourra pas débiter à de faibles vitesses qui sont plus fréquentes. Donc des opérations de compromis sont nécessaires. Le concepteur doit faire un compromis entre la production et la disponibilité.

Mise à part la méthode approximative donnant l'énergie produite par une éolienne E_G en fonction de la vitesse moyenne du vent \bar{V} sur une période T .

$$E_G = 0.1A\bar{V}^3T \tag{5.214}$$

Deux approches de modélisation de l'énergie produite par une éolienne et la disponibilité énergétique du site peuvent être exploitées.

5.5.1 Modélisation graphique de la disponibilité énergétique

Cette technique consiste à transformer la courbe des fréquences cumulées $F(V)$ des vitesses du vent en une courbe de fréquence cumulée de puissance. Ceci se fait en indiquant la vitesse de démarrage de production de puissance nette de la machine V_{in} , la vitesse nominale de fonctionnement V_r et la vitesse de mise en hors service V_{out} sur les courbes des vitesses et trouver la fonction du temps correspondante en les transformant en une distribution de fréquences. L'énergie produite est donnée par l'aire comprise entre l'axe horizontale et la courbe de puissance.

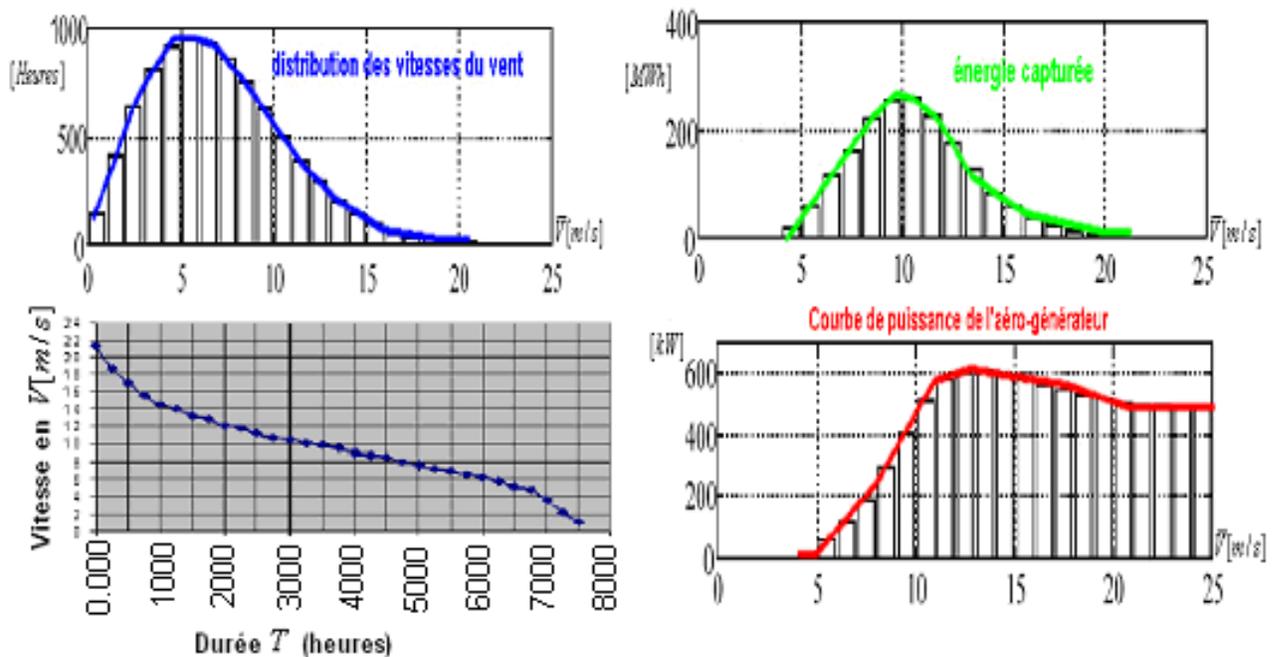


Figure 5.61 : Production et disponibilité énergétique d'une éolienne (Méthode graphique)[3]

Cette méthode donne un bon aperçu des effets que peut avoir le changement des vitesses V_{in} et V_r de l'éolienne. La disponibilité est lue directement sur l'axe du temps en terme de fraction de temps durant lequel la dite puissance est produite, mais du fait que l'énergie produite doit être trouvée par intégration graphique, cette méthode est limitée dans la pratique. Cette méthode consiste en l'utilisation de la fonction de distribution des fréquences des vitesses V représentant les centres des classes.

$$E_i = P_r \frac{V_i - V_{in}}{V_r - V_{in}} t_i \Rightarrow E_{tot} = \sum E_i \quad (5.215)$$

T nombre de tours du rotor. On peut calculer la fraction du temps ou le système n'était pas présent par son apport énergétique (somme des temps ou l'énergie produite était nulle). La disponibilité $Disp$ est donnée alors par la relation :

$$Disp = \frac{\sum t_i}{T} \Big|_{E_i=0} \quad (5.216)$$

5.5.2 Modélisation numérique de la disponibilité énergétique

L'énergie produite par une éolienne de courbe de puissance $P(V)$ pendant une période T s'écrit :

$$E_G = T \int_0^{\infty} P_G(V) f(V) dV \quad (5.217)$$

En tenant compte de la caractéristique de sortie de l'éolienne, on peut écrire :

$$E_G = T \int_{V_{in}}^{V_r} P_G(V) f(V) dV + TP_r \int_{V_r}^{V_{out}} f(V) dV \quad (5.218)$$

En effectuant le changement de variable $X = \frac{V}{\bar{V}}$, on trouve :

$$E_G = T\bar{V} \int_{X_{in}}^{X_r} P_G(X) f(X) dX + T\bar{V}P_r \int_{X_r}^{X_{out}} f(X) dX \quad (5.219)$$

La définition d'un nombre adimensionnel mesurant l'énergie spécifique du système e_{sys} extractible réellement du vent donne :

$$e_{sys} = \frac{E_G}{P_{réf} T} = \frac{E_G}{C_p \eta_{max} \frac{1}{2} \rho A \bar{V}^3 T} \quad (5.220)$$

$P_{réf}$ puissance de référence de l'éolienne.

La substitution de (5.219) dans (5.220) donne :

$$e_{sys} = \frac{1}{P_{réf}} \bar{V} \int_{X_{in}}^{X_r} P_G(X) f(X) dX + \frac{P_r}{P_{réf}} \bar{V} \int_{X_r}^{X_{out}} f(X) dX \quad (5.221)$$

Pour une éolienne idéale.

$$V < V_r \Rightarrow P_G(V) = C_p \eta_{\max} \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (5.222)$$

$$\Rightarrow P_G(X) = C_p \eta_{\max} \frac{1}{2} \rho A \bar{V}^3 X^3 = P_{ref} X^3 \quad (5.223)$$

La caractéristique du vent la plus importante et adéquate à employer dans l'éolien est la distribution statistique de Weibull [12]. Elle modélise avec succès la probabilité de l'occurrence des vitesses du vent. Cette répartition est définie par la fonction de distribution cumulée $F(V)$ et la densité de probabilité $f(V)$ sous la forme :

$$f(V) = \frac{dF}{dV} = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (5.224)$$

Avec k facteur de forme sans dimension mesurant la symétrie de la distribution du vent et c [m/s] facteur d'échelle caractérisant la vitesse moyenne du vent. La distribution de Rayleigh est une forme simplifiée de la distribution de Weibull pour $k = 2$, suffisamment précise pour un modèle de régime du vent typique. La vitesse moyenne du vent sur site \bar{V} est définie comme étant l'espérance mathématique de la distribution des vitesses.

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V f(V) dV \quad (5.225)$$

Cette vitesse peut s'exprimer facilement après deux changements de variable en utilisant la fonction mathématique Gamma Γ sous la forme :

$$\bar{V} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = c G^{\frac{1}{k}} \quad (5.226)$$

La substitution de (5.226) dans (5.224) donne :

$$f(X) = \frac{k}{\bar{V}} X^{k-1} G \exp\left(-GX^k\right) \quad (5.227)$$

La substitution de l'expression (4.227) dans (5.221) en tenant compte que $P_r = P_{ref} X_r^3$ donne :

$$e_{sys} = Gk \int_{X_{in}}^{X_r} X^{k+2} \exp(-GX^k) dX + X_r^3 \left[\exp(-GX_r^k) - \exp(-GX_{out}^k) \right] \quad (5.228)$$

L'utilisation de la méthode numérique de Gauss permet de calculer cette intégrale.

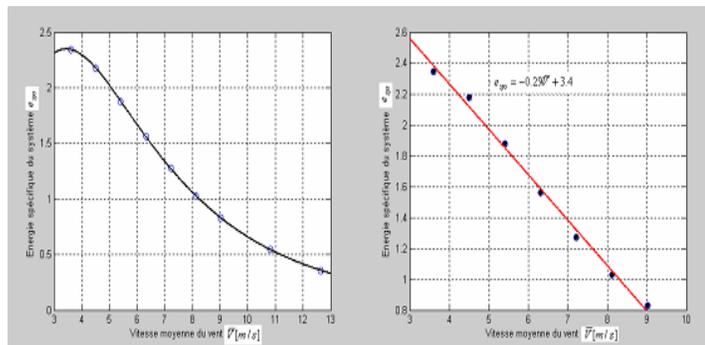


Figure 5.62 : Simulation de l'énergie spécifique de l'éolienne en fonction de la vitesse moy du site

Le facteur spécifique de puissance de l'éolienne (**Figure 5.62**) montre que la production éolienne est inversement proportionnelle à la disponibilité énergétique. On a une production faible (moins de 50 %) pour des vitesses de vent élevées (>11 m/s) et une production forte (plus de 200%) pour des vitesses de vent faibles (<5 m/s). Cependant, la conception optimale du rotor nécessite la réalisation d'un compromis entre la production et la disponibilité.

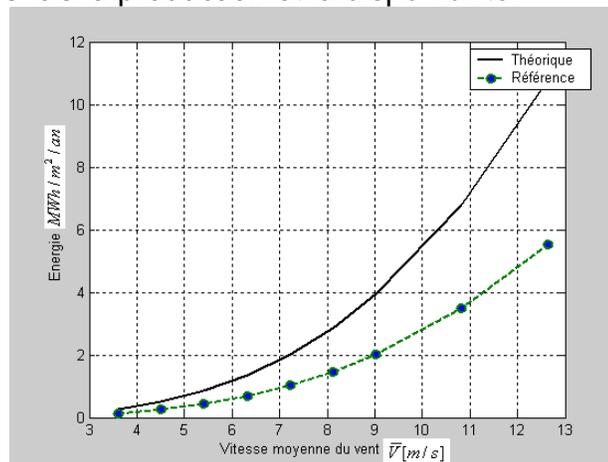


Figure 5.63 : Energie produite par l'aérogénérateur en fonction de la vitesse moyenne du site

L'éolienne (**Figure 5.63**) fonctionne avec un facteur de puissance maximal pour des régimes de vent faibles, alors la puissance réelle produite se rapproche de la puissance théorique. Par contre, pour des vitesses de vent élevées, la puissance produite est maintenue constante indépendamment de l'augmentation du régime du vent ce qui entraîne l'éloignement des deux courbes.

5.6 Conclusion

La puissance produite par l'éolienne peut être modélisée par une forme polynomiale ou logarithmique. L'adaptation de ce système au régime du vent c'est aussi la modélisation de son énergie spécifique mesurant l'énergie réellement produite par la machine éolienne rapportée à l'énergie de référence donnée par le constructeur. La disponibilité énergétique semble une problématique, car une production élevée implique presque toujours une faible disponibilité. La raison est que l'éolienne produit une grande puissance lorsqu'elle est conçue pour des grandes vitesses de vent avec comme conséquence, la machine ne pourra pas débiter à des faibles vitesses qui sont plus fréquentes. Donc le concepteur doit faire selon le cahier de charge un compromis entre la production et la disponibilité.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette approche multidisciplinaire sur la conception d'une éolienne rapide à puissance moyenne a permis de mieux comprendre le génie éolien dans le vent et la maîtrise des principaux éléments d'intérêt dans une chaîne de conversion éolienne typique via la modélisation et l'analyse du comportement aérodynamique et dynamique du rotor et de la ligne d'arbre de l'entraînement électromécanique de l'éolienne ainsi que le mode de couplage et l'adaptation de la machine éolienne au régime du vent.

L'étude a permis de :

- Faire le point sur l'état de l'art du génie éolien dans le vent en synthétisant les différentes techniques et technologies utilisées dans cette filière des énergies renouvelables.
- Effectuer une optimisation par modélisation aérodynamique d'une éolienne rapide à axe horizontale de puissance moyenne par le couplage de la méthode du moment axial avec celle de l'élément de pale BEM permettant de déterminer les efforts et la forme optimale de la corde pour des calages fixes ou variables. La méthode montre que le choix judicieux des facteurs d'interférence axiale et tangentielle facilite la convergence de la méthode itérative avec un temps de calcul minimal.
 - pour maintenir un angle de calage des pales constant $\beta = \frac{c_{L0}}{c'_L} = Cte$ adéquat pour la fabrication, il faut satisfaire la condition $\frac{8\pi R}{N_p c'_L c\lambda} = 3$ déduite de la linéarisation du facteur de portance $c_L(\alpha)$ pour une corde constante.
 - Les corrections apportées à la méthode BEM relatives aux pertes en bout de pale et aux interférences élevées permettent d'améliorer la précision des résultats de la conception du rotor éolien.
 - La méthode BEM semble incomplète pour le dimensionnement du rotor éolien, car elle est basée uniquement sur des sollicitations aérodynamiques dues aux forces de (portance et traînée) exercées sur le rotor sans tenir compte des autres charges (massiques, inertielles et dynamiques).
- La modélisation et la simulation des contraintes mécaniques sur le rotor ont permis de mieux comprendre le comportement dynamique du système via la répartition des différents efforts sur le rotor en mouvement dans le cas le plus défavorable en matière de vitesse du vent $V = 25m/s$. Cette approche complète l'étude aérodynamique et détermine la section admissible et le facteur de sécurité des pales en tenant compte des conditions de fonctionnement intrinsèques et extrinsèques relatives aux matériaux, aux conditions de fonctionnement et d'environnement selon des critères aéroélastiques bien déterminés.

Conclusion générale

- La modélisation et l'analyse dynamique de l'éolienne sont effectuées par plusieurs approches :
 - **Approche 1** : La théorie des ondes montre que les premières fréquences et modes propres exactes de la pale du rotor assimilée à une poutre de Bernoulli encastree_libre résultent de la compétition entre les forces d'inertie et de rappel élastique. Ce modèle de vibrations ne contient aucun terme susceptible de limiter l'amplitude des oscillations de sorte que la solution en amplitude ne sera définie qu'à une constante multiplicative arbitraire près.
 - **Approche 2** : La méthode d'approximation de Rayleigh montre que la forme la plus adaptée pour la modélisation de la fréquence et le mode propre fondamentaux de la pale ou du mat de l'éolienne assimilés chacun à une poutre de Bernoulli encastree_libre est la forme induite quand la pale est entraînée par sa masse répartie. C'est d'ailleurs le résultat qu'on peut obtenir par une méthode numérique telle que les éléments finis.
 - **Approche 3** : Les théories de vibrations précédentes considèrent un facteur de qualité de l'oscillateur associé au système physique élastique infini. L'analyse des différents régimes de fonctionnement de la pale/mat assimilé à un système masse_ressort_amortisseur de Rayleigh montre que : à basse fréquence le rappel élastique domine et gouverne le mouvement de la pale ; au voisinage de la fréquence de résonance l'amortissement domine et gouverne le mouvement de la pale, mais à haute fréquence l'inertie domine et commande le mouvement de la pale. Cette analyse dynamique contribue à l'amélioration de la marge de stabilité du système éolien.
 - **Approche 4** : La modélisation et l'analyse dynamique du flottement de la pale à deux degrés de liberté (torsion et flexion) admettent la détermination de la bande paramétrique de stabilité de la pale en fonction du facteur de couplage élastique dissymétrique. Il suffit d'injecter dans le modèle les facteurs d'inertie et de rigidité réels en flexion et en torsion pour déterminer la marge de stabilité relative du système étudié.
 - **Approche 5** : La modélisation et la simulation de la ligne d'arbre de l'entraînement mécanique de l'aérogénérateur par un modèle à trois degrés de liberté à permis d'établir la fonction de transfert du système qui regroupe toute l'information nécessaire d'analyse et de compréhension des caractéristiques physiques de fonctionnement du système. L'analyse modale du modèle à une, à deux ou à trois masses montre que le système est stable ou marginalement stable, car la partie réelle des valeurs propres se trouve dans le demi-plan gauche complexe. Les fréquences propres des modèles sont largement supérieures aux vitesses de rotation du rotor et de la génératrice ce qui évite le risque d'amplification d'amplitudes par résonance du système.
- Lorsque la caractéristique (puissance_vitesse) du rotor éolien et du générateur électrique sont connues, la procédure de couplage s'effectue d'une manière directe. Par contre, lorsque cette caractéristique est inconnue, le couplage du rotor au générateur passe soit par

Conclusion générale

une procédure itérative fastidieuse ou par une méthode de couplage directe. Cette dernière méthode est basée sur une règle heuristique veillant à ce que la puissance mécanique nécessaire pour entraîner le générateur et la transmission soit en permanence proche de la puissance maximale délivrée par la roue éolienne.

- La puissance produite par un aérogénérateur éolien afin de s'approcher du comportement cubique idéal, peut être modélisée par une forme polynomiale ou logarithmique.
- L'adaptation de l'aérogénérateur au régime du vent c'est aussi la modélisation de son énergie spécifique mesurant l'énergie réellement produite par la machine éolienne rapportée à l'énergie de référence donnée par le constructeur. La disponibilité énergétique semble une problématique, car une production élevée implique presque toujours une faible disponibilité. La raison est que l'éolienne produit une grande puissance lorsqu'elle est conçue pour des grandes vitesses de vent avec comme conséquence, la machine ne pourra pas débiter à des faibles vitesses qui sont plus fréquentes. Donc le concepteur doit faire selon le cahier de charge un compromis entre la production et la disponibilité.

Perspectives

L'expérience montre qu'une étude préliminaire de fiabilité au stade de la conception d'un produit est absolument nécessaire. Cela réalise simultanément une importante économie d'argent et de temps. La fiabilité n'est pas une qualité surajoutée au produit mais elle est construite en même temps que le produit lui-même. C'est au stade de la conception que se décide la fiabilité d'un système.

Nous proposons dans l'avenir une étude sur « **La modélisation et l'analyse des modes de défaillances de leurs effets et leurs criticités (MAMDEC)** » qui peuvent survenir sur un système éolien. Cette procédure consiste à évaluer et analyser les défaillances et leurs causes possibles dans un système éolien. L'analyse des conséquences de ces défaillances conduit à une conception optimale des éléments d'intérêt de l'éolienne ainsi que les moyens de fabrication et les systèmes de conditionnement de puissance.

Bibliographie

- [1] **Energies Renouvelables.** <http://www.energies-renouvelables.org>
- [2] **Darrieus wind turbine analysis.** <http://windturbine-analysis.com>
- [3] **Danish Wind Industry Association.** <http://www.windpower.org>
- [4] **Librecours.** <http://www.org>
- [5] **Glauert, H (1935)** «Airplane propellers in W, F. Durant (ed) aerodynamic theory, volume 4. Division L, Julius Springer, Berlin, pp169-360».
- [6] **D. Le Gourrières.** «Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations». Eyrolles. 1982.
- [7] **Martin O. L. Hansen,** «Aerodynamics of Wind Turbine». Second edition, Earthscan USA (2008).
- [8] **Geradin M. & Rixen D.** Théorie des vibrations. Masson, Paris, 1993.
- [9] **Ensalem R.,** Climatologie Générale, Ed. ENP, Alger 1989.
- [10] **Patrick Chassing** «Mécanique des fluides : Elément d'un premier parcours»Collection polytech. http://www.editions_cepadues.fr
- [11] **Adam Mirecki :** «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance»Thèse doctorale. Avril 2005.
- [12] **Nachida. Kasbadji. Merzouk** «Evaluation du gisement énergétique éolien : contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent»Thèse doctorale 2006.
- [13] **O. Guerri.** «Etude des performances et des systèmes d'application de deux éoliennes à axe vertical», Thèse de Magister, CDER_USTHB. Juillet 1986.
- [14] **Richard A. Santos** «Damage mitigating control for wind turbine» thèse doctorale, Déc (2006).
- [15] **Munif Jourieh :** Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien. Thèse doctorate. ENSAM Dec. 2007.
- [16] **R. E. Froude.** On the part played in propulsion by differences of fluid pressure. Transactions of the Institute of Naval Architects, 30(1889) 390–405.

Bibliographie

- [17] **P. Fuglsang H. A. Madsen** «Optimization method for wind turbine rotors» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 80 (1999) 191-206.
- [18] **K.Y. Maalawi, M. A Badr** «A practical approach for selecting optimum wind rotors» *Renewable Energy* 28 (2003) 803–822.
- [19] **Koki Kishinami & al.** «Theoretical and experimental study on the aerodynamic characteristics of a horizontal axis wind turbine» *Energy* 30 (2005) 2089–2100.
- [20] **M. Jureczko & al.** «Optimisation of wind turbine blades» *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) 463–471.
- [21] **Z.L. Mahri et al.** «Calcul des efforts aérodynamiques agissant sur les pales d'une petite éolienne». *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°2 (2007) 241 – 256.
- [22] **Simon Joncas** «conception et fabrication d'une aile rotative basse vitesse pour un hélicoptère à propulsion humaine » Montréal déc. 2000.
- [23] **David Arthur Kendall** «Hinged blade model dynamics for a horizontal axis wind turbine »Thèse doctorate (2003).
- [24] **Mamadou Lamine Doumbia.** «Outil d'aide à la conception des systèmes d'entraînement des machines électriques : exemple d'application » Thèses doctorale. Mai 2000.
- [25] **Sanae Rechka et al.** «Modélisation des systèmes électromécaniques multimasses à base de machines asynchrones à l'aide des outils Matlab et Emtp, avec application aux éoliennes » Rapport de stage. EPM, (2004).
- [26] **Ludovic Leclercq.** «Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes». Thèse doctorale. Déc. 2004.
- [27] **Olivier Gergaud** «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur» Thèse doctorale. Déc. 2002.
- [28] **Haritza Camblong.** «Minimisation de l'impact d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable» Thèse de doctorat, Déc. 2003.

Bibliographie

- [29] **Darris L. White** «A new method for dual-axis fatigue testing of large wind turbine blades using resonance excitation and spectral loading» Thèse doctorale. Déc. 2004.
- [30] **Gabriel Octavian Cimuca.** «Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens». Thèse doctorale. Déc. 2005.
- [31] **K. Badreddinne & al.** «Optimum project for horizontal axis wind turbines OPHWT». *Renewable Energy*, 30(13), 2019–2043, 2005.
- [32] **Irmela Zentner** «Etude de la stabilité des systèmes aéroélastiques en présence d'excitations aléatoires multiplicatives».Thèse doctorale, Sept. 2005.
- [33] **Abdelaziz Arbaoui.** « Aide à la décision pour la définition d'un système éolien : adéquation au site et a un réseau faible » Oct 2006.
- [34] **Abdenour Abdelli** «Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive» thèse doctorale Oct. 2007.
- [35] **Vincent Rogez.** «Modélisation simplifiée des sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire» Thèse doctorale. Déc. 2004.
- [36] **Karam Y. Maalawi, Hani M. Negm** «Optimal frequency design of wind turbine blades» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90 (2002) 961–986.
- [37] **S. Targ.** « **Elements de mécanique rationnelle** » édition Mir 1966.
www.livres-chapitre.com/-25/-14.html
- [38] **J.W. Larsen, S.R.K. Nielsen.** «Non-linear dynamics of wind turbine wings» *International Journal of Non-Linear Mechanics* 41 (2006) 629 – 643.
- [39] **Henri Blanc.** «Dynamique des rotors en torsion : Analyse des régimes de fonctionnement» *Technique de l'ingénieur BM 5123.* pp1-19.
- [40] **K. Ameer & al.** «Evaluation des Performances Aérodynamiques des Rotors Eoliens à Axe Horizontal» *Rev. Energ. Ren. : Valorisation* (1999) 23-26.

Bibliographie

- [41] **Knut O. Ronold, Carl J. Christensen** «Optimization of a design code for wind-turbine rotor blades in fatigue» *Engineering Structures* 23 (2001) 993–1004.
- [42] **Lance Manuel & al.** «Parametric Models for Estimating Wind Turbine Fatigue Loads for Design» *Journal of Solar Energy Engineering* 123 (2001) 3463–55.
- [43] **R. P. L. Nijssen and al.** «Alternative Fatigue Lifetime Prediction Formulations for Variable-Amplitude Loading» *Journal of Solar Energy Engineering* 124(2002) 396–403.
- [44] **Hans van Leeuwen** «Comparing Fatigue Strength From Full Scale Blade Tests With Coupon-Based Predictions» *Journal of Solar Energy Engineering* 124 (2002) .404–411.
- [45] **Shafiqur Rehman, Naif M. Al-Abbadi** «Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia» *Renewable Energy* 32 (2007) 738–749.
- [46] **Powel, W. R** «An Analytical Expression for the Average Output Power of a Wind Machine», *Solar Energy*, 26, pp 77-80. 1981.
- [47] **Sathyajith & K.P. Pandey** «Modelling the Integrated Output of Mechanical Wind Pump». *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 122 (2000).
- [48] **L. Hamane & al.** «Estimation de la Puissance Annuelle Moyenne de Sortie d'Une Eolienne ». *SIPE5*.
- [49] **B. Multon & al.** «Le génie électrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne». *JCGE'* 5-6 juin (2003).
- [50] **S. Diaf & al.** «Assessment of wind energy ressource in southern Algeria» *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°3 (2007) 321 – 333.
- [51] **L. Champaney** «Approximation de la fréquence fondamentale d'une structure par la méthode de Rayleigh. Notes de cours du dynamique des constructions. ENSMP.2003
- [52] **Spera D.** *Wind turbine technology-fundmental concepts of wind turbine technology*, ASME press, New York 1995.
- [53] **Comolet R.** «Mécanique expérimentale des fluides» ; Tome II. Masson, Paris, 1994.

Bibliographie

- [54] **Pascal Hémon** «Vibrations couplées avec le vent » Thèse doctorale Oct. 2004.
- [55] **Den Hartog J.P.** «Mechanical Vibrations ». Dover, New York, 1985.
- [56] **Timoshenko S. P. Goodier J.N.** «Theory of Elasticity» Mac Graw & Hill, 1970.
- [57] **Y. Mirolobov & al.** «Handbook in Materials Resistance» ed. Mir 1977.
- [58] **Richard Burden & al.** «Numerical Analysis» ed. Weber et Schmidt Boston Massachusetts USA 4th printing 1979.
- [59] **Damier Grenier & al..** Electromécanique « Convertisseurs d'Energie et Actionneurs ». © Dunod, Paris, 2001.
- [60] **Roland Bigret** «Stabilité des Machines Tournantes et des Systèmes Mécanique et Vibrations». Publication CTIM 1997.
- [61] **George Spinler** « Conception des Machines : Principes et Applications » Statique Dynamique et Dimensionnement © PPUR, 1997.
- [62] **Paul Gipe** « Le grand livre de l'éolien : © Le moniteur 31 janvier 2007
- [63] **D. Le Gourrières.** «Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations». Eyrolles. 2008. Version révisée et améliorée.