

# Eolienne urbaine à pales annulaires

Jacky BRESSON, Didier DUCLOS, Fabrice FRUGIER

IUT de Perpignan, département G.I.M.

Ch. de la Passio Vella, BP 79905 - 66962 PERPIGNAN Cédex 9

E.mail : [bresson@univ-perp.fr](mailto:bresson@univ-perp.fr)

Site internet : <http://gim.iut.univ-perp.fr>

**THEMATIQUE – Energie – Environnement – 60<sup>ième</sup> section.**

**RESUME** – La plupart des éoliennes à axe horizontal sont constituées de pales planes de longueur finie. Cela induit des « tourbillons marginaux » en bout de pales similaires à ceux qui existent en bout d'ailes d'avion. Les performances de l'éolienne sont d'autant plus pénalisées que ces tourbillons sont importants. Pour minimiser ces turbulences, nous proposons un rotor constitué de pales enroulées sur elles-mêmes ou pales annulaires. Ainsi un rotor de 6 pales annulaires peut être considéré comme constitué de 12 pales courbes dont on a repoussé le bout de pale vers l'infini. Les avantages d'un tel rotor sont un meilleur coefficient de puissance donc une meilleure conversion de la puissance du vent, moins de turbulences à l'arrière de l'éolienne, un niveau de bruit plus faible.

*Mots-clés – Eolienne à axe horizontal, pales annulaires, éolienne urbaine, méthode BEM.*

## 1. INTRODUCTION

Les étudiants de l'Institut Universitaire de Technologie engagés dans le concours national Gim'Eole<sup>1</sup> ont mené une étude sur une éolienne urbaine à pales annulaires.

Les premiers développements autour de ce concept datent des années 1906 avec la mise en œuvre de la plus ancienne aile en anneau sur le Blériot III construit par Louis Blériot et Gabriel Voisin. Par la suite, des études ont été menées par la Snecma avec le C-457 « Coléoptère » premier avion français à décollage vertical en 1957 et par H.S. Fletcher [1] et L. Demasi [2]. L'objectif principal de ces études était de minimiser les « tourbillons marginaux » de bout d'aile générés par l'air qui passe directement de l'intrados à l'extrados. Ainsi en enroulant l'aile sur elle-même, le bout de l'aile est repoussé vers l'infini, la traînée minimisée et les performances aérodynamiques augmentées. Toutes ces applications concernaient exclusivement les ailes d'avions.

Nous proposons d'appliquer ce concept aux pales d'une éolienne à axe horizontal (fig.1). Le rotor de cette éolienne sous le vent (800mm de diamètre) est constitué de 6 pales annulaires (300mm de diamètre, 70mm de large et 8mm d'épaisseur). La pale est profilée sur le demi-périmètre extérieur et intérieur pour augmenter la portance. Le profil utilisé est asymétrique de type N-11.

<sup>1</sup> Concours national Gim'Eole « Les éoliennes urbaines » – Villeurbanne 2014 et 2015.



Fig.1 Eolienne sous le vent à pales annulaires

L'étude sera menée tant d'un point de vue théorique qu'expérimental.

## 2. ETUDE THEORIQUE

Le modèle retenu est basé sur la méthode tourbillonnaire ou BEM (Blade Element Momentum) qui consiste à combiner la théorie de l'aile portante avec la loi de la conservation de la quantité de mouvement [3-4].

### 2.1. Théorie de BETZ

Cette théorie suppose que l'éolienne est placée dans un air animé à l'infini d'une vitesse amont  $V_1$  et à l'aval d'une vitesse  $V_2$  (fig.2).

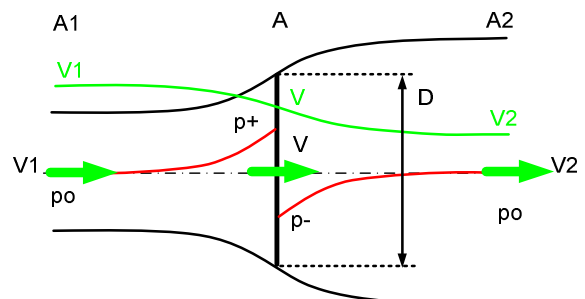


Fig.2 Disque perméable et tube de courant



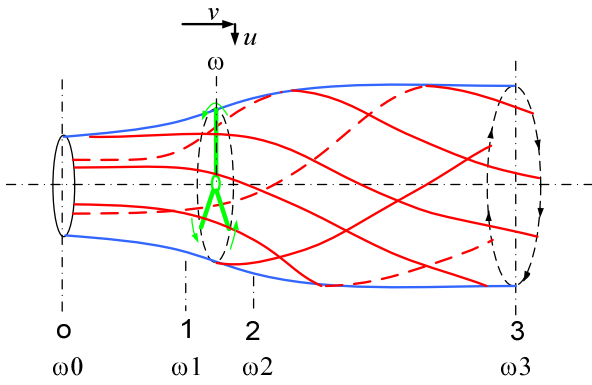


Fig.6 Rotation en aval de la veine d'air

Le couple généré dans la section annulaire devient :

$$dQ = dF_{tang} r = 4\pi\rho V\omega r^3 dr \quad (13)$$

$$dQ = 4\pi\rho V_1(1-a)b\Omega r^3 dr$$

La puissance est donc :

$$dP = dQ\Omega = 4\pi\rho V\omega\Omega r^3 dr \quad (14)$$

$$dP = 4\pi\rho V_1(1-a)b\Omega^2 r^3 dr$$

Que l'on peut mettre aussi sous la forme suivante :

$$dP = \left(\frac{1}{2}\rho\pi R^2 V_1^3\right) \left(\frac{8\lambda_o^2}{R^4}(1-a)b.r^3 dr\right) \quad (15)$$

Où le terme de droite n'est autre que le coefficient de puissance dCp :

$$dCp = \frac{8\lambda_o^2}{R^4}(1-a)b.r^3 dr \quad (16)$$

Pour déterminer dF<sub>axial</sub>, dF<sub>tang</sub>, dQ, dP et dCp, il faut connaître les coefficients a et b. Pour cela en posant :

$$dr = dl \cos(\theta) = \frac{D}{2} \cos(\theta) d\theta \quad (17)$$

$$\tan\phi = \frac{V_1(1-a)}{\Omega r(1+b)} \text{ et } \sigma = \frac{pc}{2\pi r}$$

Le coefficient d'induction axial a s'obtient en égalant les relations (5) et (10) :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi \cos \theta}{\sigma[\text{terme\_A}][\text{terme\_B}] + 1}} \quad (18)$$

En faisant de même avec les relations (11) et (12), on obtient le coefficient d'induction tangentiel b :

$$b = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi \cos \theta}{\sigma[\text{terme\_A}][\text{terme\_C}] - 1}} \quad (19)$$

La détermination des coefficients a et b nécessite la connaissance de l'angle φ (équa.17) qui lui-même dépend de a et b. Seule une méthode itérative convergente permet d'accéder aux valeurs de a et b.

F<sub>axial</sub>, F<sub>tang</sub>, Q, P et Cp s'obtiennent en intégrant les relations (5), (13), (14), (15) et (16) depuis le pied de pale (rp) jusqu'au bout de pale (R).

## 2.4. Les résultats de la modélisation

Pour les calculs des forces aérodynamiques nous utilisons les coefficients de portance et de traînée du profil N-11 issus du logiciel QBlade v0.8 (fig.7).

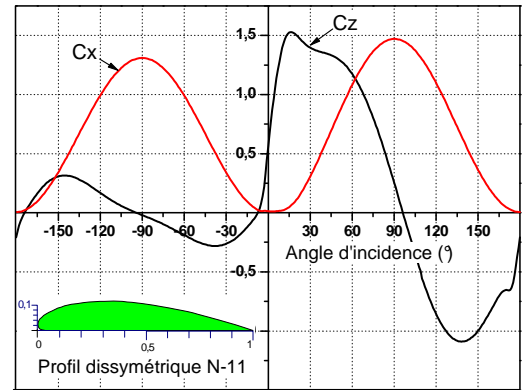


Fig.7 Coefficients de portance Cz et de traînée Cx pour le profil N-11.

La figure 8 décrit l'algorithme de calcul programmé en Visual Basic sous Excel. Ce langage simple interfacé avec Excel permet un accès rapide aux résultats sous forme graphique.

La boucle la plus interne restitue, après convergence, les coefficients a et b et permet de déterminer dF<sub>axial</sub>, dQ, dP et dCp pour chaque position de l'élément de pale. L'intégration se fait en cumulant ces résultats depuis rp jusqu'à R (de θ = -90° à +90°). La boucle la plus externe réitère le calcul pour plusieurs valeurs de la vitesse du vent V1.

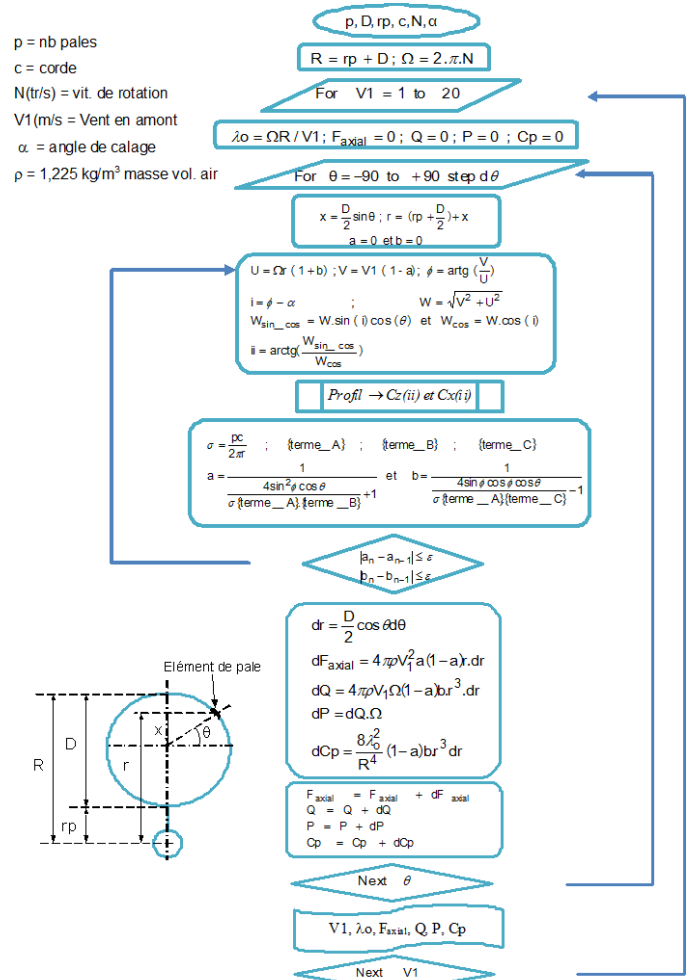


Fig.8 Algorithme de calcul

L'exploitation de ce programme nous a notamment permis de rechercher l'inclinaison optimale des pales annulaires. Pour l'angle de calage  $\alpha=28^\circ$ , le coefficient de puissance  $C_p$  est maximal et vaut 0,35 pour  $\lambda_o=1,5$ .

Pour plusieurs valeurs de la vitesse du vent  $V_1$  et de la vitesse de rotation du rotor  $N$ , on obtient l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda_o$  (fig.9).

$$\lambda_o = \frac{U_o}{V_1} = \frac{2\pi NR}{V_1} \quad (20)$$

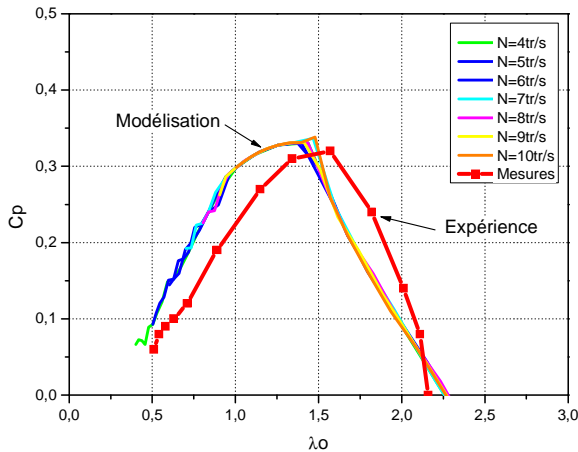


Fig.9  $C_p$  en fonction de  $\lambda_o$  pour plusieurs vitesses de rotation  $N$  (tr/s) et pour l'angle de calage optimum  $\alpha=28^\circ$ .

La figure 10 présente les forces, couple et puissance élémentaires induits sur l'élément de pale par le vent. La puissance maximale est obtenue à environ 2/3 de la pale annulaire. Les forces aérodynamiques étant dans le plan de rotation au pied de pale ( $r=0,1m$ ) et à l'extrémité de la pale ( $r=0,4$ ), le couple et la puissance développés sont nuls.

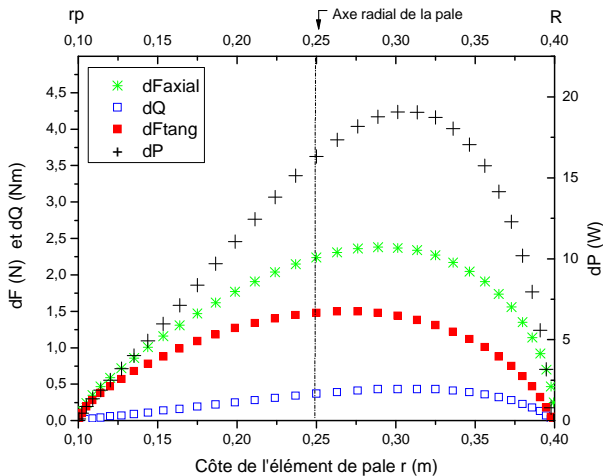


Fig.10 Composantes élémentaires sur l'élément de pale ( $V_1=15m/s$ ,  $N=7tr/s$  et  $\alpha=28^\circ$ ).

### 3. ETUDE EXPERIMENTALE

Pour valider les résultats précédents, des mesures en soufflerie sont nécessaires. La puissance récupérée par le rotor de l'éolienne est égale à :

$$P_{rotor} = C_p \cdot P_{vent} = C_p \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (21)$$

La puissance électrique, sur la charge vaut :

$$P_{elec} = \eta_{elec} P_{rotor} = U_e I_e \quad (22)$$

Où  $\eta_{elec} = 0,7$  : rendement génératrice/redresseur estimé.

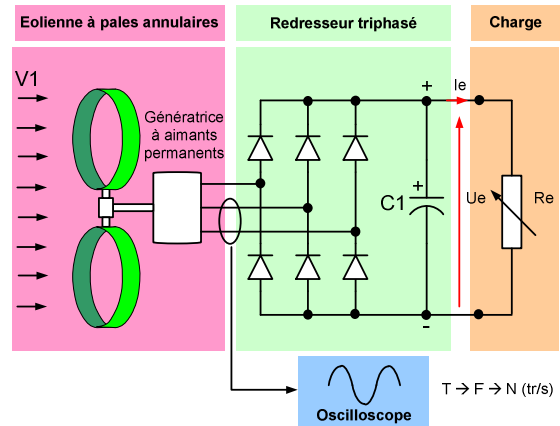


Fig.11 Synoptique du montage expérimental

Ainsi, pour une vitesse de vent  $V_1$  constante, la puissance électrique  $P_{elec}$  et la vitesse de rotation  $N$  (tr/s) du rotor dépendent du couple électromagnétique c'est-à-dire de la résistance de charge  $Re$  (fig.11). On peut donc tracer l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  mesuré en fonction de  $\lambda_o$  (fig. 9).

Sur cette même figure, on peut noter une légère différence entre les résultats issus du modèle et ceux de l'expérimentation. Ceci est dû essentiellement aux hypothèses simplificatrices prises dans la théorie tourbillonnaire.

### 4. CONCLUSION

Un nouveau concept d'éolienne à pales annulaires est présenté. Cette pale, enroulée sur elle-même, ne génère théoriquement plus de « tourbillons marginaux » liés à l'extrémité de pale puisqu'il n'y a plus de bout de pale.

L'approche théorique basée sur la méthode classique BEM a permis de trouver l'angle optimum d'inclinaison des pales  $\alpha=28^\circ$  qui assure un coefficient de puissance maximum de 0,35.

Des mesures réalisées en soufflerie ont permis de confirmer cette approche théorique.

### 5. REFERENCES

- [1] Herman S. Fletcher « Experimental investigation of lift, drag and pitching moment of five annular airfoils » Technical note 4117 – National Advisory- 1957.
- [2] Luciano Demasi « Aerodynamic analysis of non-conventional wing configurations for aeroelastic applications » PhD – Politecnico di Torino march 2004.
- [3] Désiré Le Gourières « Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations » Eyrolles- 1980.
- [4] Søren Gundtoft « Wind turbines » University College of Aarhus - June 2009..