Université de Franche-Comté
www.univ-fcomte.fr

Année 2012

MASTER

Mémoire

Présenté à

L'Université de Franche-Comté

Pour obtenir le diplôme

Master
SCIENCES, TECHNOLOGIES, SANTE

Mention
SCIENCES POUR L'INGENIEUR

Spécialité
MECANIQUE ET INGENIERIES

Etude numérique d'une éolienne Savonius double

Par

Pauline BUTAUD

Encadré par

Aurélien BESNARD

Soutenu le 2 juillet 2012 devant le jury :

- Emeline SADOULET-REBOUL
- Manuel COLLET
- Scott COGAN

Remerciements

A l'issue de ce stage, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont coopéré, de près ou de loin, à sa réalisation.

Je remercie particulièrement Aurélien Besnard pour m'avoir accueillie au LaBoMaP, orientée durant mon stage, pour sa sympathie, ses idées et ses conseils précieux.

Je remercie également Michel Maya et Thibaud Marcel pour leur collaboration sur ce projet et le temps consacré à répondre à mes diverses questions, Annie-Claude Bayeul-Lainé pour la formation et les conseils sur le logiciel Star-CCM+, Jean-Claude Butaud pour ses multiples interrogations sur le sujet qui ont contribué à la bonne avancée du projet, et enfin toute l'équipe ENSAM Cluny pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur.

A Cluny le 7 juin 2012

Pauline BUTAUD

Sommaire

1 Introduction **9**

1.1 Laboratoire d'accueil 9

1.2 Projet 10

2 Etat de l'art **11**

2.1 Présentation 11

2.2 Paramètres étudiés 12

2.3 Optimisation 13

2.3.1 Recouvrement 13

2.3.2 Aube 14

2.3.3 Convergent 15

2.3.4 Interaction 15

2.4 Conclusion 16

3 Paramètres de simulation **17**

3.1 Présentation CD-adapco (Star-CCM+) 17

3.2 Maillage 17

3.3 Domaine 18

3.4 Modèle 18

3.5 Pas de temps 18

3.6 Nombre de tours 19

3.7 Conclusion 19

4 Savonius simple **21**

4.1 Étude statique 21

4.2 Étude dynamique 23

4.2.1 Rendement 23

4.2.2 Moments 23

4.3 Conclusion 24

5 Savonius double **25**

5.1 Modèles d'origine 25

5.1.1 M2 25

5.1.2 Spock et Spock2 26

5.1.3 Hibou et Canoë 26

5.1.4 Résultats 27

5.1.5 Explication 29

5.2 Évolution 29

5.2.1 Wolf et Toucan 29

5.2.2 Résultats 30

5.2.3 Optimisation 31

5.3 Conclusion 31

6 Conclusion **33**

A Recouvrement **35**

B Choix des paramètres de simulation **37**

C Effet Magnus **39**

Table des figures

1.1 Éolienne Savonius double [Michel Maya & Gaio Angelo] 10

2.1 Éolienne à axe vertical Savonius [Martin 87] 11

2.2 Courbes caractéristiques des éoliennes les plus courantes [Whalley 09] 12

2.3 Schéma d'un rotor Savonius [Menet 04] 13

2.4 Profil établi par Kamoji 14

2.5 Profil établi par Mohamed 14

2.6 Schéma du convergent [Altan 08] 15

2.7 Formations de Savonius 15

3.1 A gauche le maillage du domaine, à droite un zoom sur la Savonius . 19

4.1 Orientation du vent 21

4.2 Moment en fonction de l'angle de rotation, calcul statique 22

4.3 Coefficient de puissance C_p d'une Savonius simple 23

4.4 Moment en fonction de l'angle de rotation, calcul dynamique 24

5.1 Eolienne double de Michel Maya, M2 25

5.2 Eoliennes doubles Spock et Spock2 26

5.3 Eoliennes doubles Canoë et Hibou 27

5.4 Rendement de l'éolienne double M2 27

5.5 Comparaison des modèles doubles par rapport à la Savonius simple . 28

5.6 Vecteurs vitesse pour l'éolienne M2 29

5.7 Lignes de courant des éoliennes Toucan et Wolf 30

5.8 Comparaison entre la simple, Toucan et Wolf 30

5.9 Comparaison entre la simple et interaction entre deux Savonius . . . 31

A.1 Comparaison du rendement pour différents recouvrements 35

B.1 Évolution de l'erreur en fonction du nombre de tours 37

C.1 Distribution des pressions pour un cylindre fixe (à gauche) ou un cylindre en rotation (à droite) 39

Chapitre 1

Introduction

1.1 Laboratoire d'accueil

Créé depuis 1993, le LaBoMaP est Equipe d'Accueil (EA 3633) depuis 2002 et membre de la Fédération de Recherche (FR 2604) « Mathématiques, Matière, Matériaux » depuis 2007. Le laboratoire est présent sur 2 sites : le centre Arts et Métiers ParisTech de Cluny et l'ECAM de Lyon. Il comprend une quarantaine de personnes : 14 enseignants-chercheurs, 3 PRAG, 6 ingénieurs d'étude, 2 techniciens, 11 doctorants et 4 chercheurs post-doctorants. Les recherches développées au sein du LaBoMaP ont trait à l'étude des procédés de fabrication, par enlèvement de matière en particulier, et leurs relations avec les matériaux. Ces recherches font largement appel à l'expérimentation et concernent majoritairement :

- l'usinage de matériaux métalliques ou ligneux difficiles à mettre en œuvre ;
- la réalisation de surfaces complexes par opérations de coupe ;
- le contrôle en ligne des procédés associés (tournage, fraisage, déroulage...) ;
- l'élaboration et la caractérisation de composites bois, de métaux et alliages pour une meilleure intégrité de la matière ;
- l'amélioration des propriétés mécaniques superficielles des métaux et alliages par traitements thermochimiques ou revêtement.

1.2 Projet

L'origine du projet *Savonius* est une demande de l'entreprise CITA Production qui souhaitait déterminer le rendement de leurs éoliennes. Un Projet Métier Élèves a été mis en place dans la filière "Énergies du Futur" de l'ENSAM encadré par Michel Maya et Aurélien Besnard. Un semestre fut consacré à l'élaboration des éoliennes et un deuxième à l'instrumentation de celles-ci en vue de récolter des données expérimentales. L'objet du stage master était d'étudier avec le logiciel Star-CCM+ une possible optimisation de ces éoliennes verticales. La première étape est une étude bibliographique sur le sujet, puis une Savonius simple est modéliser d' afin de prendre en main le logiciel et déterminer les paramètres de simulation, et enfin des calculs sont sur des Savonius doubles (cf. Fig. 1.1).

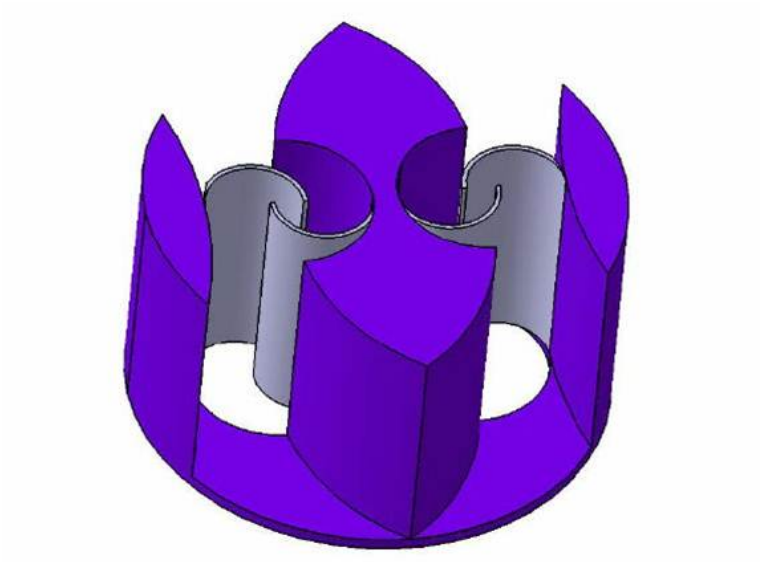

Figure 1.1 – Éolienne Savonius double [Michel Maya & Gaio Angelo]

Chapitre 2

Etat de l'art

2.1 Présentation

La demande d'énergie éolienne a augmentée de façon exponentielle ces dernières années dans l'objectif de réduire les émissions de CO2. Jusqu'à maintenant les éoliennes de type tripale ont joué un rôle de premier plan, néanmoins la production d'énergie verte concerne tout aussi bien les villes. L'éolienne à axe horizontal, source de bruit à basse fréquence, nécessitant un vent puissant et constant n'est pas adapté en milieu urbain. Au contraire, les éoliennes à axe vertical (VAWT) s'intègre parfaitement, d'où l'expansion récente de leur utilisation en zone urbaine. Parmi les VAWT le rotor Savonius est connu pour être le plus silencieux et démarre facilement à faible vent. Son fonctionnement et sa fabrication sont des plus élémentaires (cf. Fig. 2.1). Plusieurs études ont donc été menées pour améliorer le rendement de ces éoliennes.

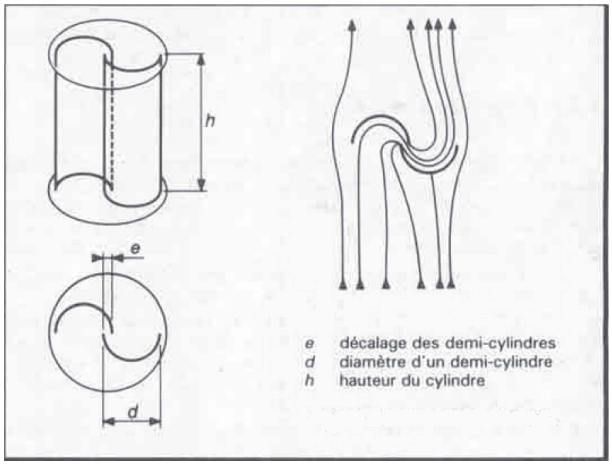

FIGURE 2.1 – Éolienne à axe vertical Savonius [Martin 87]

2.2 Paramètres étudiés

Le paramètre usuel pour déterminer les performances d'une éolienne est le coefficient de puissance C_p définit par :

$$C_p = \frac{2C\omega}{\rho S v^3} \tag{2.1}$$

avec
- ω la rotation en rad/s de l'éolienne
- C le moment du rotor
- ρ la masse volumique de l'air
- S la surface interceptée par le fluide
- v la vitesse du vent

C_p est le rapport entre la puissance du rotor et la puissance du vent. Il est tracé en fonction du rapport des vitesses λ définit par :

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \tag{2.2}$$

avec R le rayon de l'éolienne.

Le rotor Savonius a un coefficient de puissance d'environ 20% contre plus de 40% pour la tripale conventionnelle (cf. Fig. 2.2).

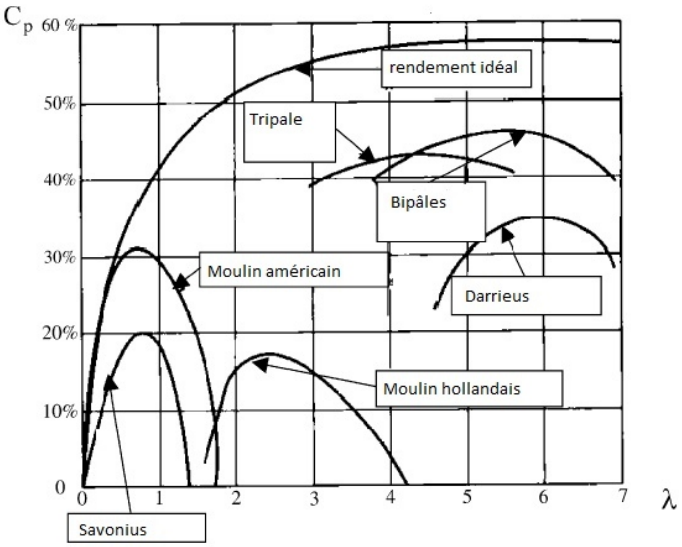

Figure 2.2 – Courbes caractéristiques des éoliennes les plus courantes [Whalley 09]

Cependant, le paramètre L-σ apporte une autre vision des choses [Menet 04]. Il s'agit ici de comparer la puissance linéique $P_{/L}$ des éoliennes définit par :

$$P_{/L} = \frac{P}{L} = \frac{C\omega}{L} \tag{2.3}$$

avec P la puissance du rotor et L la hauteur du rotor.

$P_{/L}$ correspond à la puissance fournie par mètre linéaire de vent intercepté par l'éolienne. Si pour une éolienne à axe horizontal la puissance est imposée par la valeur du point de fonctionnement nominal (rendement maximal sur les courbes (cf. Fig. 2.2)), pour une éolienne Savonius au contraire, la puissance est directement liée à sa hauteur. Basé sur $L-\sigma$, prenant en compte la contrainte maximale à laquelle la pâle peut être soumise, la puissance du rotor Savonius est 2,75 fois plus importante que celle de l'éolienne tripale [Menet 01].
Le critère C_p reste le plus utilisé pour les études sur les Savonius, il sera donc le seul pris en compte par la suite pour juger de la performance des éoliennes testées.

2.3 Optimisation

2.3.1 Recouvrement

Le recouvrement définit par $\frac{e}{d}$ (cf. Fig. 2.3) a été l'objet de nombreuses études afin d'améliorer le rendement de l'éolienne Savonius. D'après Fujisawa le rendement optimal est de 0.15 [Fujisawa 92], Blackwell annonce une fourchette de 0.1 à 0.15 [Blackwell 77], Menet calcule 0.242 [Menet 01] et dernièrement Akwa propose 0.15 [Akwa 12]. Les résultats sont multiples. Cependant plusieurs études s'accordent sur un recouvrement optimal de 0.15 et c'est donc cette valeur qui sera prise pour le projet (cf. annexe A).

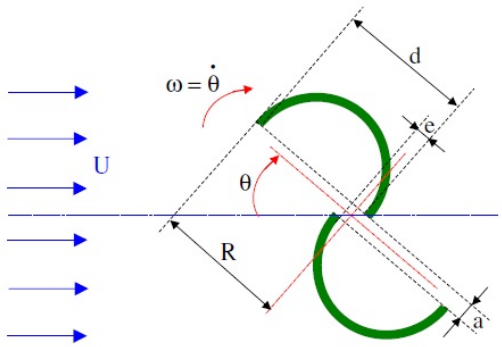

Figure 2.3 – Schéma d'un rotor Savonius [Menet 04]

2.3.2 Aube

Des études portent à la fois sur le nombre d'aubes optimal mais aussi sur leur forme. Il s'avère que le rendement d'une Savonius décroit avec le nombre d'aubes ajoutées, en effet une Savonius avec trois aubes a une puissance moindre qu'une Savonius avec seulement deux aubes [Saha 08]. D'autres études ont été conduites sur ce point [Ross 11] et toutes s'accordent sur un nombre optimal de deux aubes pour une éolienne Savonius [Menet 04].

Le profil des aubes lui a été étudié sous différents angles. En 2009, Kamoji établit un profil (cf. Fig. 2.4) par une étude expérimentale dans une soufflerie qui permet d'augmenter le rendement de 15% à 18% [Kamoji 09].

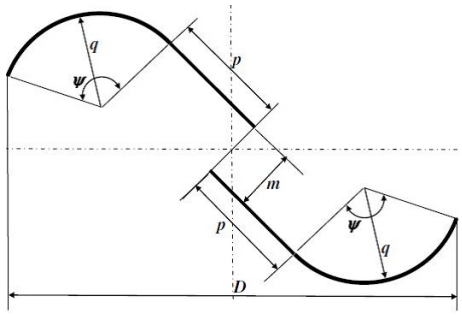

Figure 2.4 – Profil établi par Kamoji

En 2011, Mohamed par un algorithme génétique sous Ansys Fluent propose une solution avec obstacle devant l'aube retour et des pâles profilées (cf. Fig. 2.5). Le rendement calculé pour cette Savonius est de plus de 29% [Mohamed 11].

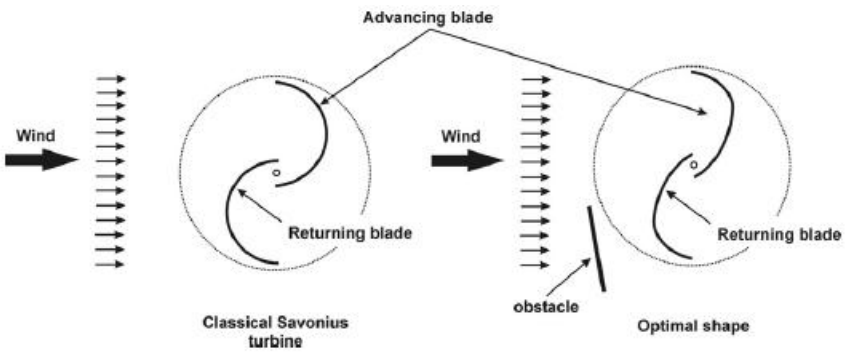

Figure 2.5 – Profil établi par Mohamed

2.3.3 Convergent

Altan a mené durant trois ans des recherches sur la possibilité d'ajouter un convergent (cf. Fig. 2.6) devant une Savonius afin d'améliorer son rendement. Les premières données [Altan 08] sont issues d'une étude expérimentale. Elle fournit les dimensions optimales du convergent. Par la suite, une étude numérique est lancée [Altan 10] et validée par les résultats expérimentaux. Le convergent en accélérant la vitesse du vent sur l'aube menante et en bloquant son passage sur l'aube retour permet d'augmenter le rendement de la Savonius, il passe de 15% sans convergent à près de 37% avec.

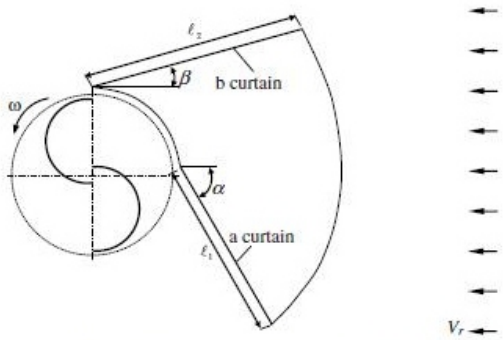

Figure 2.6 – Schéma du convergent [Altan 08]

2.3.4 Interaction

Une étude japonaise [Shigetomi 11] destinée à l'exploitation en milieu urbain des Savonius montre une interaction positive des rotors. Ces recherches prouvent que l'interaction de rotors Savonius améliore leurs performances. Cependant ces formations (cf. Fig. 2.7) sont sensibles à la direction du fluide contrairement à la Savonius qui ne nécessite pas d'orientation par rapport au vent.

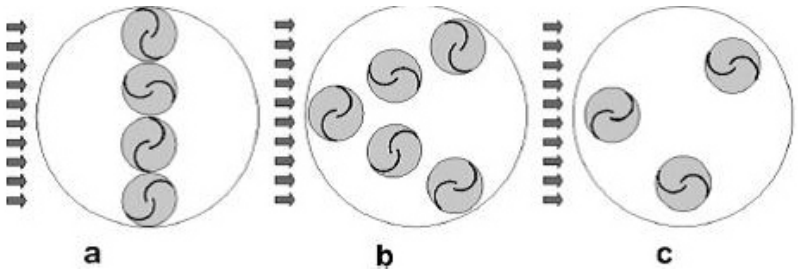

Figure 2.7 – Formations de Savonius

2.4 Conclusion

Cet état de l'art permet d'obtenir des renseignements importants pour l'étude des Savonius double comme le recouvrement optimal ou encore les dimensions d'un convergent pour un meilleur rendement.

Les données disponibles dans la littérature sur le couple d'une Savonius selon son orientation dans le vent sont obtenues par des analyses statiques, l'éolienne ne tourne pas. Pour obtenir le rendement par contre, les études expérimentales ou numériques sont dynamiques, la Savonius est mise en rotation, et la puissance du rotor est relevée.

Pour notre étude, les simulations se font sous le logiciel Star-CCM+. Une première étape consistera à déterminer les paramètres de simulation. Ensuite les résultats statiques et/ou dynamiques obtenus seront comparés à ceux de la littérature afin de valider la modélisation. Le projet Savonius double pourra alors commencer.

Chapitre 3

Paramètres de simulation

3.1 Présentation CD-adapco (Star-CCM+)

CD-adapco est le leader indépendant dans le domaine de la simulation multiphysique. Avec 30 ans d'expérience dans la simulation numérique, un outil comme STAR-CCM+ est utilisé par des industriels tels qu'Airbus, la DCNS, Areva, Renault, Danone... Pour cette étude, Star-CCM+ permet de créer un modèle numérique d'un rotor Savonius en rotation dans un écoulement fluide. De nombreux paramètres sont à mettre en place pour trouver un compromis entre précision et temps de calculs.

3.2 Maillage

Le premier paramètre à déterminer est la taille de maille. Le maillage du modèle 3D est composé de mailles polyédriques et de mailles prismatiques près des parois, de tailles variables selon l'emplacement. Elles sont dimensionnées comme un pourcentage du diamètre de l'éolienne. Afin de déterminer la taille de maillage optimale, plusieurs calculs ont été lancés en faisant varier ce pourcentage de 10 (maillage le plus fin) à 200 (maillage le plus gros). Le maillage le plus fin étant pris comme référence, un maillage de 50% permet un temps de calcul divisé par trois pour une marge d'erreur inférieure à 1%. Les calculs sont effectués sur le modèle 2D obtenu d'après le maillage 3D.

3.3 Domaine

Le domaine fluide autour de l'éolienne doit être suffisamment grand pour garantir la stabilisation de l'écoulement et faire apparaître tous les effets fluide. Sa dimension a été testée entre 4D et 40D, D étant le diamètre du système éolien. Le domaine choisi de côté 26D donne moins de 2% d'erreur pour un temps de calculs divisé par deux par rapport à 40D.

3.4 Modèle

Le modèle utilisé est un modèle de turbulence car le nombre de Reynolds (cf. Eq. 3.1) dans ce problème est grand, il est supérieur à 125000 (valeur pour $v = 2\ m/s$). Les calculs seront effectués pour $v = 7\ m/s$ en général et $D = 1\ m$.

$$Re = \frac{vD}{\nu} \tag{3.1}$$

avec $\nu = 15.6 \times 10^{-6} m^2/s$, la viscosité cinématique de l'air.

Trois modèles de turbulence sont disponibles sous Star-CCM+ :
- $K - \omega$
- $K - \epsilon$
- Spalart Allmaras

Tous ces modèles donnent des résultats similaires. Néanmoins pour ce genre de problème $K-\omega$ est le modèle le plus couramment utilisé, les calculs seront donc effectués avec celui-ci.

3.5 Pas de temps

Le pas de temps est déterminant pour la précision des calculs. Il a été testé de 6×10^{-3} à 6×10^{-4}. Les résultats sont cohérents à partir de 2×10^{-3} et corrects pour 1×10^{-3}. Pour un bon compromis entre précision et temps de calculs, le pas de temps choisi est 10^{-3} pour moins de 1% d'erreur et un temps de calcul divisé par trois par rapport à un pas de 6×10^{-4}.

3.6 Nombre de tours

Pour déterminer le nombre de tours de Savonius nécessaire à la stabilisation du système une simulation sur 100 tours a été lancée. Les données sont stables à partir du 45ème tour. Néanmoins, étant donné le temps de calculs pour un tour, soit un peu plus d'une heure, il a été convenu de choisir 12 tours, la marge d'erreur étant alors de 5% par rapport au résultat stabilisé (cf. annexe B)).

3.7 Conclusion

Les Savonius modélisées pour l'étude ont toujours les mêmes dimensions. C'est une éolienne d'un mètre de diamètre avec un recouvrement optimal de 0.15. Les aubes en aluminium font 3 mm d'épaisseur et 54 cm de diamètre. Les paramètres de simulation déterminés auparavant sont utilisés. La représentation du maillage final est visible ci-dessous (cf. Fig. 3.1) avec la Savonius centrée dans un domaine carré de 26 m de côté.

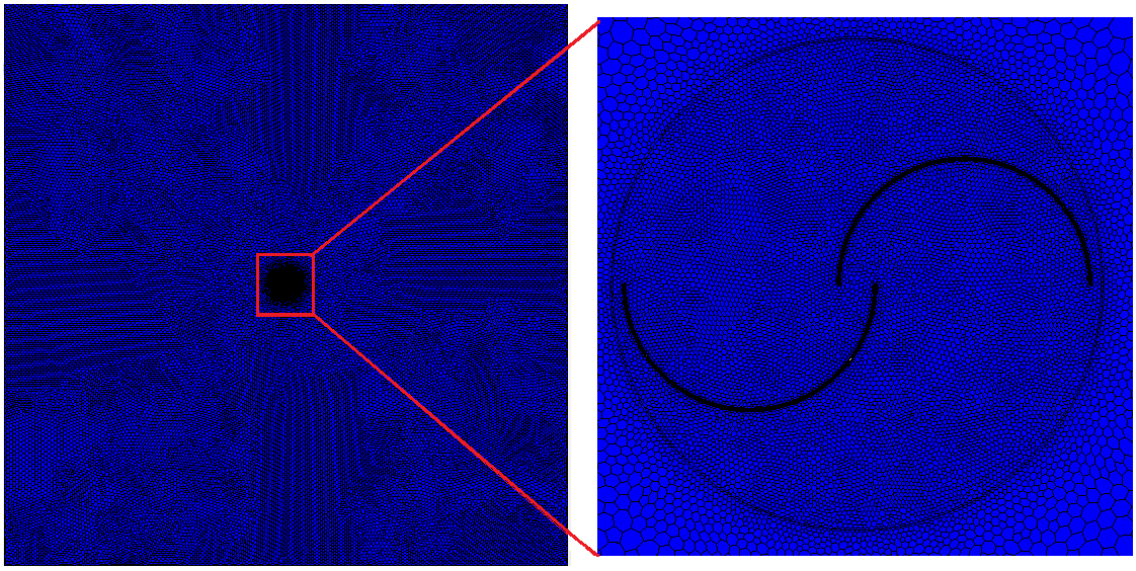

Figure 3.1 – A gauche le maillage du domaine, à droite un zoom sur la Savonius

Chapitre 4

Savonius simple

4.1 Étude statique

Cette étude préalable en statique sur une Savonius simple va permettre de valider la modélisation sous Star-CCM+ avec les résultats expérimentaux et numériques de la littérature.

Dans différentes positions, le couple de la Savonius est calculé pour une vitesse de vent donné, ici 7 m/s. A 90° la Savonius est perpendiculaire au flux, elle est "face au vent", à 0° la Savonius est "dans le vent" (cf. Fig. 4.1).

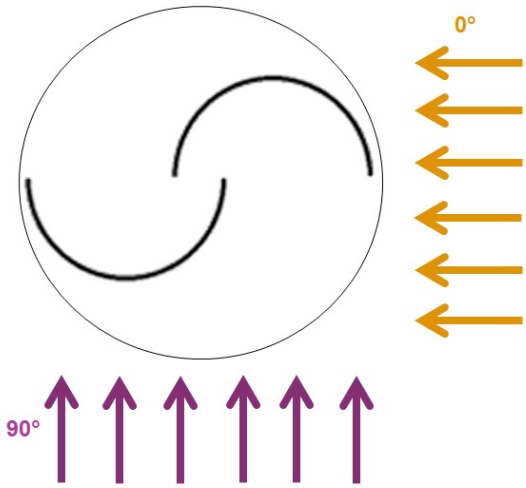

FIGURE 4.1 – Orientation du vent

Le moment maximal est obtenu à environ 45° par rapport au vent. La rosace de moments (cf. Fig. 4.2) est en accord avec les résultats expérimentaux [Blackwell 77] ou numériques [Menet 04] de la littérature. Les paramètres (modèle de turbulence, pas de temps, taille du maillage, etc) ont donc été correctement établis.

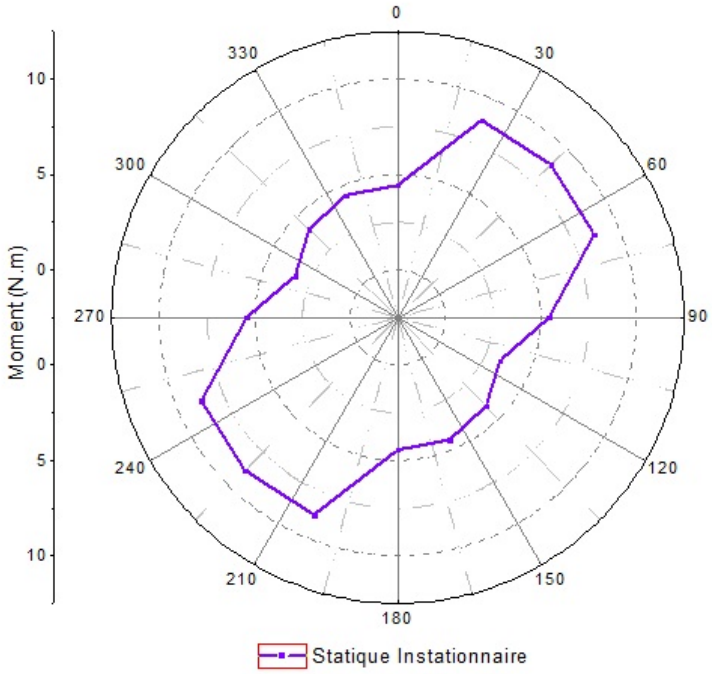

Figure 4.2 – Moment en fonction de l'angle de rotation, calcul statique

Par ailleurs cette rosace justifie le nom "éolienne de trainée" donné à la Savonius dans les publications, car c'est la trainée différentielle entre l'aube menante et l'aube retour qui provoque la rotation de l'éolienne et non pas la force de portance. L'éolienne tourne lorsque qu'elle est "face au vent".

4.2 Étude dynamique

Pour l'étude dynamique, l'éolienne est mise en rotation à une vitesse donnée ω.

4.2.1 Rendement

Pour obtenir la courbe de rendement (cf. Fig. 4.3), six calculs ont été lancés avec différents rapports de vitesses λ (de 0.4 à 1.8), soit avec ω variant de 5.6 rad/s à 25.2 rad/s pour une vitesse de vent fixée à 7 m/s.

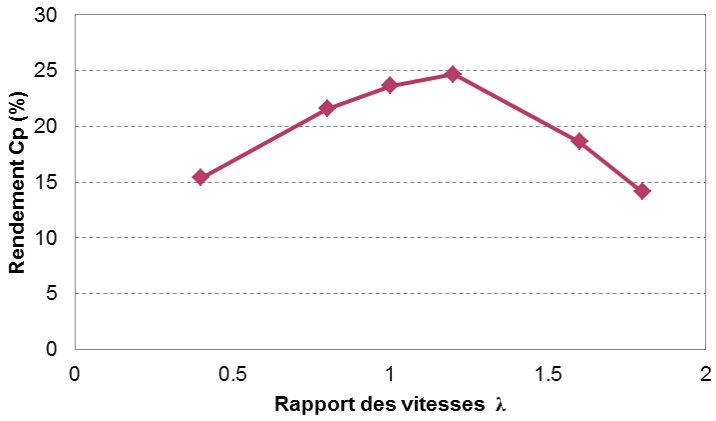

Figure 4.3 – Coefficient de puissance C_p d'une Savonius simple

Le rendement optimal de 25% est en accord avec la littérature. Il n'y a pas de valeur arrêtée pour celui-ci, selon les publications il varie de 15% [Kamoji 09] à 32% [Wortman 83]. Ce résultat est donc cohérent.

4.2.2 Moments

La rosace de moments de la Savonius a été tracée avec les résultats de l'étude dynamique. Cette rosace n'a pas la même orientation que celle obtenue en statique. Le moment est ici maximal lorsque la Savonius est "dans le vent", et négatif lorsqu'elle est "face au vent" (cf. Fig. 4.4). Néanmoins ce décalage entre statique et dynamique s'explique, les effets de la rotation d'un solide dans un fluide sont connus, comme l'effet Magnus par exemple (cf. annexe C), et entraînent une différence notable entre une analyse statique et une analyse dynamique. Ce résultat remet en question le principe "éolienne de trainée" pour la Savonius, avec ces nouvelles données "éolienne de portance" conviendrait peut-être mieux.

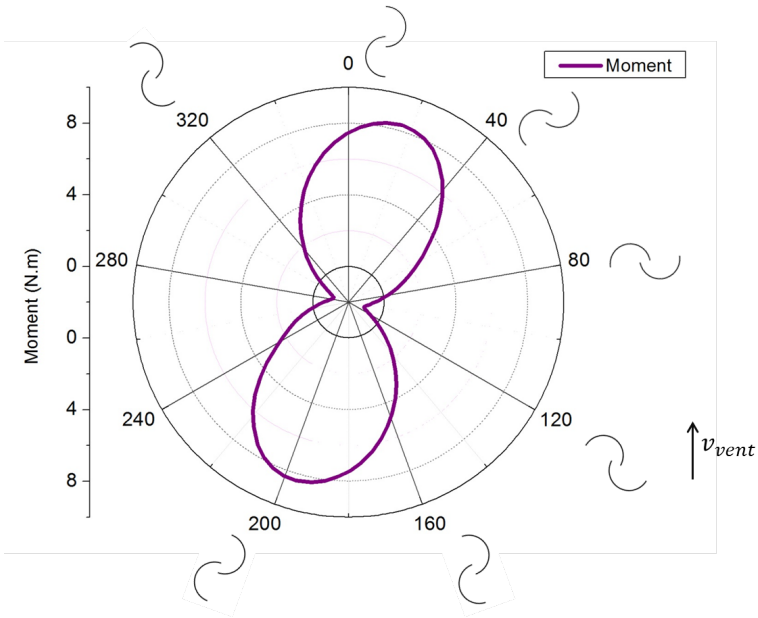

Figure 4.4 – Moment en fonction de l'angle de rotation, calcul dynamique

4.3 Conclusion

Cette étude sur une éolienne Savonius simple a permis de valider les paramètres de simulation sous Star-CCM+, l'étude sur les Savonius double est maintenant possible.

Par ailleurs ces premiers résultats ont permis de soulever le problème statique *vs* dynamique. Le comportement d'une éolienne en rotation dans un fluide ne peut pas être correctement assimilé avec une simulation statique, une analyse dynamique est nécessaire.

Chapitre 5

Savonius double

5.1 Modèles d'origine

5.1.1 M2

Le point de départ du stage est une idée de Michel Maya, l'éolienne M2 (cf. Fig. 5.1). L'objectif de l'étude est de tester son efficacité. Les avantages de cette nouvelle éolienne sont :

- le passage du vent devant l'aube retour est bloqué, il n'y a plus d'effet frein
- les solides de bords et central forment un convergent qui va permettre d'accélérer le vent sur l'aube menante
- le côté double de l'éolienne permet l'orientation automatique de celle-ci dans le vent, la propriété principale de la Savonius est donc conservée

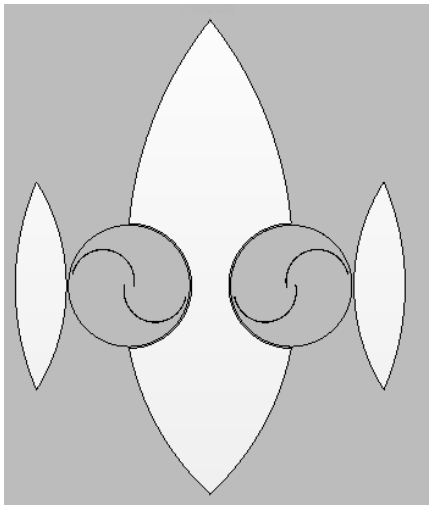

FIGURE 5.1 – Eolienne double de Michel Maya, M2

5.1.2 Spock et Spock2

Dans le même temps des calculs sont lancés sur une évolution de M2. Les convergents sur les modèles Spock (cf. Fig. 5.2), sont dimensionnés d'après les données d'Altan [Altan 10] qui a optimisé dans ses recherches la taille et l'angle d'orientation du convergent. Le modèle Spock2 a une ouverture plus réduite, il est ici question de prendre en compte l'information "éolienne de portance" découverte en étude dynamique. Le vent n'est pas concentré sur toute l'aube menante, mais seulement sur la partie utile lorsque l'éolienne est "dans le vent" à 0°.

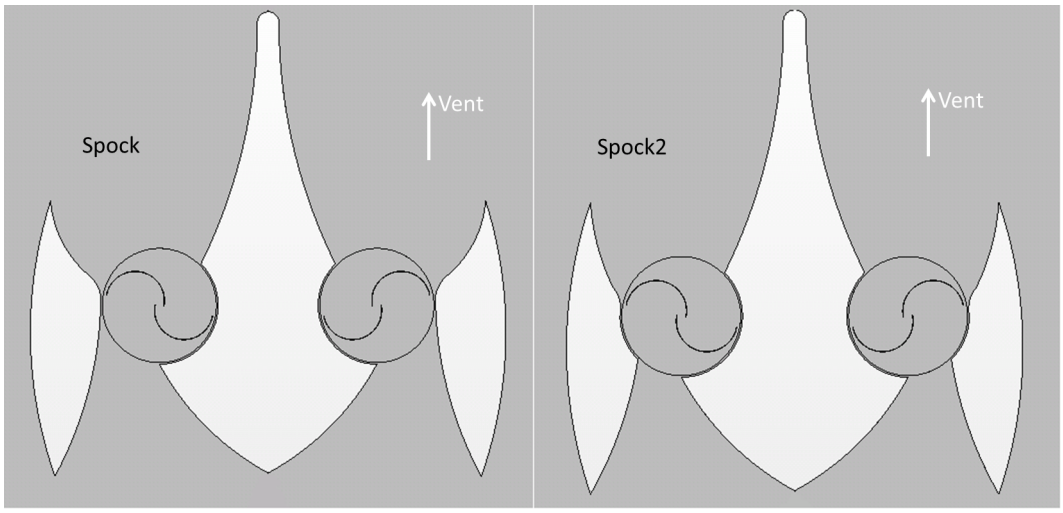

Figure 5.2 – Eoliennes doubles Spock et Spock2

5.1.3 Hibou et Canoë

Les premières images des vecteurs vitesses et de la distribution des pressions sur les modèles M2 et Spock amène à penser que les solides de bord font barrage au fluide. Des calculs ont donc été lancés sur un modèle type Canoë (cf. Fig. 5.3). Ici les aubes retour sont toujours masqués, et la dépression sur l'aube menante à 0° est accentuée. Par ailleurs un modèle Hibou (cf. Fig. 5.3) est proposé, avec une entrée unique sur les éoliennes. L'idée de convergent est toujours là, la vitesse du vent est accélérée sur les aubes menantes, les aubes retour sont à l'abri du vent.

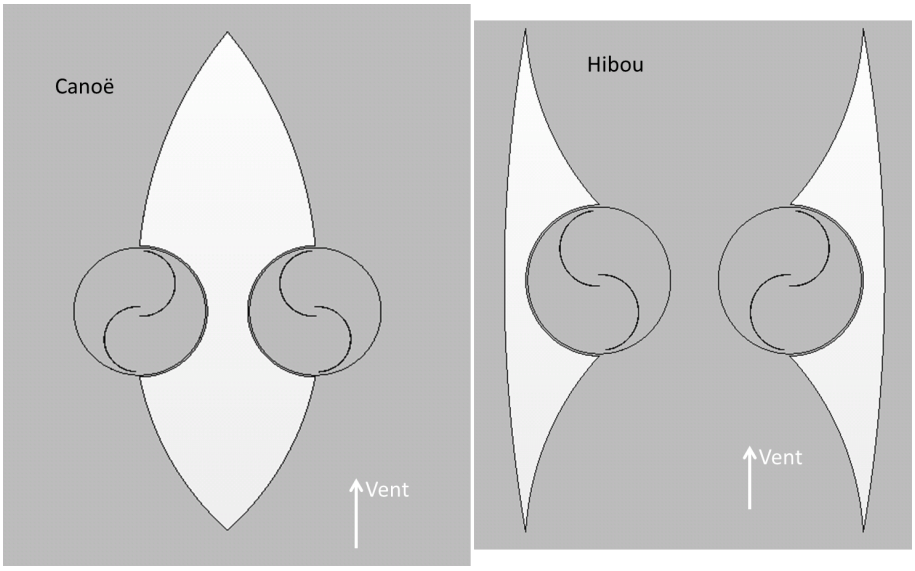

Figure 5.3 – Eoliennes doubles Canoë et Hibou

5.1.4 Résultats

Pour tous ces modèles un calcul de rendement a été effectué. La courbe du coefficient de puissance du modèle prometteur de Michel Maya M2 est visible ci-dessous :

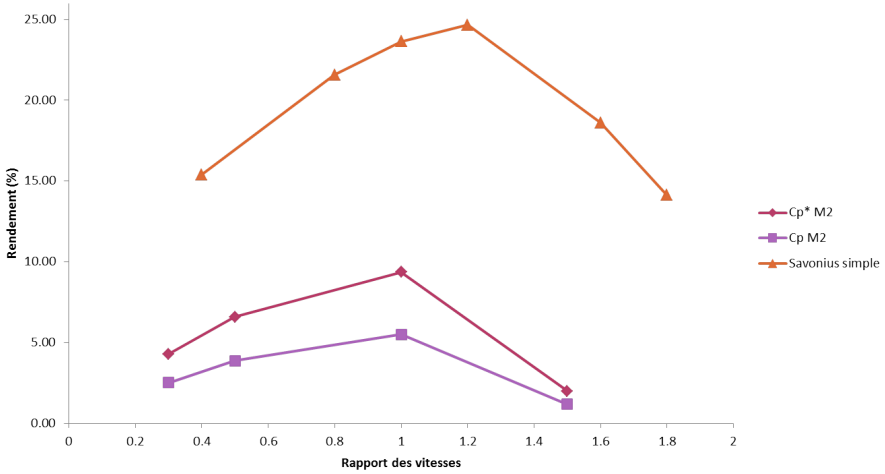

Figure 5.4 – Rendement de l'éolienne double M2

Sur ce graphique (cf. Fig. 5.4) le rendement d'une Savonius simple est comparé aux rendements de la Savonius M2, Cp et Cp*. Un coefficient de puissance est définit par :

$$C_p = \frac{2C\omega}{\rho S v^3} \tag{5.1}$$

avec

- C le couple du rotor
- ω la vitesse de rotation du rotor
- ρ la masse volumique de l'air
- v la vitesse du vent
- S la surface interceptée

Tous ces paramètres sont fixés, excepté S qu'il reste à définir. Soit toute la surface du système éolien M2 est considérée, alors le rendement Cp maximal est de 5,5%, l'encombrement est pris en compte, soit S est défini par la surface des rotors alors le rendement est de 9,37% maximum. Dans tous les cas il n'y a pas d'amélioration par rapport à la Savonius simple qui a un rendement de 24%. Il en est de même pour les autres modèles, les évolutions Spock ou Canoë ne font guère mieux (cf. Fig. 5.5).

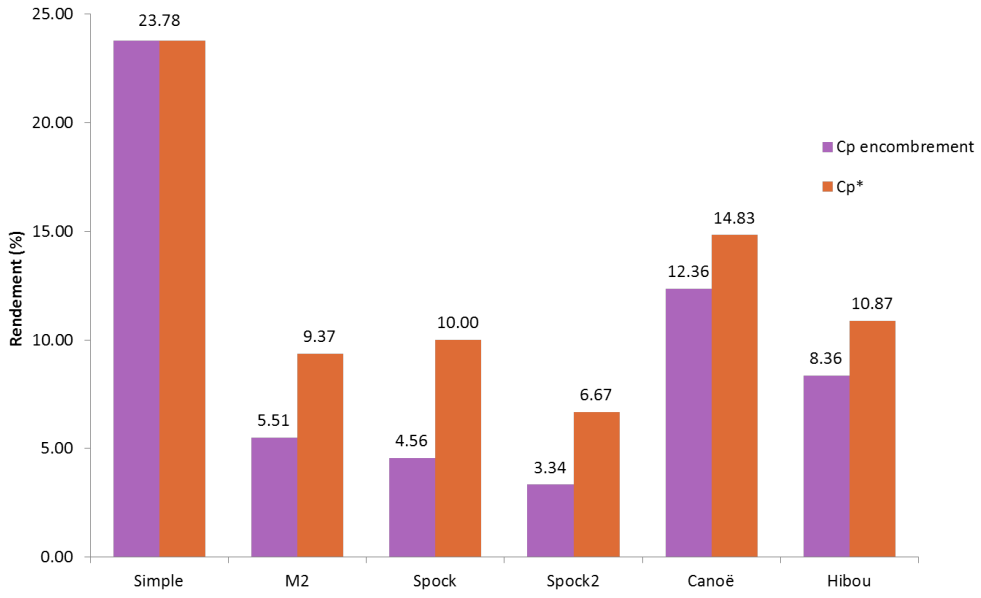

Figure 5.5 – Comparaison des modèles doubles par rapport à la Savonius simple

5.1.5 Explication

L'idée de convergent sur l'aube menante et d'abri au vent pour l'aube retour ne fonctionne pas comme il était prévu. En étudiant les vecteurs vitesse (cf. Fig. 5.6) sur le modèle M2, il est notable que le système tout entier fait barrage au vent, la vitesse dans le système est de 3 m/s environ, à l'extérieur le fluide est à 7 m/s. La vitesse du vent n'est donc pas accélérée. Par ailleurs il se crée une compression du fluide dans le rotor, le vent est enfermé, la surpression sur l'aube retour est finalement plus forte que sur le modèle simple.

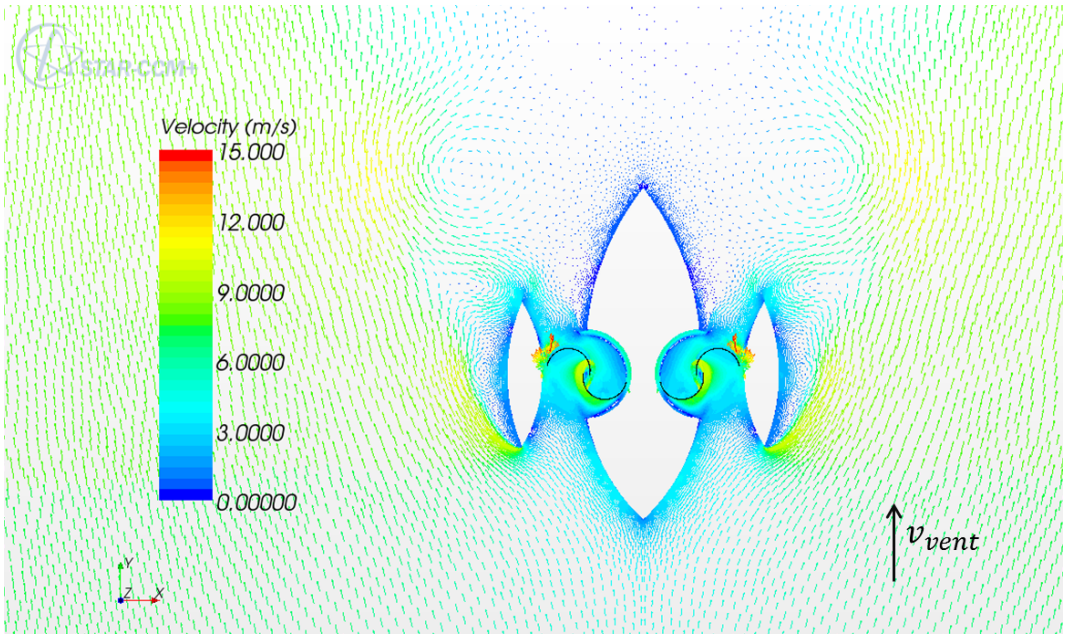

Figure 5.6 – Vecteurs vitesse pour l'éolienne M2

5.2 Évolution

5.2.1 Wolf et Toucan

Avec ces nouvelles informations deux modèles ont été dessinés (cf. Fig. 5.7). Ces éoliennes doubles ont cette fois-ci un profil aérodynamique (forme de l'œuf). L'aube retour est toujours à l'abri du vent mais le fluide n'est plus emprisonné. Le vent est accéléré vers l'extérieur (Toucan) ou vers l'intérieur (Wolf) pour créer une dépression sur les aubes menantes et faire tourner les rotors.

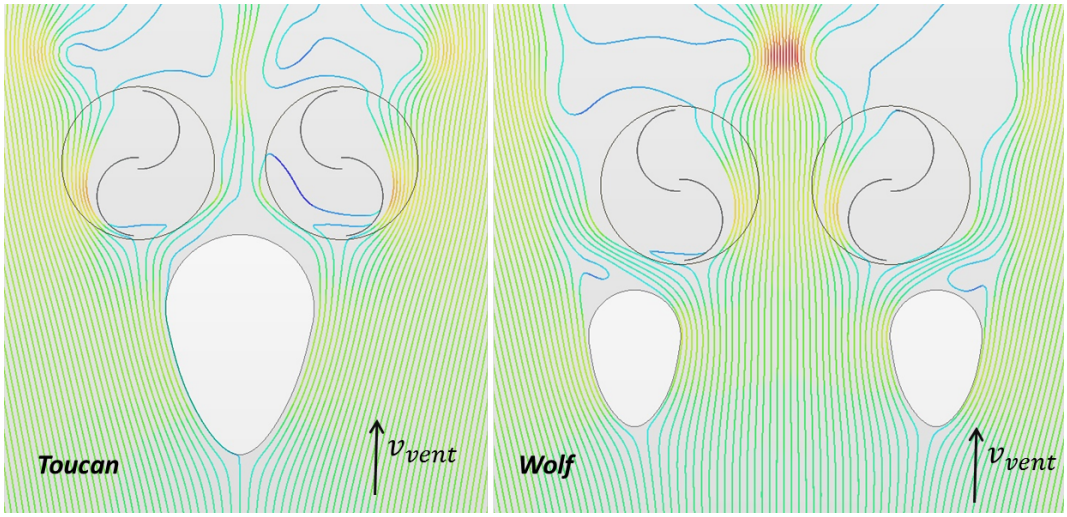

Figure 5.7 – Lignes de courant des éoliennes Toucan et Wolf

5.2.2 Résultats

L'amélioration par rapport aux doubles d'origine est nette. Les rendements de ces nouvelles éoliennes sont proches de celui d'une éolienne simple (cf. Fig. 5.8)

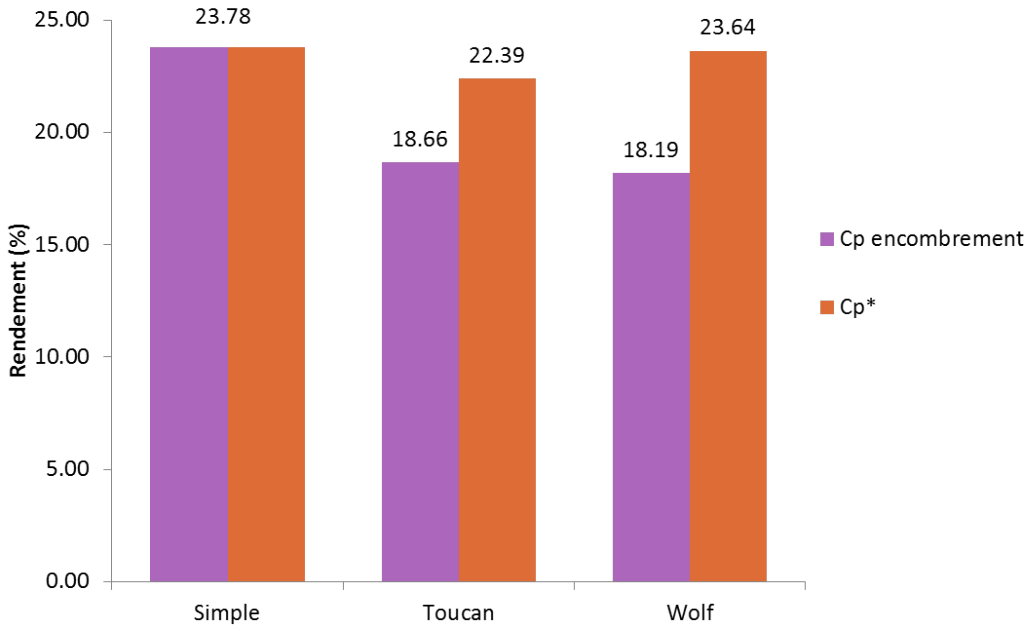

Figure 5.8 – Comparaison entre la simple, Toucan et Wolf

5.2.3 Optimisation

A ce stade de l'étude il est difficile de parler d'optimisation pour les Savonius double. Néanmoins pour les Savonius "œuf" le rendement est similaire à celui de la simple soit 24% environ. Un nouveau calcul est lancé afin de déterminer le rendement de deux éoliennes l'une à côté de l'autre sans système quelconque autour. L'objectif de cette simulation est de savoir si la proximité de deux éoliennes perturbe leur fonctionnement, alors leur rendement pourrait chuter et les Savonius "œuf" seraient utiles. Trois simulations sont effectuées, les rotors tournent dans le même sens (Id), en sens inverse vers l'extérieur (Ext) ou vers l'intérieur (Int). Les rendements obtenus (cf. Fig. 5.9) pour Id sont meilleurs que ceux d'une Savonius simple. Ce résultat était annoncé par l'étude japonaise sur les interactions [Shigetomi 11].

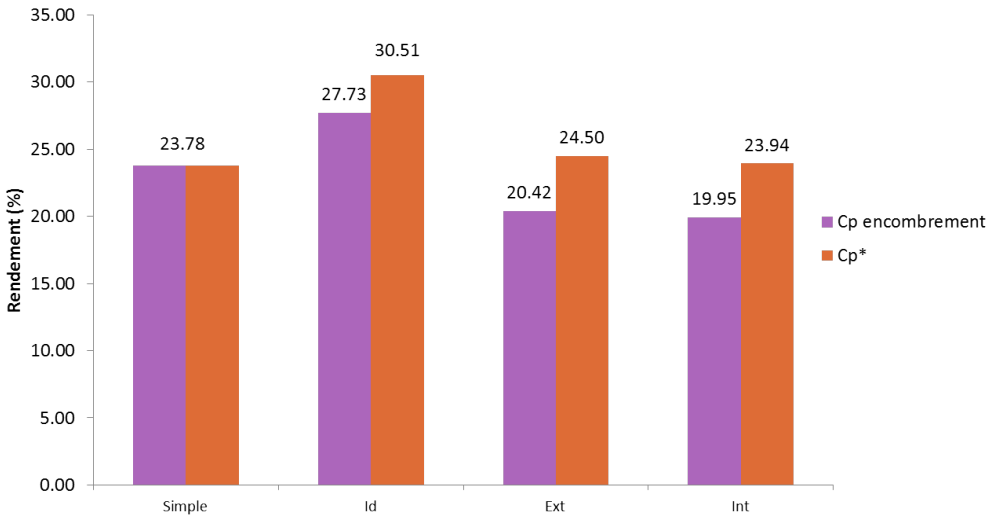

Figure 5.9 – Comparaison entre la simple et interaction entre deux Savonius

5.3 Conclusion

Même si aucune de ces éoliennes n'a été optimisées d'un point de vue géométrique, que les rendements peuvent surement être encore améliorés, les Savonius double ne semblent pas être une voie d'avenir. Cette étude n'aura pas pour autant été inutile puisqu'elle aura montrée que ça ne marche pas, l'idée prometteuse de départ n'a pas donné les résultats escomptées.

Chapitre 6

Conclusion

Le sujet du stage était "Étude numérique d'une éolienne Savonius double". Le bilan sur les Savonius double n'est pas celui qui était attendu, elles ne sont pas réellement performantes. Néanmoins de nombreuses choses ont été comprises grâce à cette étude sur leur fonctionnement. Un point intéressant également dans l'étude préalable sur les Savonius simple a été soulevé, l'idée d'éolienne de traînée est remise en question grâce à l'étude dynamique sur le couple.

Cependant il est à noter que cette étude est purement numérique. Il est important pour la suite d'obtenir des données expérimentales (sur le moment par exemple) afin de valider les résultats. Le projet est en cours, l'éolienne devrait être instrumentée par une équipe d'élèves ingénieurs avant la fin de l'année et mise en fonctionnement.

Enfin élément important : nous ne pouvons pas suivre notre instinct pour ce type d'étude. Aucune de nos convictions ne s'est avérées justes, même le simple fonctionnement de la Savonius n'avait pas été pensé correctement. L'étude numérique est primordial ici afin de ne pas construire une éolienne sans valeur.

Annexe A

Recouvrement

Comme les différentes publications ne sont pas en accord sur la valeur du recouvrement optimal, quatre simulations rapides (sur trois tours) ont été lancées sur Star-CCM+.

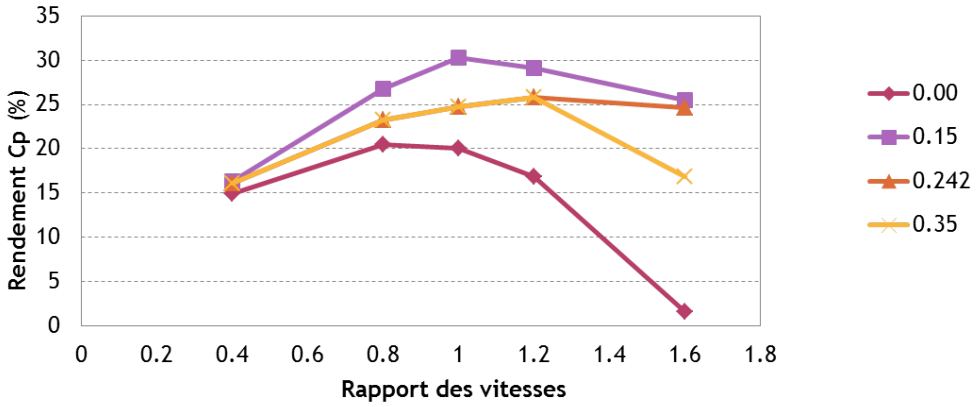

FIGURE A.1 – Comparaison du rendement pour différents recouvrements

Le recouvrement de 0.15 proposé dans de nombreuses publications obtient le meilleur rendement (cf. Fig. A.1).

Ce recouvrement est utilisé pour tous les modèles de Savonius de l'étude.

Annexe B

Choix des paramètres de simulation

Pour déterminer un paramètre de simulation, des calculs sont lancés pour différentes valeurs, et le paramètre choisit est celui qui promet un bon compromis entre temps de calcul et précision. Par exemple, pour le nombre de tours nécessaires à la stabilisation du système, la courbe d'erreur (cf. Fig. B.1) a été tracée en prenant le $100^{\grave{m}e}$ tour comme référence.

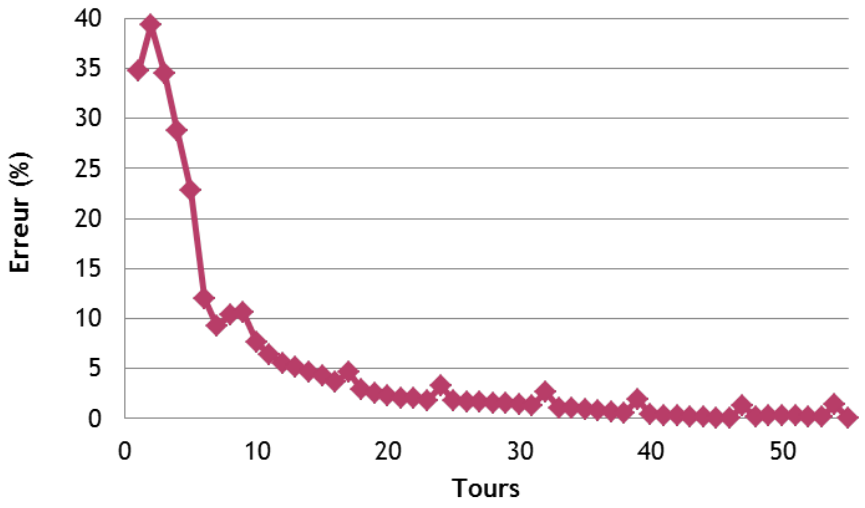

FIGURE B.1 – Évolution de l'erreur en fonction du nombre de tours

En sachant qu'il faut plus d'une heure de calcul pour un tour, il a été décidé de faire 12 tours, la marge d'erreur est alors de 5%.

Annexe C

Effet Magnus

L'effet Magnus, découvert par Heinrich Gustav Magnus (1802-1870), permet d'expliquer par exemple les effets de balle dans le sport. Quand la vitesse d'un fluide (comme l'air) augmente, sa pression diminue, et réciproquement. L'effet Magnus est mis en évidence avec deux simulations. Un cylindre est placé dans un écoulement d'air à vitesse constante de 7 m/s, sur une première simulation le cylindre est statique, pour la deuxième il est mis en rotation. La répartition des pressions n'est pas la même (cf. Fig. C.1). Sur le cylindre en rotation une dépression se forme sur le côté (en bleu), donc une force de portance tire le cylindre sur la droite.

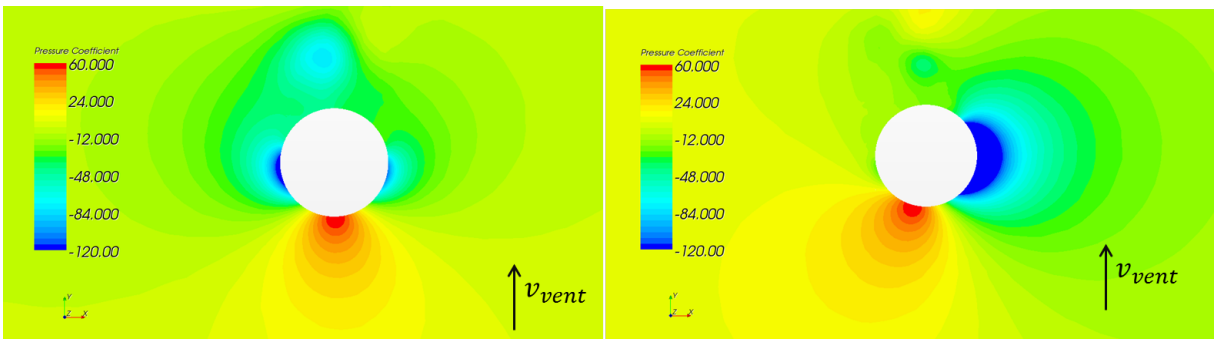

FIGURE C.1 – Distribution des pressions pour un cylindre fixe (à gauche) ou un cylindre en rotation (à droite)

Bibliographie

[Akwa 12] Joao Vicente Akwa, Gilmar da Silva Junior & Adriane Prisco Petry. *Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics.* Renewable Energy, 2012.

[Altan 08] Burçin Deda Altan, Mehmet Atilgan & Aydogan Ozdamar. *An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2008.

[Altan 10] Burçin Deda Altan & Mehmet Atilgan. *The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors.* Renewable Energy, 2010.

[Blackwell 77] Ben F. Blackwell, Robert E. Sheldahl & Louis V. Feltz. *Wind tunnel Performance Data for Two- and Three-Bucket Savonius Rotors.* 1977.

[Fujisawa 92] Nobuyuki Fujisawa. *On the torque mechanism of Savonius rotors.* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992.

[Kamoji 09] M.A. Kamoji, S.B. Kedare & S.V. Prabhu. *Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor.* Applied Energy, 2009.

[Martin 87] Jean Martin. *Energies éoliennes.* Techniques de l'ingénieur, 1987.

[Menet 01] Jean-Luc Menet, Laurent-Charles Valdès & Bruno Ménart. *A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the $L - \omega$ criterion.* Renewable Energy, 2001.

[Menet 04] Jean-Luc Menet & Nachida Bourabaa. *Increase in Savonius rotors efficiency via a parametric investigation.* In European Wind Energy, 2004.

[Mohamed 11] M.H Mohamed, G Janiga, E Pap & D Thévenin. *Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade.* Energy Conversion and Management, 2011.

[Ross 11] Ian Ross & Aaron Altman. *Wind tunnel blockage corrections : Review and application to Savonius vertical-axis wind turbines.* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011.

[Saha 08] U.K. Saha, S. Thotla & D. Maity. *Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments.* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008.

[Shigetomi 11] Akinari Shigetomi, Yuichui Murai, Yuji Tasaka & Yasushi Takeda. *Interactive flow field around two Savonius turbines.* Renewable Energy, 2011.

[Whalley 09] Jeff Whalley, Matt Johnson & Brian MacMillin. *Effect of turbulence on Savonius Rotor Efficiency.* Fluids Laboratory, 2009.

[Wortman 83] A.J. Wortman. *Introduction to Wind Turbine Engineering.* Butterworth Publishers, 1983.

Université de Franche-Comté
www.univ-fcomte.fr

Résumé

Le comportement aérodynamique des éoliennes lentes de type Savonius est l'objet de cette étude. Un état de l'art a permis d'identifier les paramètres influant sur les performances du rotor Savonius. Puis des simulations numériques ont permis de comprendre son fonctionnement. Enfin l'objet principal est l'étude numérique de Savonius double, agencement de rotors et de convergents, dans le but d'améliorer le rendement de l'éolienne.

Abstract

The aerodynamic behaviour of slow running wind turbines of Savonius type is studied here. Through a bibliographical research, it has been possible to identify the influent parameters on the Savonius efficiency. Then numerical simulations allowed understanding its mechanism. Lastly the principal subject is the numerical study of the double Savonius, layout of rotors and curtains, to improve the efficiency of the wind turbine.