

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arréridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Électromécanique

Spécialité : Électromécanique

Par : OUELHI Aymen

Intitulé

Optimisation multi objectifs de la géométrie des pales d'éoliennes pour une large plage de vitesse de vent

Soutenu publiquement le : 28/06/2026, devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
Mme. NACIB Leila	MCA	Président	Univ-BBA
M.MEGHLAOUI Issam	MCA	Encadreur	Univ-BBA
M.LAYADI Toufik Madani	Prof	Co-Encadreur	Univ-BBA
M. ZAOUI Fares	MCA	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciement

Ce mémoire marque la fin d'un parcours, mais aussi l'aboutissement de plusieurs mois de travail, d'efforts, de doutes parfois, et de belles découvertes. À ce titre, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont, chacune à leur manière, contribué à cette aventure.

Avant tout, je tiens à adresser mes sincères remerciements à **MEGHLAOUI Issam** pour son encadrement bienveillant, sa patience, ses conseils éclairés, et surtout pour m'avoir accordé sa confiance tout au long de ce travail. Ses remarques pertinentes et son accompagnement m'ont permis de progresser et de structurer mes idées avec clarté.

Je remercie également tous les enseignants et intervenants rencontrés durant mon cursus pour la richesse de leur enseignement et leur engagement.

Je ne pourrais oublier de remercier mes amis, qui ont su m'écouter, me motiver et me faire rire même pendant les périodes les plus chargées. Merci pour votre présence, vos messages à point nommé, vos relectures, et surtout votre amitié.

Enfin, un merci du fond du cœur à ma famille, véritable pilier tout au long de mon parcours. Merci pour votre soutien indéfectible, vos encouragements constants, et votre confiance en mes capacités. Sans vous, rien n'aurait été possible.

Dédicace

C'est avec joie et bonheur que je dédie ce modeste travail à :

Ma chère et aimante mère : je n'oublierai jamais toutes les épreuves qu'elle a endurées pour moi depuis mon enfance, que Dieu lui accorde une longue vie.

À mon cher père : que dieu le protège et le garde en bonne santé.

À mes frères : Zinou, Zaki ainsi qu'à ma sœur et leurs petites familles.

À ma nièce Miral et à mes neveux Imran, Zaid et la petite Eileen.

Et je n'oublierai jamais tous mes chers amis, que je nommerai un par un.

Sommaire

Introduction générale :	1
I État de l'art et généralités sur l'énergie éolienne.....	3
I.1 Introduction :	4
I.2 Définition :	4
I.3 Principe de conversion :	4
I.4 Composant de l'éolienne et spécifiquement la pale :	5
I.5 Caractéristiques de vent :	6
I.5.1 Classification des vents :	6
I.5.2 Puissance du vent :	6
I.6 Coefficient de puissance :	7
I.7 Impact de l'aérodynamique sur la géométrie de pale éolienne :	7
I.7.1 Longueur de la pale :	7
I.7.2 Largeur de la pale :	7
I.7.3 L'angle de vrillage :	7
I.8 Conclusion :	8
II. Aérodynamique et théorie de la conception des pales	9
II.1 Introduction :	10
II.2 La méthode de l'élément de pale et calcul de puissance :	10
II.2.1 La théorie de l'élément de pale (BEM) :	11
II.2.2 Principe de base :	11
II.2.3 Calcul de la puissance mécanique :	12
II.3 Programme d'optimisation et formule (Algorithme génétique) :	13
II.3.1 Énoncé du problème d'optimisation :	13
II.3.2 Comment les formules interagissent :	14
II.4 Influence de la variation de la vitesse du vent sur les variations de la corde et vrillage de la pale :	16
II.5 Conclusion :	18

III. Optimisation géométrique et analyse des performances	19
III.1 Introduction :	20
III.2 Performances de deux types de pales d'éolienne en termes de facteur de puissance (C_p)	21
III.3 Évolution du coefficient de puissance en fonction de λ pour des vitesses de vent de 7 à 14 m/s :	24
III.4 Analyse statistique des performances aérodynamiques : CP_m et dispersion (écart type) de 7 à 14 m/s :	25
III.5 Conclusion :	27
Conclusion générale.....	28
Conclusion générale :	29

Liste des figures

Figure 1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.	5
Figure 2: Composition d'une éolienne	5
Figure 3: Représentation schématique d'un élément de pale de corde c et d'épaisseur dr	10
Figure 4: Paramètres angulaires (α, φ, θ) et bilan des forces appliquées sur une section de pale d'éolienne.....	12
Figure 5: Variation de la corde en fonction du rayon pour des vitesses de vent allant de 7 à 14 m/s.	16
Figure 6: Variation de la torsion en fonction du rayon pour des vitesses de vent allant de 7 à 14 m/s.	17
Figure 7: Performance optimale et performance des pales fixes.	21
Figure 8: Performance de la pale fixe (conçue pour 10 m/s) vs limite d'optimisation.	22
Figure 9: Comportement de chaque pale hors de son point de conception.	23
Figure 10: Comparaison des coefficients de puissance en fonction de λ (TSR) pour chaque configuration de vitesse de vent	25
Figure 11: Évolution du coefficient de puissance maximal (C_{pm}) et de l'écart type en fonction de la vitesse d'optimisation de la pale.	26

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des vents selon l'échelle de Beaufort	6
Tableau 2: Coefficient de puissance moyen (C_{pm}) et de son écart-type en fonction de la vitesse du vent.	25

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles

P : La puissance produite en [Watts]

ρ (Rho) : La masse volumique de l'air (environ 1,225 kg/m³).

V : La vitesse du vent en [m/s]

S : La surface balayée par les pales en [m²], et **$S = \pi R^2$**

C_p : Coefficient de puissance (sans unité).

$P_{méca}$: Puissance mécanique réellement extraite par l'éolienne sur son arbre en [Watts].

P_{vent} : Puissance totale du vent.

W = le vent relatif.

CL : Le coefficient de portance

CD : Le coefficient de traînée

L (Lift) : Force de portance en Newtons [N].

D (Drag) : Force de traînée en Newtons [N].

C_z ou Cl : Coefficient de portance (dépend de l'incidence et de la forme du profil).

C_x ou Cd : Coefficient de traînée (dépend de l'incidence et de la forme du profil).

R : Le rayon

Liste des abréviations

BEM : Blade Element Momentum

PRFV : Polymères renforcés de fibres de verre

TSR : Tip speed ratio (ratio de Vitesse en bout de pale)

MEP : Méthode des éléments de pale

AEF : Analyse par éléments finis

Résumé

La présente étude vise à optimiser la géométrie d'une pale d'éolienne afin d'accroître son rendement énergétique par une large plage de vent (7-14 m/s). La méthodologie explique l'utilisation de la méthode des éléments de pale (BEM), technique employée pour déterminer l'aérodynamique de l'éolienne et permet de calculer les forces s'exerçant sur la pale. Un algorithme génétique est également appliqué pour identifier la conception de pale optimale. Les résultats obtenus montrent qu'une répartition appropriée de la corde et du vrillage de la pale permet une meilleure récupération d'énergie sur une large plage de vitesse de vent. De plus, un coefficient de puissance moyen maximal de 0,45 a été obtenu à 11 m/s ($\lambda = 7$) (TSR).

Abstract:

The present study aims to optimize the geometry of a wind turbine blade in order to increase its energy efficiency over a wide wind range (7-14 m/s). The methodology explains the use of the blade element method (BEM), a technique used to determine the aerodynamics of the wind turbine and allows the forces acting on the blade to be calculated. A genetic algorithm is also applied to identify the optimal blade design. The results obtained show that an appropriate distribution of the chord and the twist of the blade allow better energy recovery over a wide range of wind speeds. Additionally, a maximum average power coefficient of 0.45 was obtained at 11 m/s ($\lambda = 7$) (TSR).

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين هندسة شفرة توربين الرياح لزيادة كفاءتها في توليد الطاقة ضمن نطاق واسع من سرعات الرياح (7-14 م/ث). تشرح المنهجية استخدام طريقة عنصر الشفرة (BEM)، وهي تقنية تُستخدم لتحديد الديناميكية الهوائية لتوربين الرياح، وتتيح حساب القوى المؤثرة على الشفرة. كما طُبقت خوارزمية جينية لتحديد التصميم الأمثل للشفرة. تُظهر النتائج أن التوزيع المناسب لوتر الشفرة وزاوية التواءها يُحسّن استعادة الطاقة ضمن نطاق واسع من سرعات الرياح. بالإضافة إلى ذلك، تم الحصول على أعلى معامل قدرة متوسط قدره 0.45 عند سرعة رياح 11 م/ث ($\lambda=7$) (TSR).



Introduction générale



Introduction générale :

Le potentiel de l'énergie éolienne est désormais considéré comme un élément essentiel de la transition énergétique mondiale. Cela est dû à sa capacité à générer de l'électricité massivement décarbonée, apportant une solution directe à l'urgence climatique avec une empreinte carbone bien plus faible que les énergies fossiles. En somme, l'évolution technologique un renforcement accru de ce secteur, faisant de ce qui était jadis une option onéreuse l'une des sources d'énergie électrique les plus avantageuses, apte à stimuler le développement industriel local sans peser sur les ressources en eau. [1]

Dans cette situation d'aérodynamisme particulière, l'efficacité générale de l'éolienne dépend entièrement de celle de son rotor et plus précisément de l'aspect des pales de celui-ci. En effet, il est important de noter que la pale est l'organe qui permet de passer de l'énergie cinétique de l'air au mouvement mécanique. C'est grâce à la conception optimale de sa géométrie, qui est essentiellement définie par l'évolution radiale de sa corde et de son angle de vrillage, que peut être maintenu un angle d'attaque optimal tout au long de l'envergure de la pale. Par contre, une conception standardisée ou mal adaptée aux vents faibles entraîne des turbulences de sillage, une augmentation de la traînée et, par conséquent, une diminution du rendement énergétique. [2]

L'objectif principal de ce travail est de concevoir un profil optimal de pale pour un régime éolien avec des vents faibles à modérés. L'enjeu réside dans le fait d'obtenir la meilleure transformation possible de l'énergie présente dans un air circulant dans les intervalles de vitesses 7 à 14 m/s de la puissance mécanique utilisable. À ces vitesses réduites, le défi majeur est de permettre à la pale de produire un couple initial élevé tout en diminuant au minimum l'inertie. Cela nécessite une configuration aérodynamique plus courbée et une structure particulièrement légère. Il est donc essentiel que la conception favorise une torsion géométrique exacte et un espace approprié pour optimiser la captation d'énergie dès les bas régimes, tout en limitant la résistance et les turbulences pour garantir une performance constante et fluide sur toute la gamme de vitesses souhaitée.[3]

Pour commencer cette étude, j'ai divisé ce travail en plusieurs chapitres, résumés comme suit :

Le premier chapitre aborde des éléments physiques et techniques essentiels qui doivent être connus pour ensuite optimiser le rotor éolien par la méthode mathématique. On commence par présenter la théorie de transformation de l'énergie cinétique en énergie électrique, mais on donne également une description des principales parties d'un aérogénérateur. Enfin, on souligne l'impact des caractéristiques du vent sur la conception géométrique et aérodynamique de la pale.

Dans le deuxième chapitre, nous traitons de l'optimisation aérodynamique des pales, une étape cruciale qui repose sur le réglage de la tension et de la torsion pour une utilisation optimale de l'énergie. En l'absence de norme géométrique unique, ce chapitre s'appuie sur des essais paramétriques réalisés à des vitesses de vent comprises entre (7-14m /s). L'objectif est d'analyser l'adaptation géométrique requise pour garantir une efficacité aérodynamique maximale sur cette plage de fonctionnement.

Le troisième et le dernier chapitre l'objectif c'est d'analyser les caractéristiques aérodynamiques de la pôle précédemment conçue dans le domaine d'évaluation des vents cibles (7 à 14 m/s). Comme la géométrie ainsi que l'angle de positionnement restent fixe, le développement du coefficient de puissance (C_p) de plusieurs dispositions est alors analysé. En conclusion, un test statistique strict (moyenne et écart-type) va permettre de déterminer la configuration assurant l'efficacité énergétique la plus stable et la plus résistante.

En fin le mémoire ce termine par une conclusion générale et une annexe.



I État de l'art et généralités sur l'énergie éolienne



I.1 Introduction :

La production d'énergie par voie éolienne représente, à l'heure actuelle, un élément clé dans le processus de production d'énergie renouvelable.

En amont de la mise en place d'une démarche d'optimisation d'un rotor et donc de son modèle mathématique, il est nécessaire de connaître parfaitement les notions physiques et techniques associées.

L'objectif de ce chapitre est de poser les bases de cette étude dans leur cadre général. Tout d'abord, nous aborderons la notion de transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique et présenterons les éléments d'un aérogénérateur nécessaires à notre étude.

Puis, nous exposerons les propriétés de cette énergie éolienne, en insistant notamment sur sa vitesse qui définit sa puissance disponible. Enfin, nous montrerons l'influence directe de l'aérodynamisme sur la géométrie de la pale, définie par des éléments tels que sa longueur, sa corde et son vrillage.

I.2 Définition :

La production d'énergie éolienne s'effectue grâce à la force du vent, une ressource naturelle qui est renouvelable et inépuisable. Elle permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité via des machines définies sous le nom d'éoliennes ou de aérogénérateurs. Ce mécanisme repose sur l'action de rotation des pales du rotor, propulsées par le vent, qui font tourner un générateur électrique placé dans la nacelle.[4]

I.3 Principe de conversion :

L'énergie éolienne est transformée en énergie mécanique en exploitant l'énergie cinétique des masses d'air qui se déplacent. Quand un courant d'air entre en contact avec les pales d'un rotor, leur profil aérodynamique crée une force de traction (voir figure 1). Ce couple moteur, provoqué par cette force, induit la rotation de l'arbre principal.

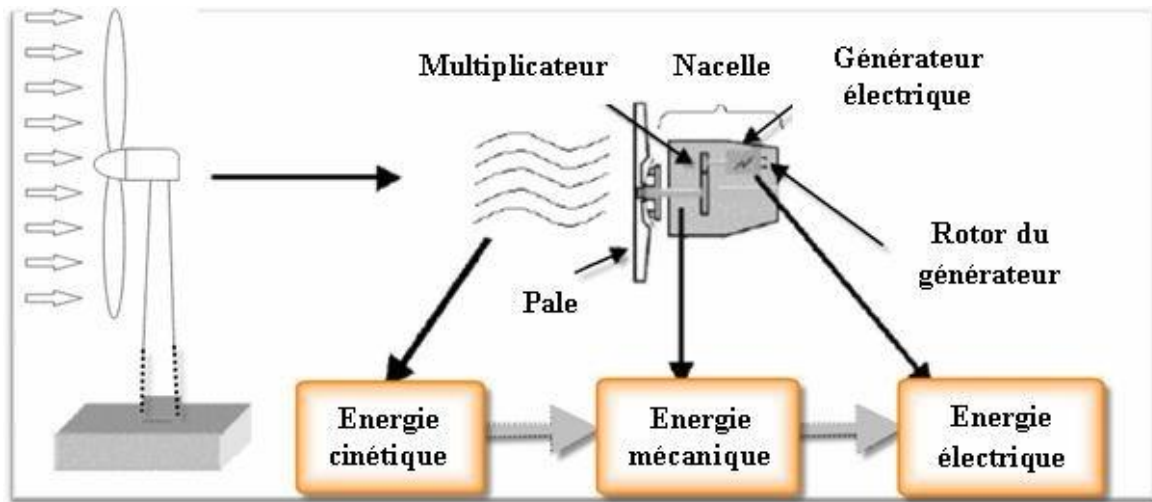


Figure 1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

[6]

Néanmoins, ce transfert énergétique se trouve limité par la loi de Betz, laquelle énonce qu'une turbine ne peut extraire et convertir en puissance mécanique, au niveau de son arbre, qu'un maximum de $16/27$ (soit approximativement 59,3 %) de la puissance cinétique du vent incident.[5]

I.4 Composant de l'éolienne et spécifiquement la pale :

Une éolienne comporte différents sous-systèmes associés : la tour, la nacelle (qui contient le multiplicateur et le générateur) ainsi que le rotor (voir figure 2).

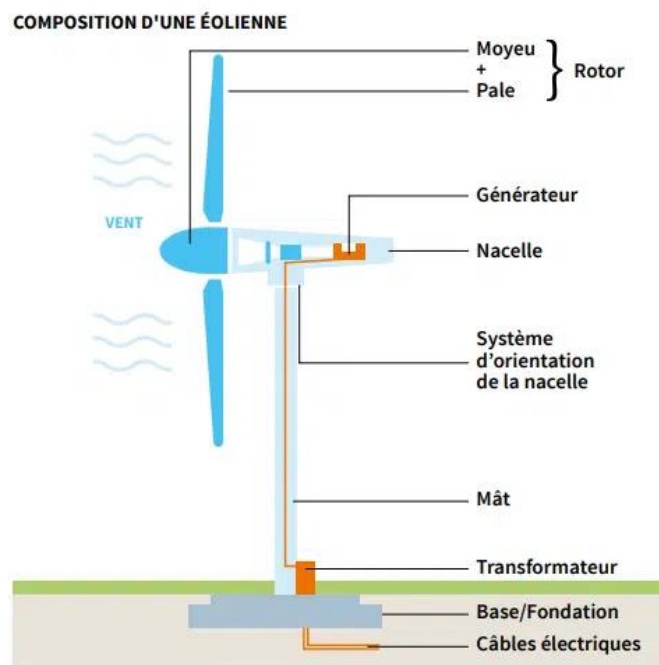


Figure 2: Composition d'une éolienne.

[8]

La pale est l'élément aérodynamique important du rotor, son rôle étant de saisir l'énergie cinétique du vent. Elle a été élaborée en se basant sur des profils asymétriques optimisés, favorisant

la portance au détriment de la traînée afin d'optimiser le couple moteur. Afin de répondre à l'exigence de légèreté et de résistance à la fatigue, les pales sont souvent constituées de matériaux composites comme les polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) ou le carbone. Ces matériaux permettent d'encaisser des charges aéroélastiques importantes tout en maintenant une rigidité structurelle sur des longueurs qui peuvent excéder 80 mètres.[7]

I.5 Caractéristiques de vent :

Le vent est défini comme étant le mouvement des masses d'air des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Il est déterminé par deux caractéristiques principales à savoir :

Direction de vent :

Qui est définie par le côté d'où souffle le vent.

Vitesse de vent :

Qui est calculée par le taux de transfert de l'air par unité de temps.

I.5.1 Classification des vents :

En plus la classification du vent se divise en plusieurs sections, et chaque section se caractérise par une vitesse spécifique illustrée sur le tableau 1 :

Tableau 1: Classification des vents selon l'échelle de Beaufort [9]

Degré	Désignation	Vitesse [km/h]
0	Calme	< 1
2	Légère brise	6 - 11
5	Bonne brise	29 - 38
9	Fort coup de vent	75 - 88
12	Ouragan	> 118

I.5.2 Puissance du vent :

Le facteur principal déterminant la quantité d'énergie électrique produite par les éoliennes est la vitesse du vent, qui est soumise à la relation suivante n°1 :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (1)$$

- P : La puissance produite en [Watts]
- ρ (Rho) : La masse volumique de l'air (environ 1,225 kg/m³).
- V : La vitesse du vent en [m/s]

- S : La surface balayée par les pales en $[m^2]$, et $S = \pi R^2$ [10]

I.6 Coefficient de puissance :

Les éoliennes ne peuvent pas exploiter 100 % de l'énergie du vent, sinon l'air s'arrêterait complètement derrière les pales, car le rendement des éoliennes ne dépasse pas 59,3 % selon la loi Albert Betz, le coefficient de puissance (C_p) est défini par l'expression suivante n°2 :

$$C_p = \frac{P_{méca}}{P_{vent}} \quad (2)$$

- C_p : Coefficient de puissance (sans unité).
- $P_{méca}$: Puissance mécanique réellement extraite par l'éolienne sur son arbre (en Watts).
- P_{vent} : Puissance totale du vent [10]

I.7 Impact de l'aérodynamique sur la géométrie de pale éolienne :

I.7.1 Longueur de la pale :

La longueur de la pale est le facteur le plus déterminant car elle définit la surface balayée, et l'augmentation de la longueur de la pale conduit à la capture de masses d'air plus importantes, ce qui permet d'augmenter l'énergie produite même en cas de vents faibles. [11]

I.7.2 Largeur de la pale :

La pale est généralement plus large à sa base et plus étroite à son extrémité, la largeur de la pale à la base assure la résistance structurelle et la facilité de rotation au démarrage, tandis que l'extrémité fine réduit les turbulences aérodynamiques au bout de la pale afin d'améliorer son efficacité aux vitesses élevées. [12]

I.7.3 L'angle de vrillage :

Cette caractéristique est considérée comme la plus précise, car la pale doit être torsadée et non plate. Ce vrillage permet de maintenir une puissance et une attaque optimales du vent tout au long de la pale, car il représente la propriété principale pour préserver l'efficacité et réduire considérablement les vibrations mécaniques. [13]

I.8 Conclusion :

Au terme de ce chapitre introductif, on peut donc résumer qu'il faut bien admettre que le rendement global de l'éolienne repose sur l'efficacité de la capture de l'énergie éolienne par le rotor, une propriété fortement restreinte par la limite maximale théorique de Betz. De la même façon, l'étude du système révèle l'importance cruciale que revêt la pale au sein du processus. En effet, il est possible de conclure que la forme de cette dernière ne peut pas être choisie de façon aléatoire mais doit respecter des contraintes de taille, de profondeur et d'inclinaison (Twist), parfaitement adaptées aux conditions du vent local. Ayant ainsi fixé les bases de la conception de cette structure, la problématique s'énonce désormais autour de la recherche de la meilleure combinaison entre ces différents éléments géométriques.



II. Aérodynamique et théorie de la conception des pales



II.1 Introduction :

L'optimisation aérodynamique d'un rotor éolien est une phase essentielle qui permet de définir la possibilité de capturer de façon efficace l'énergie cinétique du vent.

La performance d'une pale est déterminée par deux facteurs géométriques fondamentaux : l'amplitude de la corde dans le domaine radial et l'angle de vrillage.

En tenant compte de l'hétérogénéité de l'énergie disponible, il n'est donc possible d'établir aucun profil de forme universel.

Ce chapitre se penchera sur les profils optimisés géométriquement de notre pale. Par l'étude paramétrique basée sur la prise en compte de vitesses de conception allant de 7 m/s à 14 m/s, nous analyserons la manière dont la configuration de la pale doit s'adapter afin d'atteindre le maximum d'efficacité aérodynamique.

II.2 La méthode de l'élément de pale et calcul de puissance :

Figure 3 est un exemple du concept fondamental de l'approche BEM : la coupure fictive de la pale de rayon R en segments indépendants. Toute section, située au rayon r et ayant une épaisseur différentielle dr , est décrite par sa corde c . Les calculs des forces de portance et de traînée pour chaque surface différentielle sont réalisés ensuite et additionnées en fonction de l'envergure totale.

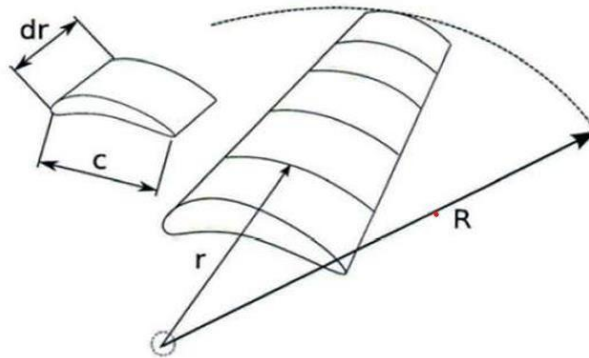


Figure 3: Représentation schématique d'un élément de pale de corde c et d'épaisseur dr .

[14]

II.2.1 La théorie de l'élément de pale (BEM) :

Cette théorie combine deux schémas physiques, d'une part, la théorie de quantité de mouvement qui traite des problèmes relatifs au flux d'air total entrant dans le rotor et, d'autre part, la théorie de l'élément de pale qui considère les forces aérodynamiques locales agissant sur le profil. [13]

II.2.2 Principe de base :

Le procédé de la théorie de l'élément de pale prévoit une partition virtuelle d'un élément de pale d'une éolienne en n éléments d'épaisseur infinitésimale dr situés à la distance r du centre de rotation. La supposition essentielle est l'absence d'action aérodynamique mutuelle entre ces éléments de pale : le flux d'air passant à travers un élément d'épaisseur dr ne peut avoir aucune influence sur les autres éléments.

On détermine pour chaque élément la vitesse de vent relative W qui frappe la section profilée de l'éolienne. Cette vitesse crée deux forces locales qui s'exercent sur le profil de corde c :

La force de portance : dL perpendiculaire à la vitesse W .

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_l \quad (3)$$

$$dL = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_l dr \quad (4)$$

La force de traînée : dD parallèle à celle-ci.

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x \quad (5)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_D dr \quad (6)$$

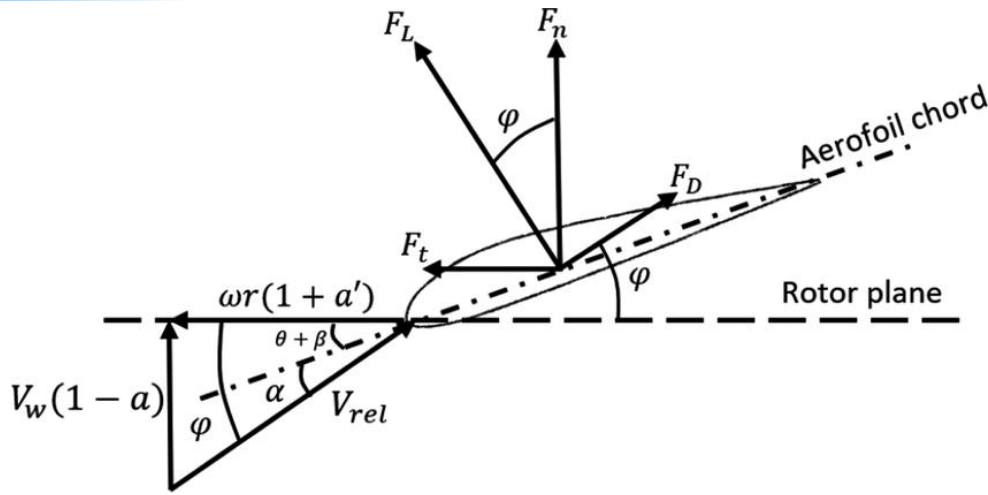


Figure 4: Paramètres angulaires (α, ϕ, θ) et bilan des forces appliquées sur une section de pale d'éolienne. [15]

- W = le vent relatif.
- ρ : La masse volumique de l'air
- CL : Le coefficient de portance
- CD : Le coefficient de traînée
- L (*Lift*) : Force de portance en Newtons (N).
- D (*Drag*) : Force de traînée en Newtons (N).
- V : Vitesse relative de l'air par rapport à l'aile en (m/s).
- S : Surface alaire (surface de l'aile) en m^2 .
- C_z ou Cl : Coefficient de portance (dépend de l'incidence et de la forme du profil).
- C_x ou Cd : Coefficient de traînée (dépend de l'incidence et de la forme du profil).

Ces forces s'expriment selon les équations suivantes :

II.2.3 Calcul de la puissance mécanique :

Il est la force tangentielle dF_t , exerçant son action sur chaque élément de pale, distant de r de l'axe du mouvement, qui produit le moment moteur élémentaire dQ . Dans le cas d'une éolienne avec Nb pales, le moment élémentaire généré par une section de largeur dr est :

$$dQ = Nb \cdot r \cdot dF_t \quad (7)$$

La puissance mécanique dP extrait par cette pale est une multiplication entre ce couple et la vitesse angulaire de rotation du rotor Ω :

$$dP = \Omega \cdot dQ \quad (8)$$

La puissance totale (P) de la turbine est calculée en faisant intervenir dans une intégration la puissance infinitésimale à partir de l'emplanture (r_{min}) jusqu'à la pointe (R) :

$$P = \int_{r_{min}}^R \Omega \cdot dQ \quad (9)$$

Cette capacité de travail peut être utilisée pour calculer le Coefficient de Puissance (C_p) de l'ensemble du rotor, défini comme le rapport de la puissance mécanique produite sur la puissance cinétique de l'air disponible au vent :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho\pi R^2 V^3} \quad (10)$$

- P : La puissance mécanique
- R : Le rayon
- V : La vitesse du vent
- ρ : La masse volumique de l'air

II.3 Programme d'optimisation et formule (Algorithme génétique) :

II.3.1 Énoncé du problème d'optimisation :

La tâche principale du projet est d'optimiser la forme de la pale pour que l'énergie éolienne puisse être produite de manière optimale dans un environnement de vents de faible à moyenne vitesse nominale, variant de 7 à 14 m/s.

La fonction objective :

Le but est de maximiser le coefficient de puissance total du rotor, Cela peut être formulé comme suit :

$$\text{Maximiser } f(x) = C_p \quad (11)$$

Avec :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho\pi R^2 V^3} \quad (10)$$

Les variables de décision :

Chaque segment de la pale qui se trouve à rayon r a besoin d'un algorithme pour évaluer les meilleurs paramètres géométriques parmi les deux suivants :

La longueur de la corde : $c(r)$, et l'angle de vrillage : $\theta(r)$

Le vecteur des variables d'optimisation s'écrit donc :

$$x = [c(r) ; \theta(r)]$$

II.3.2 Comment les formules interagissent :

Le programme fonctionne comme une boucle fermée entre un optimiseur et un évaluateur, voici comment s'articulent les formules :

1 première étape : Génération

Le processus d'optimisation génère une conception de pale avec une forme particulière de cordes $c(r)$ et de torsions $\theta(r)$.

2 -ème étape : Analyse aérodynamique (technique BEM)

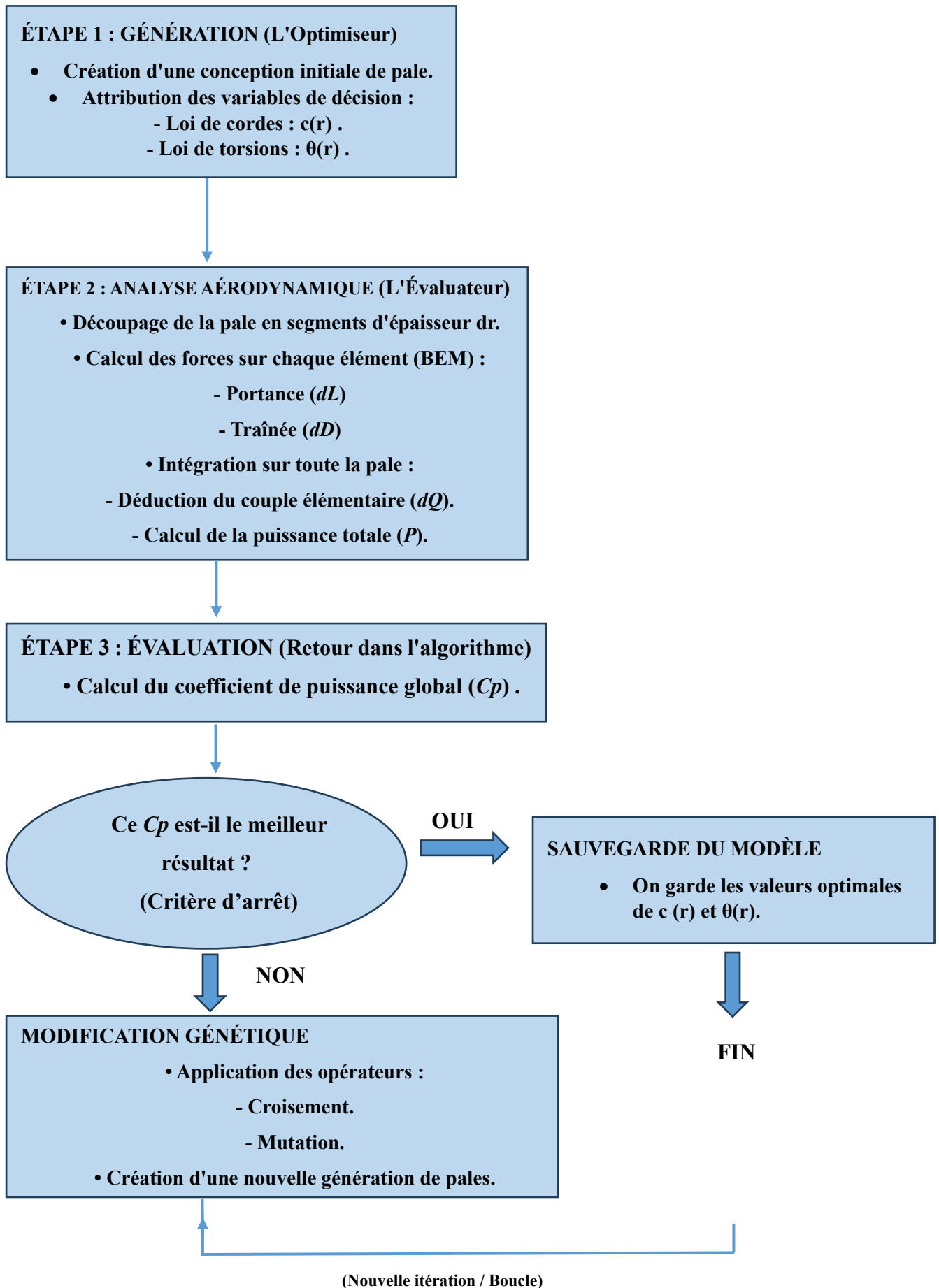
A partir de la conception de pale créée, l'outil analyse ses performances de manière segmentée, chaque élément de pale d'épaisseur dr est analysée selon les formules aérodynamiques pour calculer les forces :

- Portance : $dL = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_l dr$
- Trainée : $dD = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_d dr$

Cette approche permet de définir le couple élémentaire dQ ainsi que la puissance totale P pour cette pale en particulier.

3 -ème étape : Retour dans l'algorithme.

On obtient une valeur de C_p pour cette configuration particulière, s'il s'agit d'un meilleur résultat par rapport aux antérieurs, on garde ses valeurs de corde et de torsion. Sinon, on modifie ces deux dernières, grâce au croisement et à la mutation, créant ainsi une nouvelle génération de pales.



II.4 Influence de la variation de la vitesse du vent sur les variations de la corde et vrillage de la pale :

Afin d'évaluer la sensibilité de la géométrie du rotor aux conditions météorologiques, une étude paramétrique a été menée à différentes vitesses de vent. Les figures ci-dessous présentent les variations de l'angle de vrillage de la pale et de la corde en fonction du rayon pour diverses vitesses de vent comprises entre 7 m/s et 14 m/s. Ces courbes illustrent comment la structure aérodynamique de la pale s'adapte pour extraire une puissance maximale en fonction de la vitesse de vent cible.

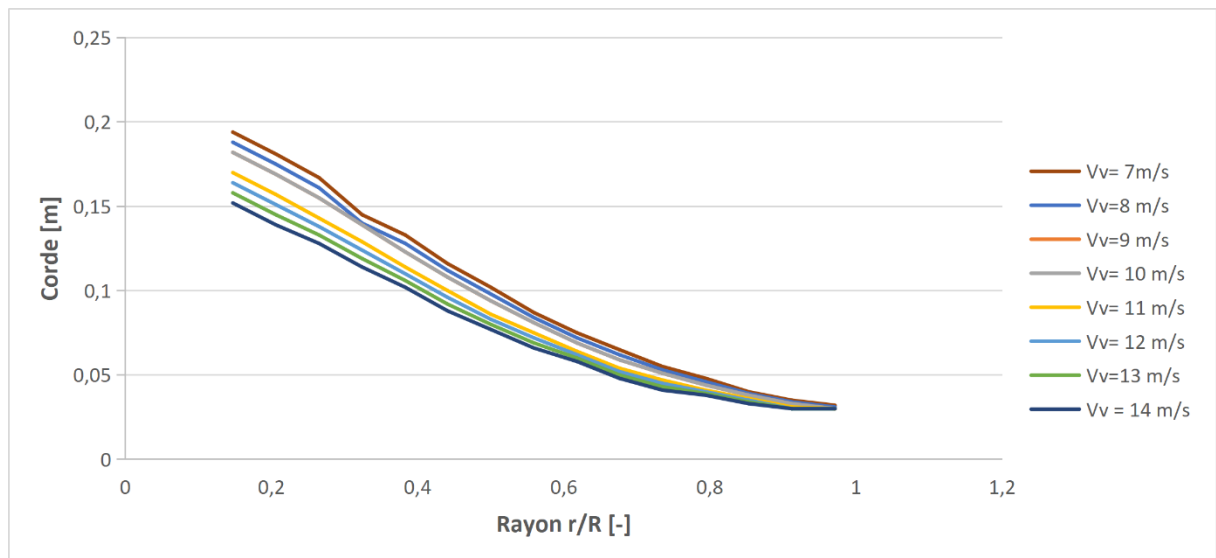


Figure 5: Variation de la corde en fonction du rayon pour des vitesses de vent allant de 7 à 14 m/s.

La figure 5 illustre la variation de la largeur de la pale (corde) le long de son rayon pour chaque vitesse de vent de conception. De manière générale, toutes les courbes suivent la même logique : au pied de la pale, le rayon est proche de **0,2**. La pale doit être large près de l'axe pour capter l'énergie et pour des raisons structurelles.

Le profil de la pale est un compromis : une base large est indispensable pour supporter les intenses contraintes structurelles (flexion, force centrifuge), tandis qu'une extrémité fine minimise la traînée aérodynamique. L'algorithme adapte également cette corde aux conditions de vent, l'élargissant pour maximiser la captation à faible régime, et l'affinant par vents forts pour limiter les surcharges mécaniques.

Ce schéma complète le précédent. Le schéma précédent montrait la largeur de la pale (corde), tandis que celui-ci illustre l'évolution de l'angle de vrillage de la pale le long de son rayon. On observe que la forme générale de l'angle de vrillage de la pale est commune à toutes les pales et que toutes les courbes sont orientées dans le même sens.

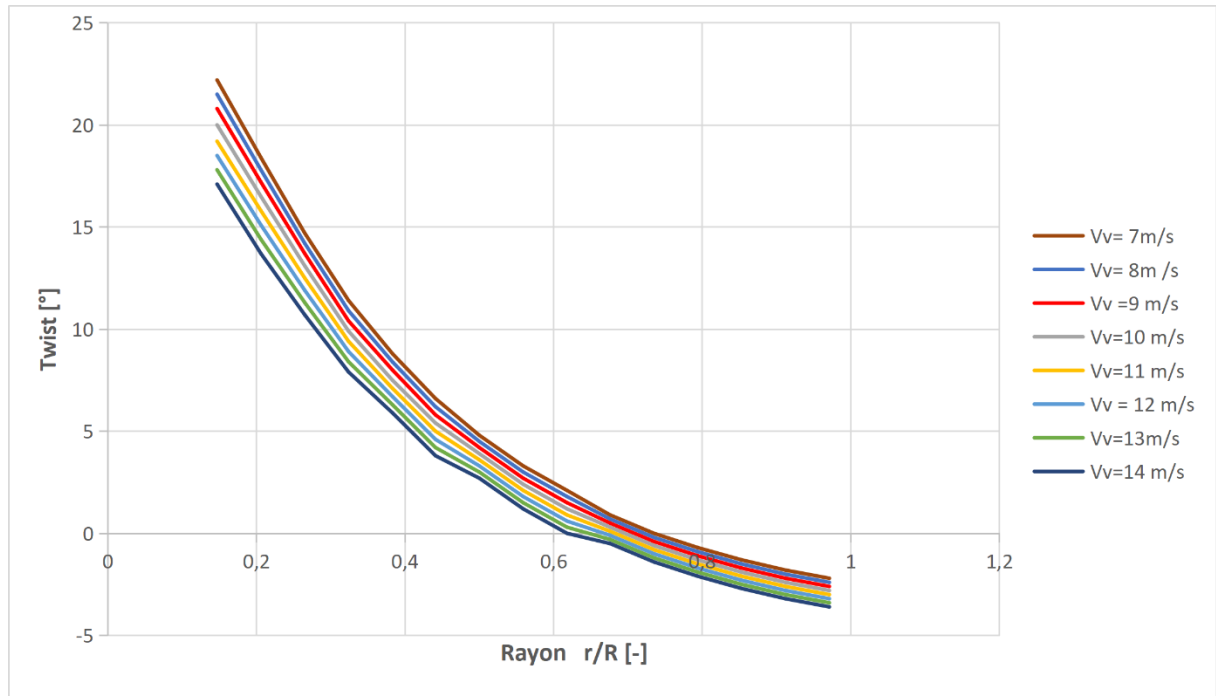


Figure 6: Variation de la torsion en fonction du rayon pour des vitesses de vent allant de 7 à 14 m/s.

D'après la figure 6 on observe à un rayon d'environ **0,15**, l'angle de torsion atteint sa valeur maximale, comprise entre **17°** et **22°** environ. Ce phénomène est important d'un point de vue aérodynamique ; par conséquent, le vent apparent subi par la surface de la pale provient directement de l'avant, ce qui contraint la pale à se courber fortement vers le haut afin de maintenir un angle d'attaque optimal par rapport au vent.

Cependant, lorsque le rayon est proche de 1, la torsion diminue considérablement jusqu'à devenir négative, aux alentours de **-2°** à **-4°**.

À ce stade, la vitesse de rotation de la pale est élevée par rapport à la vitesse du vent, car celui-ci souffle latéralement. Par conséquent, la pale doit être plus plate pour pénétrer l'air.

En ce qui concerne la vitesse du vent, on constate que par vent faible, par exemple à **7 m/s**, la pale requiert les angles de torsion les plus importants sur toute sa longueur, notamment à la racine de la pale, atteignant près de **22°**. En revanche, par vent fort, par exemple à **14 m/s**, la torsion de la pale diminue à partir de l'embase, pour atteindre environ **17°**.

II.5 Conclusion :

En conclusion, l'étude paramétrique étudiée dans le présent chapitre montre une grande sensibilité de la configuration aérodynamique de la pale à la vitesse de vent de design.

La comparaison minutieuse des profils radiaux confirme deux phénomènes importants du point de vue physique.

D'abord, l'usage de gisement d'énergie éolienne faible (autour de 7 m/s) nécessite une conception de la pale avec une plus grande corde et vrillage (jusqu'à 22° au bord d'attaque). Ceci est nécessaire pour accroître l'espace de captation du vent et compenser son angle apparent.

Ensuite, la conception pour les vents puissants (autour de 14 m/s) implique une amélioration de la pale et une diminution de sa torsion. C'est indispensable pour minimiser la traînée et prévenir des contraintes mécaniques excessives.

Ainsi, on arrive à la conclusion définitive qu'il faut une adaptation rigoureuse de la forme de la pale (sa corde et torsion) pour atteindre la limite de Betz.



III. Optimisation géométrique et analyse des performances



III.1 Introduction :

Ce chapitre se consacre à l'examen des résultats issus des simulations aérodynamiques, suite à la modélisation géométrique de pale éolienne dans les précédents chapitres, il est à présent crucial de vérifier ses performances sur notre intervalle de vent opérationnel, qui s'étend de 7 à 14 m/s.

Comme la conception se base sur une pale avec une géométrie et un angle de calage fixes, l'efficacité aérodynamique n'est pas stable et connaît inévitablement des fluctuations lorsque le vent s'écarte du point de fonctionnement nominal.

Ainsi, l'intention de cette partie est de mettre en parallèle différents scénarios de conception, chacun étant optimisé pour une vitesse de vent particulière (de 7 à 14 m/s). Dans cette optique, nous examinerons la variation du coefficient de puissance (C_p) pour chaque configuration.

Pour dépasser une simple inspection visuelle des courbes, notre recherche se basera sur une caractérisation statistique des données récupérées.

En calculant la moyenne et l'écart-type des performances sur toute la gamme de vent, nous serons en mesure de mesurer de manière objective la stabilité de chaque conception.

Cette approche stricte nous aidera à repérer et à argumenter la configuration qui génère l'énergie la plus stable et la moins susceptible de subir un décrochage aérodynamique.

III.2 Performances de deux types de pales d'éolienne en termes de facteur de puissance (C_p) :

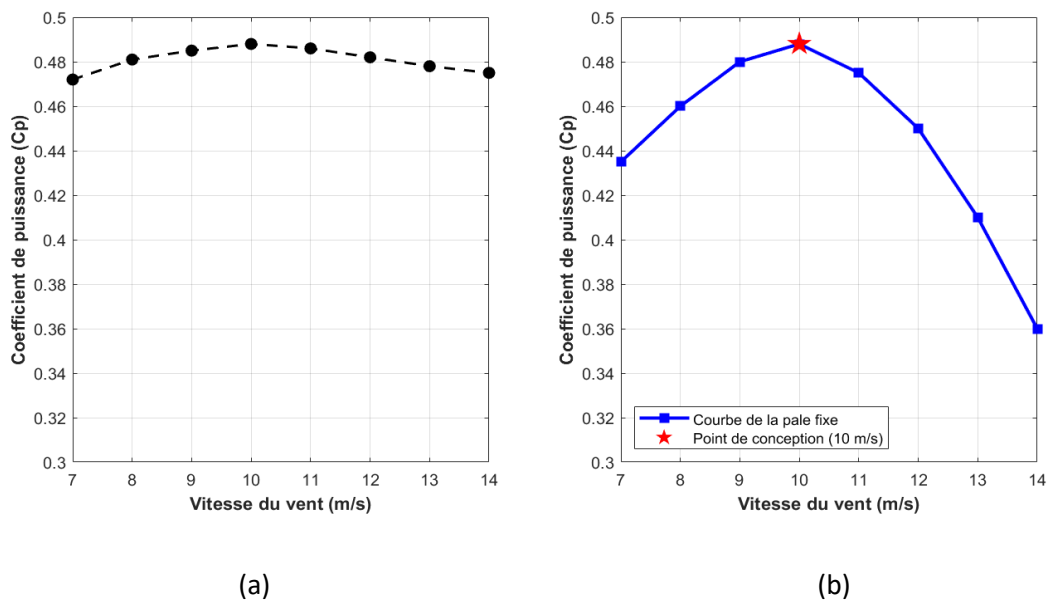


Figure 7: Performance optimale et performance des pales fixes.

Ces deux courbes comparent les performances de deux types de pales d'éolienne en termes de facteur de puissance (C_p), qui mesure l'efficacité avec laquelle une turbine extrait l'énergie du vent.

La figure 7 (a) représenté la variation du coefficient C_p en fonction de la vitesse de vent, ces valeurs sont issues de la simulation numérique de 8 pales de géométrie différente, d'après la figure le facteur de puissance C_p reste très élevé (proche de **0,49**) sur une large plage de vitesses de vent (7 à 14 m/s).

La figure 7 (b) représenté la variation du coefficient C_p en fonction de la vitesse de vent, ces valeurs sont issues de la simulation numérique du désigne qui correspond à une vitesse de vent de 10 m/s, d'après la figure le facteur de puissance C_p atteint **0,49** a la vitesse de vitesses de vent du désigne (**10 m/s**).

Performance des pales fixes :

Cette courbe représente une turbine dont les pales ont un pas fixe, conçue spécifiquement pour offrir des performances optimales à une vitesse de vent donnée (**10 m/s**)

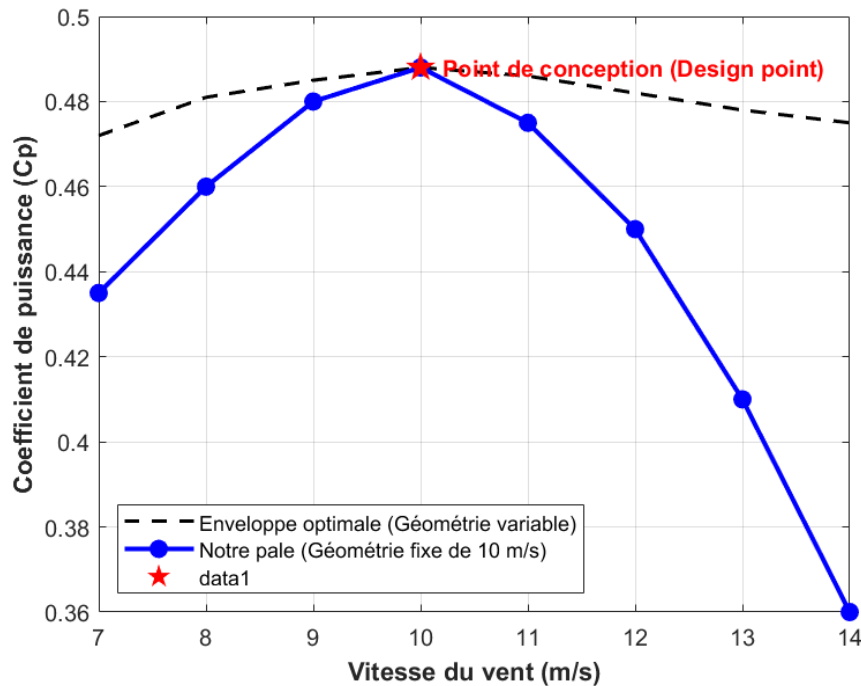


Figure 8: Performance de la pale fixe (conçue pour 10 m/s) vs limite d'optimisation.

La courbe montre que le rendement de la pale fixe est optimal uniquement à la vitesse pour laquelle elle a été conçue (10 m/s dans ce cas). Et on a des pertes d'énergie dans les zones éloignées de 10 m/s (par exemple, 7 m/s ou 14 m/s), une quantité importante d'énergie disponible est perdue (l'écart entre la courbe bleue et la courbe en pointillés).

Dans l'étape suivante, nous tracerons des courbes qui représentent le coefficient de puissance (C_p) idéal pour chaque vitesse de 7 m/s à 14 m/s.

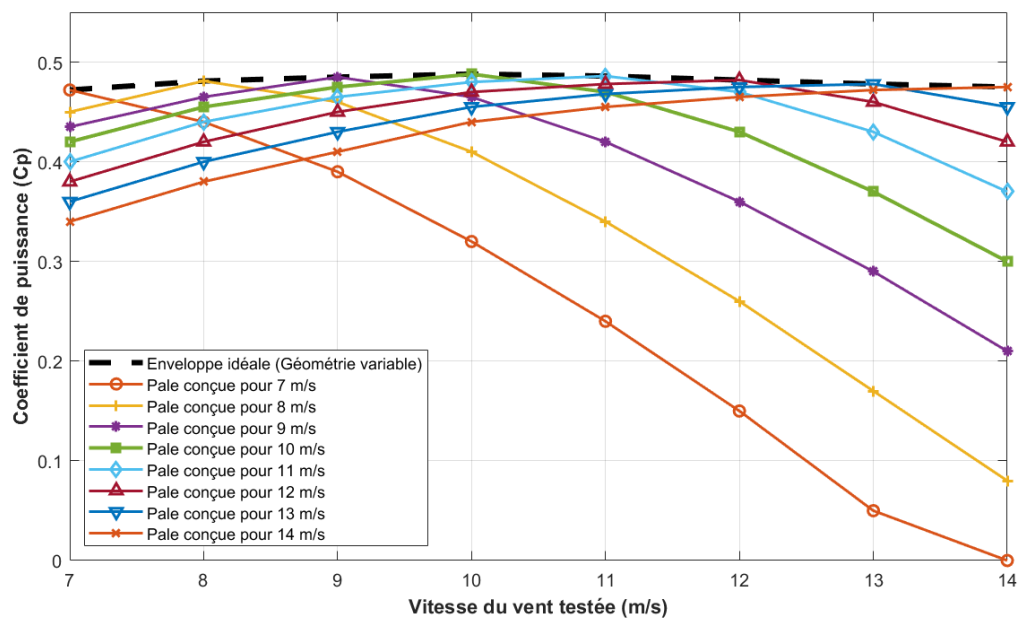


Figure 9: Comportement de chaque pale hors de son point de conception.

Sur cette courbe, on observe **8** pales de géométries différentes, chacune conçue pour une vitesse de vent spécifique.

Exemple : La courbe orange est conçue pour **7 m/s**. On constate qu'elle atteint son rendement maximal à **7 m/s**, puis chute brutalement lorsque la vitesse augmente.

Autre exemple : La courbe rouge est conçue pour **14 m/s**. Son rendement est faible à basse vitesse, mais atteint son maximum à **14 m/s**.

On en conclut que les pales conçues pour de faibles vitesses de vent perdent en rendement beaucoup plus rapidement lorsque la vitesse du vent augmente, comparativement aux pales conçues pour des vitesses de vent élevées.

Si la vitesse du vent dépasse le point de conception, le coefficient de performance (C_p) chute considérablement, car la géométrie de la pale n'est plus adaptée aux nouveaux angles d'écoulement de l'air.

III.3 Évolution du coefficient de puissance en fonction de λ pour des vitesses de vent de 7 à 14 m/s :

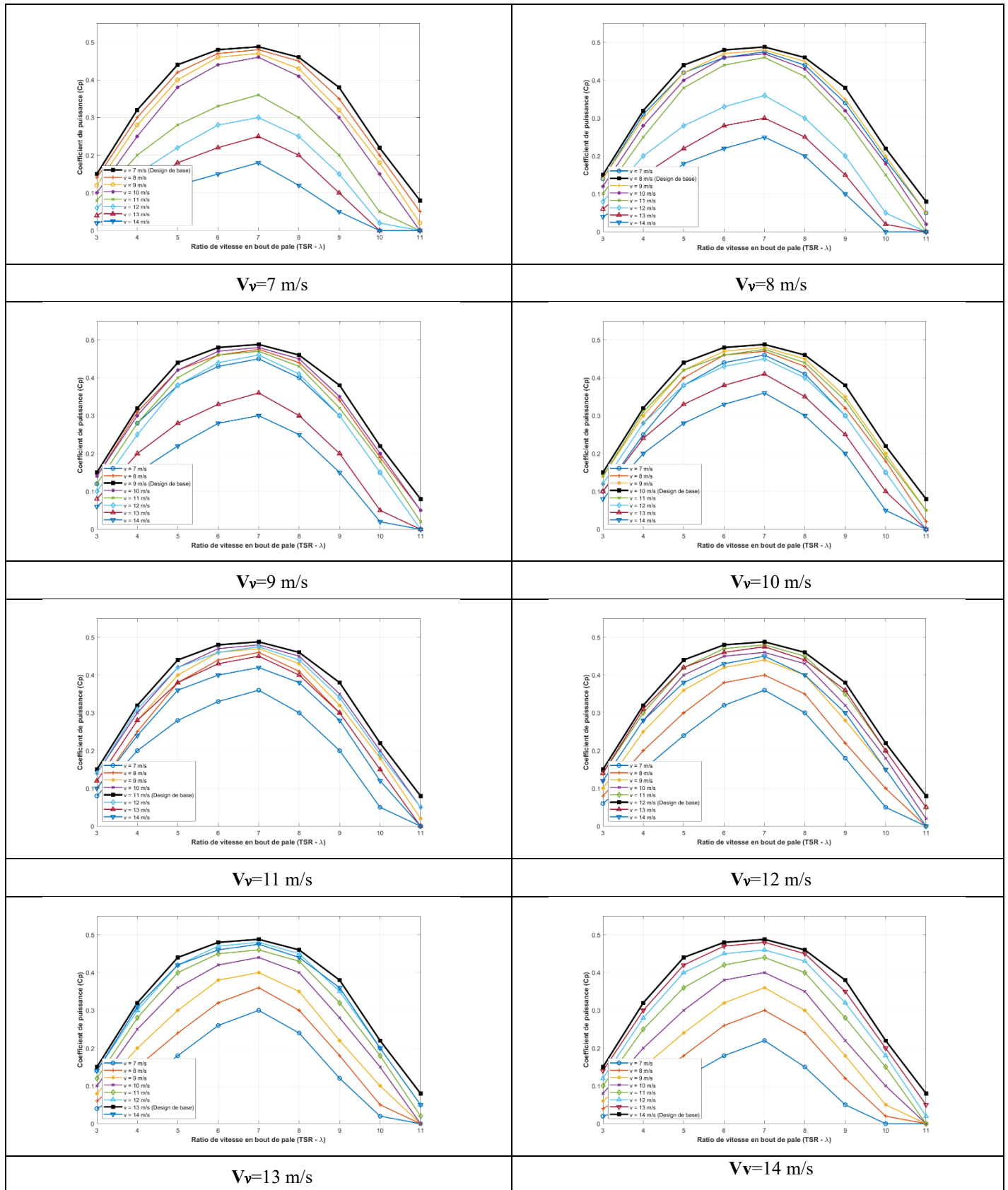


Figure 10: Comparaison des coefficients de puissance en fonction de λ (TSR) pour chaque configuration de vitesse de vent

A travers ce tableau, qui contient **8** courbes, où chaque courbe représente un design spécifique avec une vitesse de **7 m/s** jusqu'au design de **14 m/s**, on remarque que les pales conçues spécifiquement pour les vents faibles s'effondrent dès que le vent s'intensifie, tandis que la pale conçue pour les vents forts devient incapable d'exploiter l'air léger.

En théorie, cela pourrait effectivement se traduire par des pertes de production en fonction des conditions météorologiques, mais à travers ce tableau on voit que certaines courbes de la pale spécialement conçue pour les vents (**10 m/s à 12 m/s**) sont très rapprochées car la bande de courbes se rétrécit de manière compacte en haut du graphique.

Cela montre que le choix d'une forme géométrique moyenne est la clé pour obtenir une éolienne capable d'absorber les vitesses du vent, aussi faible ou forte soit-elle, tout en conservant un excellent rendement global.

III.4 Analyse statistique des performances aérodynamiques : C_{pm} et dispersion (écart type) de 7 à 14 m/s :

Sur la base de notre analyse du tableau, nous allons maintenant effectuer quelques calculs pour le coefficient de puissance moyen et l'écart type afin de confirmer notre analyse précédente.

Tableau 2 : Coefficient de puissance moyen (C_{pm}) et de son écart-type en fonction de la vitesse du vent.

Vitesse (m/s)	C_{pm}	Écart -type
7	0,3735	0,1192
8	0,410375	0,0937
9	0,435375	0,068
10	0,449125	0,043
11	0,450375	0,042
12	0,444125	0,044
13	0,425375	0,067
14	0,3935	0,095

A l'aide du tableau ci-dessus, nous traçons les courbes du coefficient de puissance moyen et de l'écart type en fonction de la vitesse.

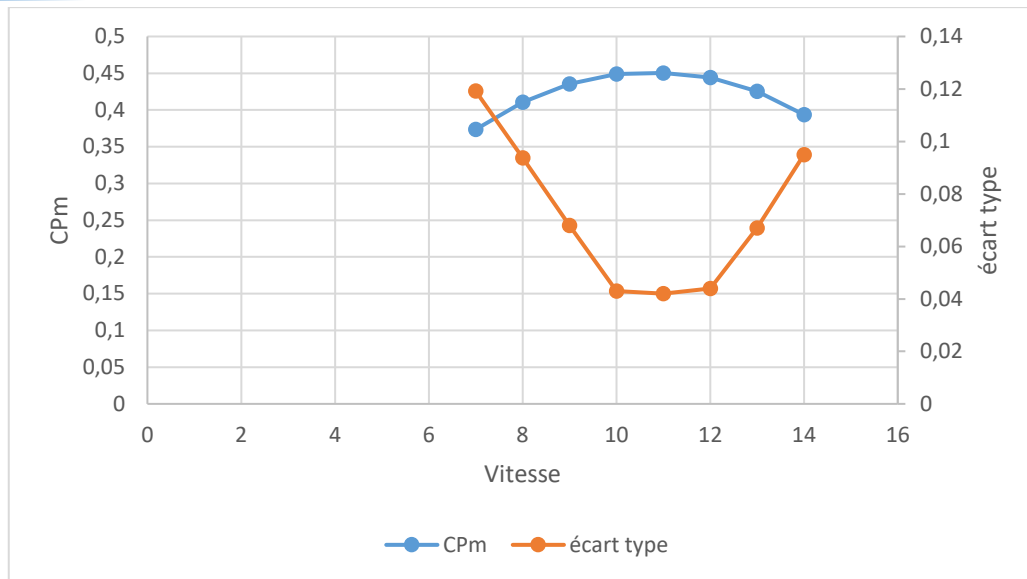


Figure 11: Évolution du coefficient de puissance maximal (C_{pm}) et de l'écart type en fonction de la vitesse d'optimisation de la pale.

Ce graphique représente la corrélation entre deux indicateurs statistiques clés pour chaque vitesse de vent de conception (de 7 m/s à 14 m/s).

L'axe de gauche indique le facteur de puissance moyen en fonction de la vitesse de vent atteinte pour chaque conception. On observe que les performances globales augmentent progressivement, atteignant leur maximum pour les conceptions prévues pour des vitesses de vent comprises entre 10 m/s et 12 m/s, et sont inférieures aux autres vitesses.

Sur l'axe de droite, on observe l'écart type, qui mesure le degré de dispersion des performances. On constate que lorsque cet écart type augmente, comme c'est le cas pour les vitesses de 7 m/s et 14 m/s, le rendement de la pale fluctue ; en revanche, lorsqu'il diminue, la stabilité et la polyvalence de la pale face aux variations de vent s'améliorent.

III.5 Conclusion :

Au final de ce troisième chapitre, l'utilisation d'un algorithme génétique a donc permis de définir avec succès la forme aérodynamique optimale de la pale.

L'étude paramétrique réalisée pour des vitesses de vent de conception comprises entre 7 et 14 m/s a montré sans ambiguïté l'importance des conditions d'exploitation sur le design de la turbine.

Les résultats de l'analyse des distributions radiales ont en effet permis de constater que, pour pouvoir capter au mieux les vents doux (tel que 7 m/s), la pale doit avoir une corde importante ainsi qu'une torsion accentuée à sa racine pour garantir un bon angle d'attaque.

De même, une conception destinée à capter des vents rapides affiner la pale et diminue le vrillage pour réduire les frottements.

Enfin, cette démarche de recherche optimale confirme bien l'importance d'un design précis de la forme de chaque pale en fonction du site d'implantation envisagé pour optimiser le coefficient de puissance (C_p) et approcher la limite de Betz.



Conclusion générale



Conclusion générale :

Ce travail porte sur la modélisation aérodynamique et l'optimisation d'une pale d'éolienne adaptée au fonctionnement en régime de vent faible (7 à 14 m/s). En effet, la demande croissante en énergies renouvelables a conduit à l'exploitation de sites éoliens au potentiel énergétique inférieur aux prévisions. L'objectif principal de ce projet est donc de maximiser l'énergie cinétique du vent par l'optimisation de la géométrie du rotor.

Pour atteindre cet objectif, une méthode numérique rigoureuse, basée sur deux concepts clés, a été conçue et mise en œuvre :

Modélisation aérodynamique : L'utilisation de la méthode des éléments de pale (MEP/BEM) a permis de modéliser le comportement de l'écoulement d'air et de calculer les forces locales de traînée et de portance.

Optimisation géométrique : L'utilisation d'un algorithme génétique a permis d'explorer de nombreuses géométries afin d'obtenir la configuration la plus appropriée.

Tout d'abord, les résultats montrent que les caractéristiques géométriques ont un impact considérable sur l'efficacité de la turbine :

Distribution optimale de la torsion et de la corde : En effet, la définition de la distribution de la corde $c(r)$ et de l'angle de torsion $\theta(r)$ garantit que chaque section de la pale bénéficie de l'angle d'attaque optimal afin de réduire la traînée et les pertes par sillage.

Performances optimisées : Les diagrammes de performance obtenus démontrent l'efficacité de notre géométrie. En particulier, le coefficient de puissance (C_p) atteint des valeurs moyennes maximales importantes (environ 0,45 à vitesse 11 m/s pour $\lambda = 7$).

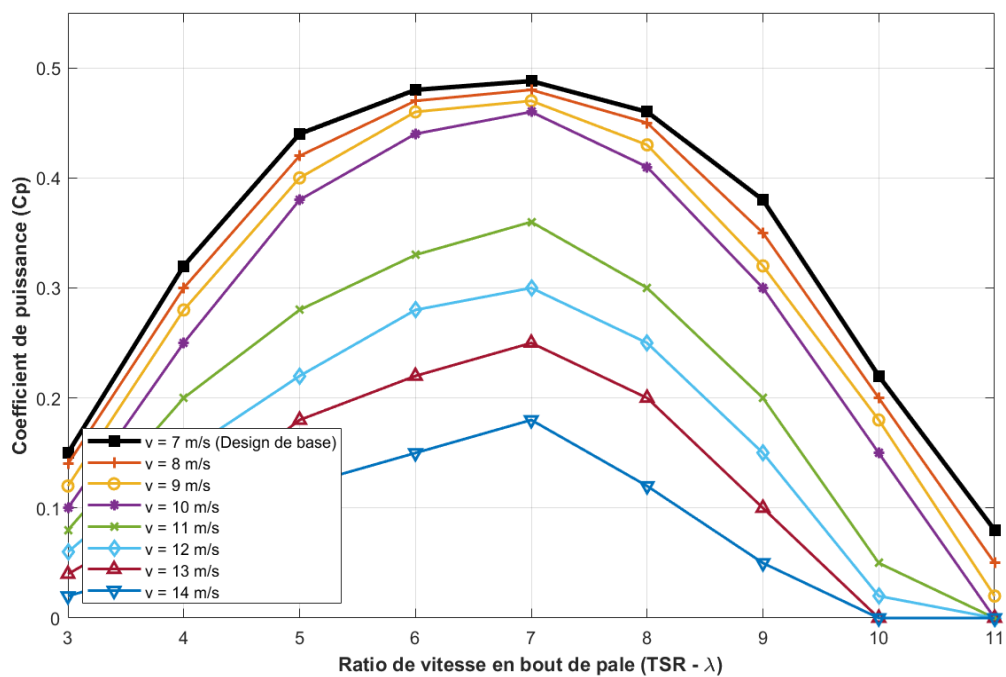
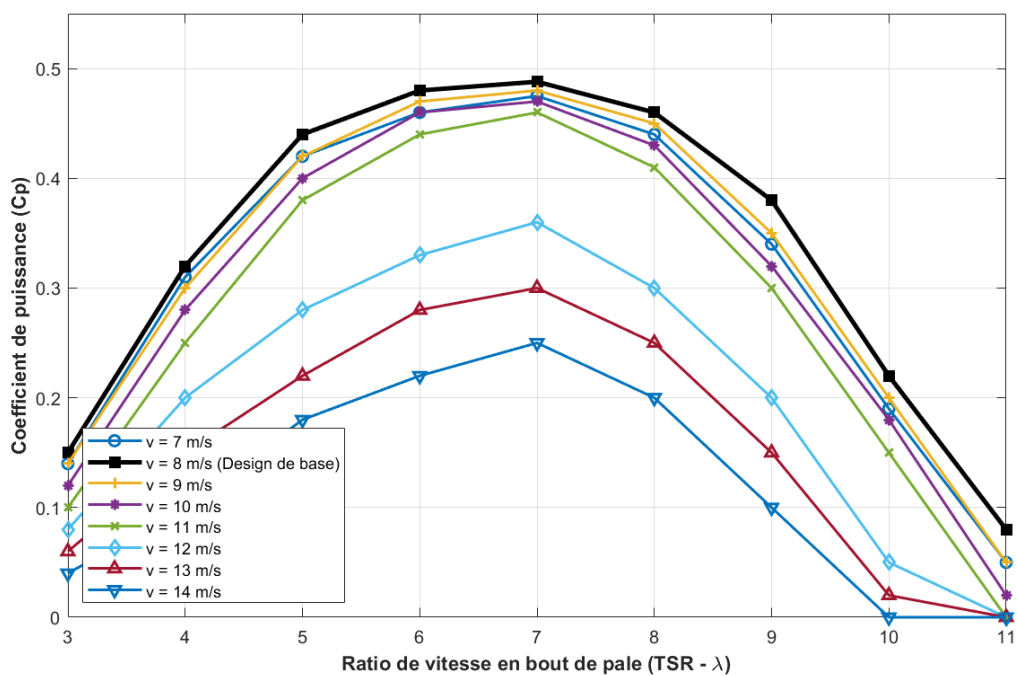
Importance de la longueur de la pale : De plus, il est à noter qu'augmenter la longueur des pales est essentiel pour accroître la surface balayée par le rotor et compenser la faible densité énergétique des vents modérés.

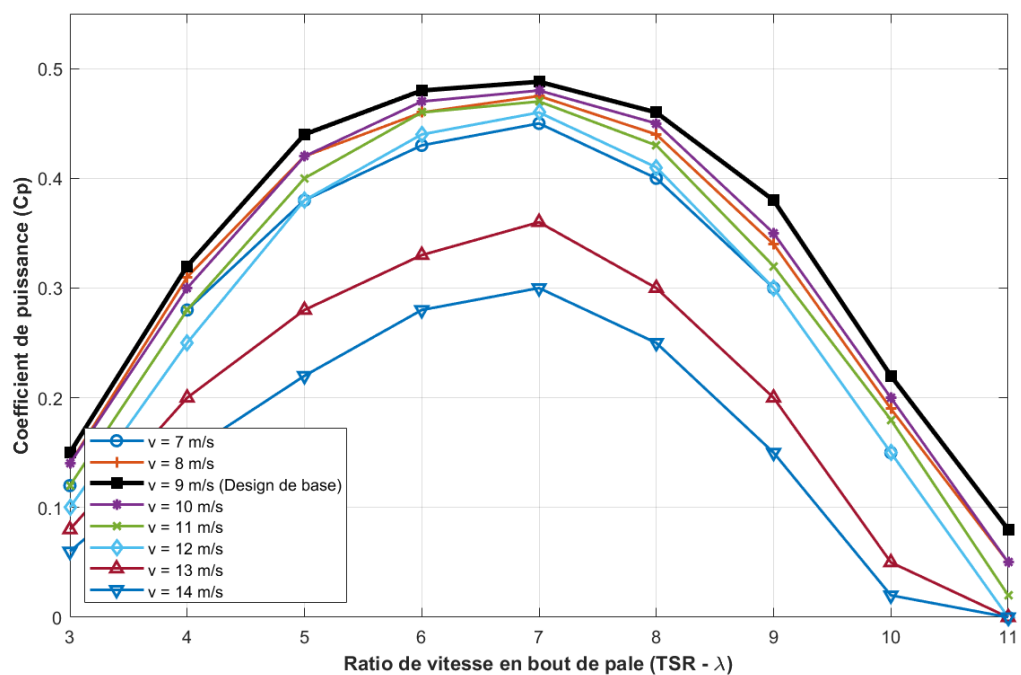
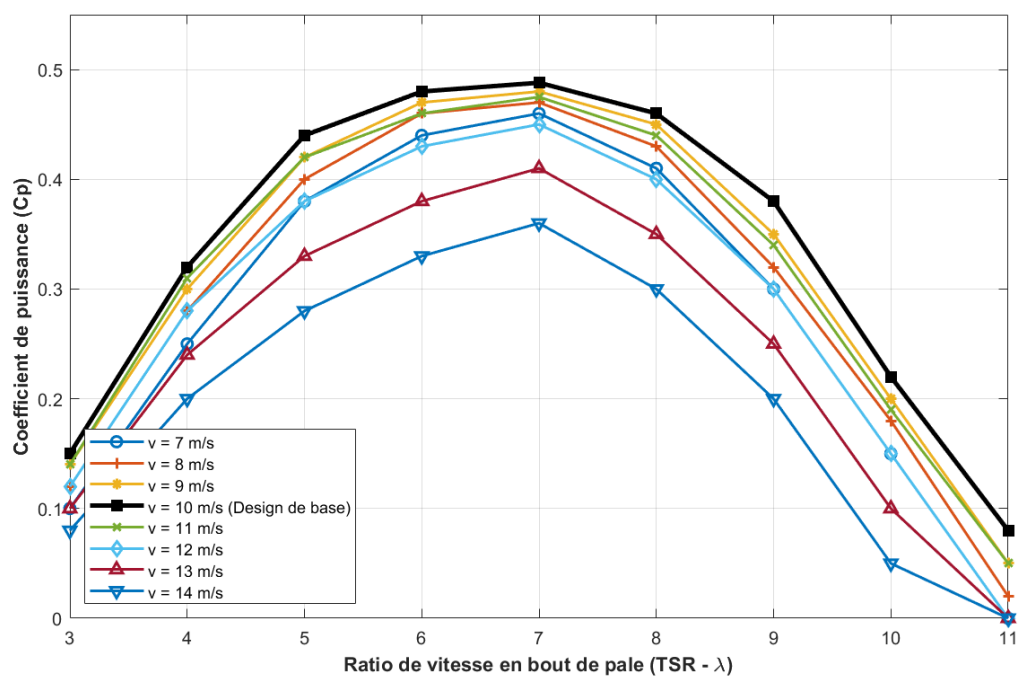
En conclusion, l'utilisation de la méthode des éléments de pale (MEP) combinée à une méthode d'optimisation constitue une technique efficace pour la conception de pales d'éolienne à haut rendement. En ce qui concerne les perspectives, bien que seule une étude aérodynamique ait été réalisée, il serait pertinent de poursuivre cette étude par la mise en œuvre d'une analyse par éléments finis (AEF).

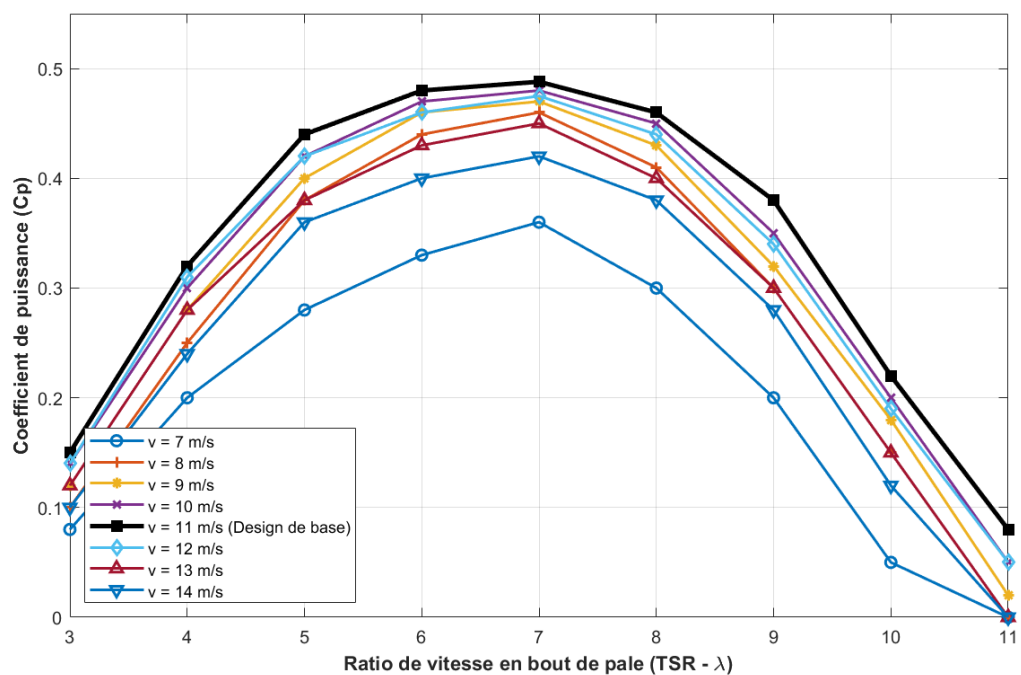
Références :

- [1] IRENA (2023/2024)
- [2] Tony Burton et al. (2011)
- [3] Selig M.S & Giguere P
- [4] ADEME, Comprendre l'énergie éolienne, 2023
- [5] Multon, B. (2014). Énergie éolienne. Techniques de l'Ingénieur, base documentaire : TIB466DUO.
- [6] www.researchgate.net/figure/Conversion-de-lenergie-cinetique-du-vent
- [7] Hau, E. (2013). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [8] <https://mtaterre.fr/articles/comment-ca-marche-lenergie-eolienne/>
- [9] Météo-France. (S.d.). L'échelle de Beaufort
- [10] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). Wind Energy Handbook (2ème édition). John Wiley & Sons.
- [11] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). Wind Energy Handbook. Wiley.
- [12] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). Wind Energy Explained. Wiley
- [13] Hansen, M. O. L. (2015). Aerodynamics of Wind Turbines. Routledge.
- [14] Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L. L'énergie éolienne expliquée : théorie, conception et application. John Wiley & Sons, 2010.
- [15] https://www.researchgate.net/figure/BEM-velocity-triangle-showing-the-inflow-angle-ph-twist-and-pitch-angle-th-b-and-angle-of_fig5_352136342

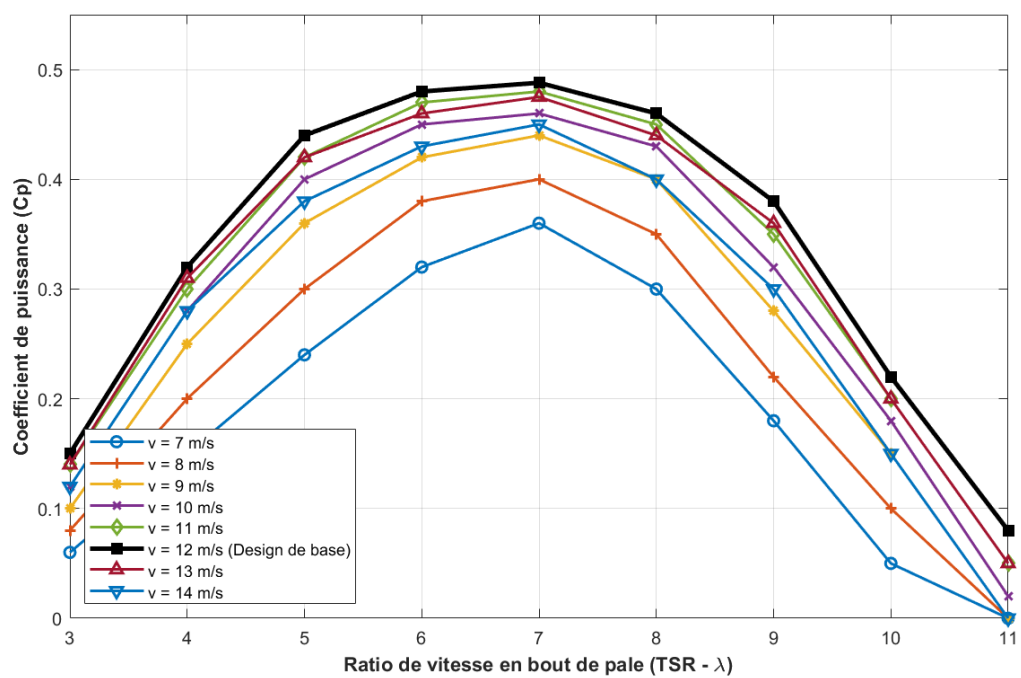
Annexes :


 $V_v = 7 \text{ m/s}$

 $V_v = 8 \text{ m/s}$

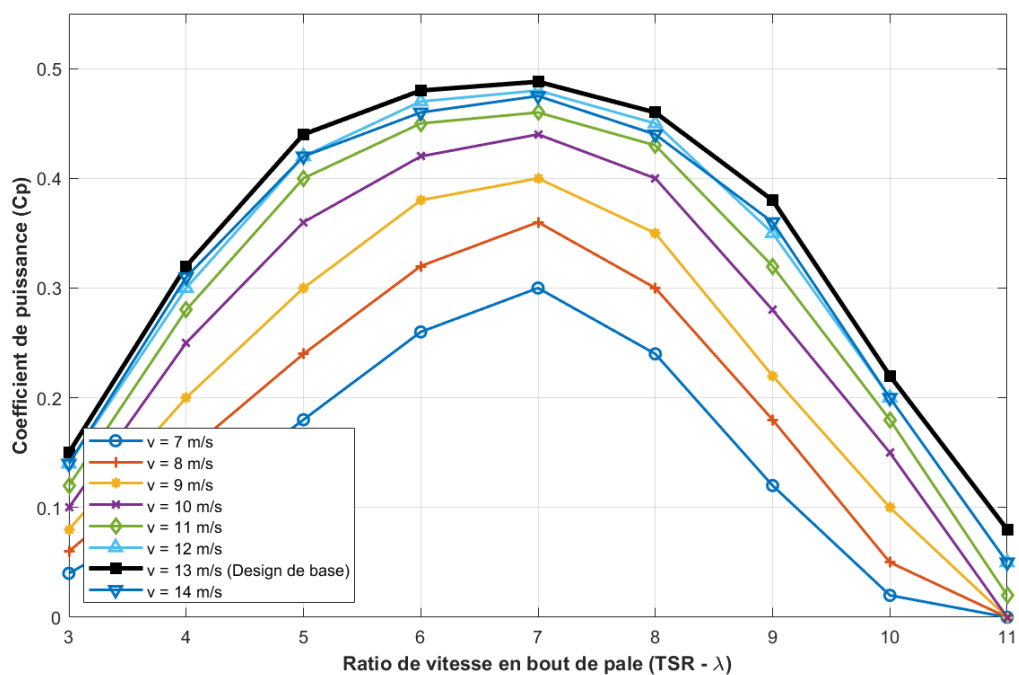
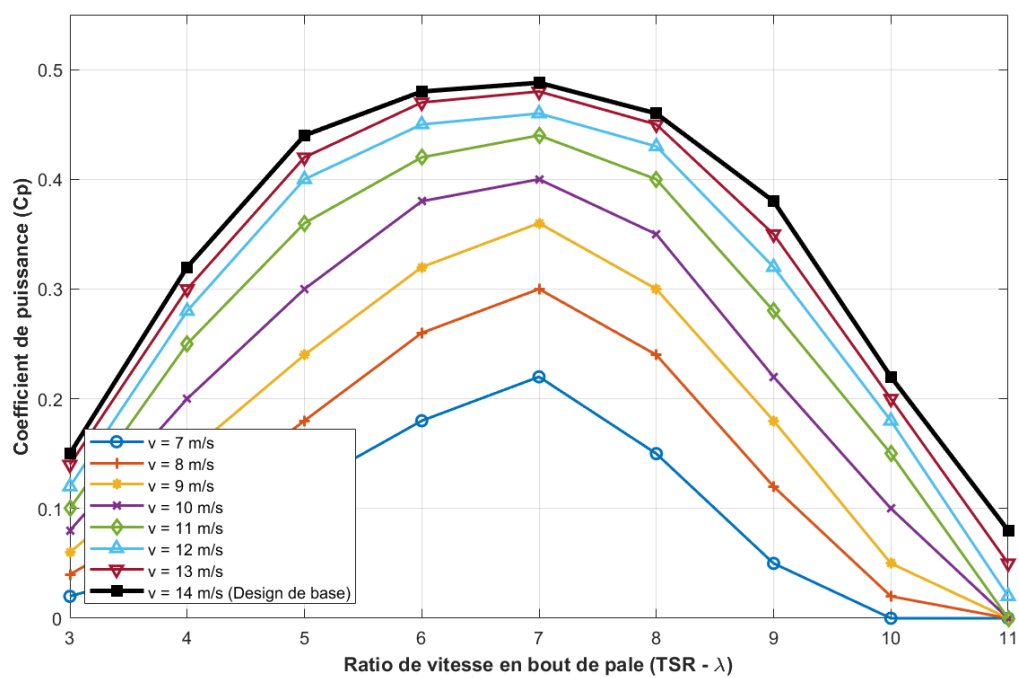

 $V_v = 9$ m/s

 $V_v = 10$ m/s



$V_v = 11$ m/s



$V_v = 12$ m/s


 $V_v = 13$ m/s

 $V_v = 14$ m/s

La corde :

Pour la figure 5 :

Numéro d'éléments	Rayon	Corde V=7	Corde V=8	Corde V=9	Corde V=10	Corde V=11	Corde V=12	Corde V=13	Corde V=14
1	0,147	0,194	0,188	0,182	0,176	0,17	0,164	0,158	0,152
2	0,206	0,181	0,175	0,169	0,163	0,157	0,151	0,145	0,139
3	0,265	0,167	0,161	0,155	0,149	0,143	0,138	0,133	0,128
4	0,324	0,145	0,14	0,139	0,134	0,129	0,124	0,119	0,114
5	0,383	0,133	0,128	0,123	0,118	0,114	0,11	0,106	0,102
6	0,441	0,116	0,112	0,108	0,104	0,1	0,096	0,092	0,088
7	0,5	0,102	0,098	0,094	0,09	0,086	0,083	0,08	0,077
8	0,559	0,087	0,084	0,081	0,078	0,075	0,072	0,069	0,066
9	0,618	0,075	0,072	0,069	0,066	0,064	0,062	0,06	0,058
10	0,676	0,065	0,062	0,059	0,056	0,054	0,052	0,05	0,048
11	0,735	0,055	0,053	0,051	0,049	0,047	0,045	0,043	0,041
12	0,794	0,048	0,046	0,044	0,042	0,041	0,04	0,039	0,038
13	0,853	0,04	0,039	0,038	0,037	0,036	0,035	0,034	0,033
14	0,912	0,035	0,034	0,033	0,032	0,031	0,03	0,03	0,03
15	0,971	0,032	0,031	0,03	0,029	0,03	0,03	0,03	0,03

L'angle de vrillage :

Pour la figure 6 :

Numéro d'éléments	Rayon	Twist V=7	Twist V=8	Twist V=9	Twist V=10	Twist V=11	Twist V=12	Twist V=13	Twist V=14
1	0,147	22,2	21,5	20,8	20	19,2	18,5	17,8	17,1
2	0,206	18,4	17,8	17,2	16,5	15,8	15,1	14,4	13,7
3	0,265	14,7	14,2	13,7	13,1	12,5	11,9	11,3	10,7
4	0,324	11,4	10,9	10,4	9,9	9,4	8,9	8,4	7,9
5	0,383	8,8	8,4	8	7,5	7,1	6,7	6,3	5,9
6	0,441	6,6	6,2	5,8	5,4	5	4,6	4,2	3,8
7	0,5	4,8	4,5	4,2	3,9	3,6	3,3	3	2,7
8	0,559	3,3	3	2,7	2,4	2,1	1,8	1,5	1,2
9	0,618	2,1	1,8	1,5	1,2	0,9	0,6	0,3	0
10	0,676	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1	-0,1	-0,3	-0,5
11	0,735	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1	-1,2	-1,4
12	0,794	-0,7	-0,9	-1,1	-1,3	-1,5	-1,7	-1,9	-2,1
13	0,853	-1,3	-1,5	-1,7	-1,9	-2,1	-2,3	-2,5	-2,7
14	0,912	-1,8	-2	-2,2	-2,4	-2,6	-2,8	-3	-3,2
15	0,971	-2,2	-2,4	-2,6	-2,8	-3	-3,2	-3,4	-3,6

Pour la figure 11 :

V	CP_m	Écart type
7	0,3735	0,1192
8	0,410375	0,0937
9	0,435375	0,068
10	0,449125	0,043
11	0,450375	0,042
12	0,444125	0,044
13	0,425375	0,067
14	0,3935	0,095

Programme :**blade_deopt.m**

```
function [blade, best_blade, data] = blade_deopt(data)
tic;% record start time
creator;% run creator script to generate initial population
perc_in = 0.05;% The reporting interval (percentage)
percent = int8(double(data.no_gen)*perc_in);
fid = fopen(data.fitfile,'w'); %Open output file for fittest blades
disp(' gen.    Max. Cp for blade Min. Start Time for blade')

% calculate fitness of initial population
blade.fitness = survival(data,chord,twist);
% adjust fitness for poor performing blades
index = find(blade.fitness(:,2) < data.Cp_min);
if (~isempty(index))
    blade.fitness(index,2) = 0;
end

% evolve blade population over no_gen generations
for i=1:data.no_gen
    % Find the fittest members of the current population
    [i_max_fit, max_fit, blade,data] = fittest(i,data,blade);
    data.max_fit(i,:) = max_fit;
    if (mod(i,percent)==0)% If timeto report....
        fprintf('%5.1f%% complete,    non-dominated; %5.1f%%    Unfit; %5.1f%%\n',...
            100.0*i/data.no_gen,100*data.no_nondom/data.no_indiv,data.no_unfit/data.no_indiv*100)
        disp(' gen.    Max. Cp for blade Min. Start Time    for blade')
        for j=1:data.no_indiv
            if (~blade.dom(j))
                fprintf(fid,'%12i %12.7f %12.7f\n',j, blade.fitness(j,1), blade.fitness(j,2));
            end
        end
    end

end

if i< data.no_gen % breed population, except for last gen
    [blade, data] = breed(i, i_max_fit, max_fit,data,blade);
end

end

fclose(fid); % close file for fittest blades

index = find(blade.dom==0);
% Find the 'best' blade by averaging dominant blades
lindex=length(index);
if lindex >= 1
    fprintf('\n %3i blades are non-dominated \n \n', length(index))
    best_blade.chord = blade.chord(index,:);
    best_blade.twist = blade.twist(index,:);
elseif isempty(index)
    fprintf(' No blades are non-dominated \n')
end

% prepare to output average of non-dominated blades
best_blade.chord(lindex+1,:)=mean(best_blade.chord);
best_blade.twist(lindex+1,:)=mean(best_blade.twist);
for i = 1:lindex+1
    if (i <= lindex)
        fprintf(' For blade number %5i \n', index(i));
```

```
        iprint = 0;
    else
        fprintf(' For the average of the non-dominated blades \n');
        iprint=1;
    end
    best_blade.fitness(i,1)=power_calc_opt(data,best_blade.chord(i,:),best_blade.twist(i,:),iprint);
    J = inertia(best_blade.chord(i,:),best_blade.twist(i,:),data);
    delt = min(data.t_max/50, 0.25);
    best_blade.fitness(i,2)=start_calc_opt(data,best_blade.chord(i,:),best_blade.twist(i,:),J, delt);
    fprintf(' Cp = %5.3f, Starting time = %6.3f seconds \n',best_blade.fitness(i,1), best_blade.fitness(i,2))
    fprintf('\n  radius  chord  twist \n');
    out=[data.rad' best_blade.chord(i,:) best_blade.twist(i,:)'];
    disp(out)
end
disp(' ');
fprintf('Computation time: %g seconds \n',toc);
end %function blade_deopt.m
```

blade_opt_setup.m

```

function [data] = blade_opt_setup(custom_length)
% This function sets up the data structure "data" for use with
% blade_deopt
% PARAMETERS for the evolutionary optimisation
% data.no_indiv number of members of each generation, should be 1000 or more
data.no_indiv=2000;
% data.no_gen number of generation to evolve over
data.no_gen=100;
% data.crossover crossover probability for breeding new blades
data.crossover=0.1;
% data.max_age age at which blades "die", i.e. are removed from the population
data.max_age=20;
% Aerofoil parameters
% data.num_re number of values of Reynolds number in data file.
data.num_re=6;
% data.num_alpha number of values of angle of attack at each Re.
data.num_alpha = 23;
% data.re_array array holding the Reynolds numbers.
data.re_array = [100000 150000 200000 300000 400000 500000];
% data.re_log array holding the log of the Reynolds numbers
data.re_log=log(data.re_array);
% data.alpha_array array holding the angles of attack.
aerofoil_in = load('sg6043spline.in');
% data.cl_array, data.cd_array arrays holding lift and drag coefficients.
data.alpha=zeros(data.num_alpha,1);
data.cl_array=zeros(data.num_alpha,data.num_re);
data.cd_array=zeros(data.num_alpha,data.num_re);
for i=1:data.num_alpha
    data.alpha(i)=aerofoil_in(i,1);
    data.cl_array(i,:)=aerofoil_in(i,2:data.num_re+1);
    data.cd_array(i,:)=aerofoil_in(i+data.num_alpha,2:data.num_re+1);
end
% data.del_alpha angle between successive Cl and Cd values
data.del_alpha=data.alpha(2)-data.alpha(1);
% data.numb number of blades
data.numb=3;
% data.area (aerofoil cross-sectional area)/c^2
data.area=0.07894;
% data.rho_blade blade density (kg/m^3)
data.rho_blade=550;
% data.no_genes number of genes (blade elements) per blade
data.no_genes=15;
% data.u_start wind speed (m/s) for the starting calculation
data.u_start=5.0;
% data.u_power wind speed (m/s) for the power extraction calculation
data.u_power=7.0;
% data.lambda_start the tip speed ratio (TSR) to "complete" starting
data.lambda_start=1.0;
% data.Cp_min allowable Cp
data.Cp_min=0.1;
% data.t_max maximum time allowed for starting, determined in program
data.t_max=200;
% data.lambda_power TSR for power extraction
data.lambda_power=6.10;
% data.r_tip blade tip radius (m)

```

```
data.r_tip=1.06;
% data.r_hub (hub radius)/r_tip
data.r_hub=0.125;
% data.max_chord maximum chord on blade
data.max_chord=0.2;
% data.min_chord minimum chord on blade
data.min_chord=0.03;
% data.max_twist maximum blade twist (in degrees)
data.max_twist=25;
% data.min_twist minimum blade twist (in degrees)
data.min_twist=-5;
% data.J_gen contribution to moment of inertia from generator & drive train
data.J_gen=0.006;
% data.tor_resis resistive torque of generator and drive train (Nm)
data.tor_resis=0.0;
% data.a_power_in factor (<= 1) to scale fitness score for power
data.a_power_in=0.7;
% data.non_dom index of non dominated blades
data.non_dom=1;
% data.unfit index of unfit blades
data.unfit=1;
% data.dominated index of dominated blades
data.dominated=2;
% data.no_nondom number of non dominated blades
data.no_nondom=0;
% data.no_unfit number of unfit blades
data.no_unfit=0;
% data.no_dom number of dominated blades
data.no_dom=0;
% data.delr difference between consecutive blade elements
data.delr=(data.r_tip - data.r_hub)/data.no_genes;
% data.rad radius of each blade element
data.rad=data.r_hub+0.5*data.delr:data.delr:data.r_tip-0.5*data.delr;
data.rad=data.rad./data.r_tip;
data.maxchord = zeros(1,data.no_genes); data.maxtwist = zeros(1,data.no_genes)
% data.fitfile String containing the file name to output the fittest blades to.
data.fitfile='fit_blade_out.dat';
%
```

Inertia.m

```
function J = inertia(chord,twist,data)

% Area area of blade aerofoil (no units)
% rho_blade density of blade material (kg m^-3)

Area = data.area;
A2 = Area^2;
J1 = sum((chord.*data.rad).^2);
J2 = sum((cosd(twist).^2) .* (chord.^4)) + A2*sum((sind(twist).^2) .* (chord.^4));
% Convert to dimensioned torque and add drive train + generator contribution
J = data.numb*data.delr*data.rho_blade*Area*data.r_tip^5*(J1 + J2/12) + data.J_gen;
end
```

Start_calc_opt.m

```
function time_to_start = start_calc_opt(data,chord, twist, J, delt)

% Determine the two constants (c1, c2) in the equation for
% d(lambda)/dt

tw_rad = pi/180*twist; % Twist must be in radians for starting calcs

% constant terms in front of equation 4.8
c1 = 1.2*data.numb*data.u_start^2*data.r_tip^3*data.delr;
% constant terms in front of equation 4.9
c2 = data.r_tip/(J*data.u_start);
lambda = 0.0; time = 0.0;
Fn_3=0.0; Fn_2=0.0; Fn_1=0.0;

while (1) % Use Adams Moulton for integration
    fn_0 = deriv(chord, tw_rad, lambda, data);
    Fn_0 = c2*(c1*fn_0 - data.tor_resis);
    lam_pred=lambda + delt*(55*Fn_0-59*Fn_1+37*Fn_2-9*Fn_3)/24;
    fp_1 = deriv(chord, tw_rad, lam_pred, data);
    Fp_1 = c2*(c1*fp_1 - data.tor_resis);
    del_l = delt*(9*Fp_1+19*Fn_0-5*Fn_1+Fn_2)/24;
    if (lambda + del_l > data.lambda_start)
        time_to_start = time + delt*(data.lambda_start - lambda)/del_l;
        return
    end
    lambda = lambda + del_l;
    time = time + delt ;
    if (time > data.t_max) % Penalise slow blades
        time_to_start = 5.5*data.t_max + 1.0 ;
        return
    end
    if (fp_1 < -1)
        time_to_start = 4.5*data.t_max + 1.0;
        return
    end
    if (fp_1 < 0.0 | lambda < 0)
        time_to_start = 3.5*data.t_max + 1.0;
        return
    end
    Fn_3=Fn_2;
    Fn_2=Fn_1;
    Fn_1=Fn_0;
end
end %start_calc
```