

Miniaturisation bioinspirée d'un convertisseur aéromécanique pour l'exploitation des faibles vitesses de vent

Aurélien Carre

▶ To cite this version:

Aurélien Carre. Miniaturisation bioinspirée d'un convertisseur aéromécanique pour l'exploitation des faibles vitesses de vent. Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2019. Français. NNT: 2019GREAA012. tel-03184794

HAL Id: tel-03184794 https://theses.hal.science/tel-03184794

Submitted on 29 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Communauté UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : Sciences pour l'Ingénieur

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Aurélien Carré

Thèse dirigée par **Laurent Tabourot** et codirigée par **Émile Roux**

préparée au sein du Laboratoire SYMME : SYstèmes et Matériaux pour la MÉcatronique

dans l'École Doctorale SISEO : Sciences et Ingénierie des Systèmes, de l'Environnement et des Organisations

Miniaturisation bioinspirée d'un convertisseur aéromécanique pour l'exploitation des faibles vitesses de vent

Thèse soutenue publiquement le **19 juillet 2019**, devant le jury composé de :

Patricia Ern Directrice de recherche CNRS, IMFT, Présidente

Florent Ravelet Maitre de conférences HDR, DynFluid, Arts et Métiers ParisTech, Rapporteur Philippe Basset

Maitre de conférences HDR, ESYCOM, ESIEE Paris, Rapporteur

Adrien Badel Professeur, SYMME, Univ. Savoie Mont Blanc, Examinateur

Laurent Tabourot Professeur, SYMME, Univ. Savoie Mont Blanc, Directeur de thèse

Émile Roux Maitre de conférences, SYMME, Univ. Savoie Mont Blanc, Co-Directeur de thèse



À Lucie, mon rayon de lumière apparu au beau milieu de ces travaux de recherche.

Remerciements

J'ai toujours aimé lire les pages consacrées aux remerciements dans les différents manuscrits que j'ai eus sous la main. C'est là que le doctorant se livre plus personnellement et que l'on peut déceler la manière dont il·elle a vécu son expérience de thèse. C'est donc aujourd'hui à mon tour de repenser à toutes les personnes qui ont gravité autour de moi pendant ces trois dernières années.

Tout d'abord, j'aimerais remercier les quatre spécialistes qui ont accepté de former mon jury de thèse. Merci donc à Patricia Ern d'en avoir été la présidente. Merci pour son enthousiasme vis-à-vis de mes travaux depuis notre rencontre à Vienne lors d'un congrès de mécanique des fluides : sa vision un peu moins "récupération d'énergie" a permis d'aborder des points qui n'avaient pas été soulevés. Merci à Florent Ravelet et Philippe Basset d'avoir relu en détail mon manuscrit, d'avoir apporté leurs remarques et d'avoir rédigé des rapports de thèse motivants, ainsi que pour leurs questions pertinentes lors de la soutenance. Merci plus particulièrement à Florent Ravelet d'avoir également été "rapporteur" de mes travaux à mi-parcours et d'avoir poursuivi l'aventure avec nous jusqu'au bout. Et un grand merci à Adrien Badel, qui a eu le courage d'être examinateur malgré son *jet lag* conséquent. Ton aide aura été précieuse durant ces trois ans, et c'est aussi toi qui m'aura fait rencontrer Pierre Gasnier du CEA avec qui j'ai grandement collaboré. J'espère pour ma part t'avoir fait (re)découvrir une nouvelle voie de micro récupération d'énergie, dans laquelle tu t'impliqueras peut-être par la suite.

J'adresse ensuite mes remerciements à mes directeurs de thèse. Merci à Laurent de m'avoir proposé ce sujet, d'avoir été présent régulièrement pour cadrer l'avancement des travaux et d'avoir toujours évoqué de nouvelles idées. J'avoue qu'il m'aura fallu quelques temps pour appréhender ton foisonnement d'idées et pour faire le tri après chaque réunion afin d'avoir un objectif bien défini à court terme ! Merci beaucoup également à Émile d'avoir été co-directeur et de m'avoir suivi de près. Tu m'as soutenu et accompagné dans les différents choix et hypothèses que j'ai choisis et ton regard critique a été le bienvenu et a toujours été pertinent. Tu as été là aux moments importants, lorsque je n'avais pas toutes les réponses à mes questionnements, et ce malgré un emploi du temps de jeune papa (\times 2) bien chargé. Merci encore à toi et bonne continuation, au SYMME et ailleurs.

Je pense bien évidemment au personnel "technique" du SYMME et je les remercie pour leur aide et leur support à différents points de vue. Merci tout d'abord à Françoise, pour sa bonne humeur constante et pour son soutien. Sans toi, je ne sais pas ce que nous autres doctorants deviendraient... Merci aussi à Nassika pour sa gestion sans faille des commandes et des budgets, à JC, à Blaise de m'avoir largement aidé pour la fabrication de la soufflerie, à Jérôme (au début) puis Pascal (ensuite) pour les problèmes informatiques et en particulier ma perte partielle de données.

Ces trois années ont formé une expérience très riche, non seulement scientifiquement mais également socialement et psychologiquement, grâce notamment aux personnes avec qui j'ai échangé (trop parfois) quotidiennement. Un immense merci donc aux fidèles serviteurs de la Mécanotrique pour les bons moments passés ensemble et pour les belles discussions que nous avons pu avoir. Merci à Thibault, pour qui les synergies MTG et la grimpe à l'envers n'ont plus de secret. J'espère que tu garderas encore longtemps ta casquette de Sacha et que tes chants Zbouizbouiques résonnent forts à Grenoble. Merci à Ludo (oui et non) pour la motivation mutuelle à grimper et pour les minutes (que dis-je, les heures, les semaines!) perdues à discuter d'énergie, de vélo ou d'enfants dans ton bureau. Et vice et versa. Merci à Christian, ingénieur en petits instruments, qui ne m'aura jamais connu frais, libre et jeune (sans enfant quoi). Merci d'avoir apporté un peu de noir dans ce laboratoire bien trop blanc et privilégié. Merci à Thomas Huguet qui a fait un passage rapide mais remarqué au SYMME. Tu m'as poussé à toujours chercher de nouvelles pratiques alternatives et à remettre sans cesse en question les technologies actuelles pour évoluer vers l'autonomie et la sobriété. Bonne vie à toi à Toulouse et j'espère que nos routes se recroiseront un jour ou l'autre. Merci à Thomas Amazing, avec qui les débats furent toujours houleux (passé simple), et dont je ne doutai jamais qu'il aimât profondément les grenoblois en Golf ou l'écriture inclusive (imparfait du subjonctif et ironie). Merci à Thomas Muller pour les partages d'expérience sur le jeûne et l'alimentation ; merci à Alex (Yaniro!) pour les discussions sur l'alimentation également, sur l'effondrement et pour les bons moments passés à Orpierre; merci à Tigran, que je n'aurais pas connu très longtemps mais qui s'est vite intégré au groupe et qui a repris en main la dynamique doctorante du laboratoire (doucement sur le tofu quand même).

Merci à Thomas Lacombe, Amélie, Pierre Nagorny, Jérémy, Mathias, Moustapha, Mohamed, Matthias, Thomas Monin, Annaïg, Philippe, Léonida, Gwyddyon, Laurent Bizet, Yohann, Amandine. Merci aussi à Pierre Vacher de m'avoir suggéré la stéréocorrélation et de s'être intéressé à mes graines d'érable; merci à Ronan, Luc, Camilo, Laurent Goujon, Christine Barthod, Éric, Georges, Yannick, Christine Galez, Christophe, Jean-Luc. J'essaie d'être exhaustif mais j'oublie surement des personnes, qu'elles m'en excusent.

Je remercie aussi mes amis proches, qui m'ont toujours soutenu durant ces trois années (et même bien avant) et qui restent un repère malgré la distance. Merci à Raph, Mick, qui m'a rejoint au SYMME, Guillaume, Thomas, Martin, Charly et leurs compagnes respectives.

Enfin, j'adresse mes pensées affectives à tous les membres de ma famille, qui suivent mes travaux de près ou de loin et qui, pour certains, ont pu faire le déplacement le jour de ma soutenance. Merci à mes cousins, mes oncles et tantes, mes grands-parents. Merci à la famille de Laetitia également, qui a toujours pris très au sérieux mes études.

Un merci évidemment particulier à mes parents, qui ont respecté mes choix depuis mon enfance et qui m'ont laissé tout à fait libre de décider de mon parcours scolaire, sans jamais me pousser. Merci d'avoir été présents et soutenants lors des moments importants de ma vie, et merci d'avoir participé à faire de moi qui je suis aujourd'hui, avec mes défauts et imperfections. Un grand merci à mon petit frère Julian, qui n'a de petit que le nom... Peu importent nos différences, les années d'études ou nos querelles d'enfants, tu es qui tu es et je suis très heureux pour toi (pour ne pas dire fier). Merci d'être là.

Je ne pourrais pas terminer ces remerciements sans citer la personne la plus proche de moi, celle avec qui j'ai passé le plus de temps dans ma vie et qui me connait mieux que quiconque. Merci du fond du cœur à Laetitia de m'avoir soutenu et supporté pendant ces trois longues années (et pendant toutes les précédentes qui n'étaient pas forcément plus simples !), de m'avoir poussé à "bosser ma thèse" et d'avoir abandonné en concluant que "j'étais sans doute efficace". Merci de me suivre au bout du monde (littéralement !). Merci pour tes remises en question permanentes qui nous motivent à évoluer et à sans cesse chercher le meilleur. Merci pour ces innombrables bons moments passés ensemble qui sont loin d'être terminés, merci à la belle personne que tu es. Et merci d'être une maman merveilleuse pour notre fille.

Lucie, toi qui ne comprendras ces lignes que dans quelques années, je te remercie d'être arrivée dans notre petite famille. Certes, tes premières nuits n'ont pas forcément aidés à ma concentration, mais tu me remplissais d'amour après mes journées de travail. Tu as apporté une vision nouvelle de la vie pour moi, remplie de bonheurs et de joies purs. Merci d'être la petite fille incroyable que tu es (et ne grandis pas trop vite, je t'en supplie...).

Table des matières

vii

Int	Introduction générale 1				
1	Des capteurs autonomes vers le biomimétisme				
	1.1	Introduction	4		
	1.2	Application et sources pour la faible récupération d'énergie	4		
		1.2.1 L'application visée : les capteurs autonomes communicants	4		
		1.2.2 Différentes sources d'énergie	7		
		1.2.3 Les sources et micro sources d'énergie éolienne	8		
	1.3	Efficacité des profils d'ailes	9		
	1.4	Récupérateurs d'énergie éolienne de petites dimensions	13		
		1.4.1 Éoliennes à axe horizontal	14		
		1.4.2 Autres types de récupérateurs éoliens	19		
	1.5	Études concernant des spécimens biologiques	22		
		1.5.1 Les samares	22		
		1.5.2 Les animaux volants	24		
		1.5.3 Biomimétisme	25		
	1.6	Ce qu'il faut retenir	26		
2	Étud	le expérimentale du comportement des graines d'érable	29		
	2.1	Introduction	30		
	2.2	Matériel et dispositifs	30		
		2.2.1 Spécimens d'étude	30		
		2.2.2 Dispositifs expérimentaux pour la stéréocorrélation d'images	32		
	2.3	Méthodes numériques et mesures	35		
		2.3.1 Recherche de l'axe de rotation par optimisation	35		
		2.3.2 Mesure de l'angle de conicité	36		
	2.4	Résultats	38		
		2.4.1 Chutes libres	38		
		2.4.2 Axe fixe en soufflerie	40		
	2.5	Discussion sur les résultats	43		
	2.6	Ce qu'il faut retenir	44		

Liste des symboles

3	Réa	lisation d'une micro éolienne bioinspirée	45		
	3.1	Introduction	46		
	3.2	Analyse des samares réelles	46		
		3.2.1 Numérisation 3D	46		
		3.2.2 Répartition de masse	48		
	3.3	Choix du procédé de fabrication	49		
		3.3.1 Procédés classiques	49		
		3.3.2 Fabrication additive	50		
	3.4	Conception	51		
		3.4.1 Samare artificielle	51		
		3.4.2 Conception d'hélices	53		
	3.5	Micro éolienne	55		
		3.5.1 Fabrication d'hélices par stéréolithographie	56		
		3.5.2 Génératrice électromagnétique	58		
		3.5.3 Micro éolienne complète	60		
	3.6	Ce qu'il faut retenir	61		
4	Essais en soufflerie et résultats				
	4.1 Introduction				
	4.2	Mesures des puissances et des pertes	64		
		4.2.1 Puissance générée	65		
		4.2.2 Pertes dues à la rotation	66		
		4.2.3 Pertes résistives dans la bobine	68		
	4.3	Comparaison des paramètres influents	69		
		4.3.1 Angle de calage	70		
		4.3.2 Angle de conicité	72		
		4.3.3 Nombre de pales	73		
		4.3.4 Validité du choix	75		
	4.4	Résultats pour l'hélice optimale	76		
		4.4.1 Puissance produite par la micro éolienne	77		
		4.4.2 Évolutions du coefficient de puissance et du rendement	79		
		4.4.3 Retour sur l'état de l'art	81		
	4.5	Ce qu'il faut retenir	83		
С	onclus	sion générale	85		
B:	bligg	ranhia	80		
л	onogi		02		

Liste des symboles

Tous les symboles ci-dessous sont utilisés en unités SI.

Α	Aire balayée par l'éolienne
b	Envergure de l'aile ou de la pale
с	Longueur de corde du profil
C_0	Couple de démarrage (frottements secs) dans les roulements à billes
C_f	Couple de frottements dans les roulements à billes
C_L	Coefficient de portance, rapport de la portance sur la force du vent sur le rotor : $\frac{L}{\frac{1}{2}\rho A U_0^2}$
C_D	Coefficient de trainée, rapport de la trainée sur la force du vent sur le rotor : $\frac{D}{\frac{1}{2}\rho AU_0^2}$
C_P	Coefficient de puissance, rendement mécanique de l'hélice : $\frac{P_{meca}}{\frac{1}{2}\rho AU_0^3}$
D	Force de trainée (drag)
f_h	Fréquence de rotation de l'hélice
Iosc	Impédance de l'oscilloscope branché en parallèle de la résistance de charge
K_{v}	Coefficient de frottements visqueux dans les roulements à billes
L	Force de portance (lift)
L/D	Finesse ou rapport portance-trainée
Ν	Vitesse de rotation en trs.min ⁻¹
N_p	Nombre de pales d'une hélice
Pelec	Puissance électrique en sortie de la génératrice
P _{meca}	Puissance mécanique sur l'arbre en sortie d'hélice
Pvent	Puissance cinétique du vent sur l'hélice
$P_f^{(-)}$	Pertes de puissance par frottements dans les roulements à billes
$P_J^{(-)}$	Pertes de puissance par effet Joule dans la bobine de la génératrice

Re	Nombre de Reynolds, rapport des effets d'inertie sur les effets visqueux : pour une pale, $\frac{U_0.c}{v}$
R_{ch}	Résistance de charge dans laquelle se décharge la génératrice
R _{int}	Résistance interne à la génératrice
R_{eq}	Résistance équivalente
S	Surface portante de l'aile ou de la pale
U_0	Vitesse du vent en amont du dispositif
U_{rel}	Vitesse du vent relatif incident sur la pale
V_{eff}	Tension efficace (RMS) mesurée dans la résistance de charge
α	Angle d'attaque, angle entre la corde du profil et le vent (avion)
$lpha_c$	Angle de calage, angle entre la corde du profil de pale et son plan de rotation
$lpha_i$	Angle d'incidence, angle entre la corde du profil de pale et le vent apparent (éolienne)
β	Angle de conicité, angle entre le corps de la samare et le plan perpendiculaire à son axe de rotation
η	Rendement global de l'éolienne
η_{gene}	Rendement de la génératrice
λ	Vitesse spécifique, rapport de la vitesse en bout de pale sur la vitesse du vent : $\frac{R.\omega}{U_0}$
v	Viscosité cinématique de l'air : $15.10^{-6} \text{ m}^2 \text{.s}^{-1}$ à 20°C
ρ	Masse volumique de l'air : 1,204 kg.m ^{-3} à 20°C
ω	Vitesse de rotation en rad. s^{-1}
ω_0	Vitesse de rotation de lancement pour l'essai "let it roll"

Introduction générale

L'Internet des Objets (IdO), aussi connu sous son équivalent anglais *Internet of Things* (IoT), vise à connecter des objets du quotidien à l'internet de manière à leur donner la capacité de dialoguer à distance. Ils communiquent ainsi des informations entre eux et avec des utilisateurs, pour améliorer leur comportement ou simplement pour informer (température de l'air, consommation d'une batterie, localisation d'une voiture...). On estime aujourd'hui le nombre d'objets connectés à environ 12,5 milliards, et les projections annoncent jusqu'à 30 milliards d'entre eux dans le monde en 2030.



FIGURE 1 – Différents objets qui peuvent faire partie de l'Internet des Objets (source : Tado°).

Ce manuscrit se focalise plus particulièrement sur une catégorie seulement de ces objets connectés, les capteurs autonomes. Ces capteurs, comme tous les objets connectés, doivent évidemment être alimentés en énergie pour fonctionner. Le plus souvent, cela est fait à l'aide de batteries qui fournissent de l'énergie au système pendant un certain temps, avant de devoir être rechargées ou remplacées. Cela mène à des quantités impressionnantes de batteries nécessaires, bien que l'on sache aujourd'hui que ces produits ne présentent pas les meilleures caractéristiques, tant fonctionnelles qu'écologiques. De plus, cela ne participe pas à rendre les capteurs plus autonomes, car leur maintenance est nécessaire régulièrement. C'est pourquoi il est souvent proposé de se tourner vers la récupération d'énergie : il est possible de se servir du milieu ambiant afin d'en extraire de l'énergie, qui servira directement à alimenter un capteur communicant. Les systèmes utilisés doivent donc produire suffisamment de puissance et nécessiter peu d'entretien afin de concurrencer les batteries.

Alors, plusieurs sources existent dans ce but : le solaire, l'éolien, le vibratoire et le thermique. Les capteurs étant souvent utilisés à l'intérieur des bâtiments, l'énergie du vent présente une bonne densité

de puissance : c'est elle qui est l'objet de ces recherches. Par conséquent, des récupérateurs éoliens sont utilisés : ils doivent ainsi être miniaturisés afin de respecter les dimensions des capteurs alimentés, pour rester suffisamment discrets. Les prototypes développés sont donc des micro éoliennes, dont les règles de conception et les performances sont mal maitrisées.

La question de recherche à laquelle ces travaux tentent de répondre est alors la suivante : est-il possible de concevoir un système de récupération d'énergie éolienne de 4 cm de diamètre ou moins, basé sur une géométrie d'éolienne horizontale, dont le rendement total dépasse 10% ?

Le premier chapitre du manuscrit dresse un état de l'art assez global. Il vise les consommations de capteurs communicants, les sources potentielles d'énergie exploitables, les technologies existantes d'éoliennes de petite échelle avant de finir par des pistes d'amélioration de ces prototypes par le biomimétisme. En effet, il apparait que les conditions aérodynamiques dans lesquelles agissent les micro éoliennes sont similaires à celles observées chez certains spécimens vivants, notamment les graines d'érable (aussi appelées samares) qui tournent lors de leur chute libre. Par ailleurs, elles sont bien différentes des régimes très turbulents présents à grande échelle : une rupture au niveau de la géométrie est nécessaire et se fonde dans ces travaux sur l'imitation de la nature.

De ce fait, le deuxième chapitre propose une étude approfondie du comportement des samares afin d'analyser leurs performances. Leur mouvement est capturé par deux caméras rapides dans le but de reconstruire leur position puis leur trajectoire en trois dimensions. Cela nous informe sur leur vitesse de rotation et/ou leur vitesse de chute instantanées. Deux situations sont mises en œuvre : dans le premier cas, les samares chutent verticalement, ce qui induit leur mouvement de rotation caractéristique. Leurs vitesses verticale et de rotation sont étudiées. Dans une deuxième configuration, leur rotation est contrainte sur un axe horizontal, l'objectif étant de se rapprocher du fonctionnement des pales d'éoliennes. Les différences entre les deux situations sont décrites.

Puis, le troisième chapitre expose le déroulement de la conception des hélices bioinspirées et de leur fabrication. D'après les résultats du chapitre 2, une samare réelle sert de modèle à la conception des pales. Plusieurs géométries d'hélices sont proposées avec certains paramètres variables, afin par la suite de déterminer la meilleure d'entre elles et par conséquent le meilleur choix de paramètres. Les difficultés liées au procédé de fabrication sont présentées. De plus, la conversion mécanique/électrique est assurée dans la micro éolienne par une génératrice électromagnétique réalisée au CEA de Grenoble.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre vise dans un premier temps à comparer les performances des hélices fabriquées afin de sélectionner la version optimale. Afin de respecter l'objectif initial, ces essais sont effectués à de faibles vitesses de vent. Dans un second temps, l'efficacité de la micro éolienne est vérifiée en mesurant les puissances développées pour une large gamme de vents. Le coefficient de puissance, le rendement de la génératrice ainsi que le rendement total sont calculés et mis en relation avec les valeurs de la littérature. Finalement, la validité du choix initial du biomimétisme est discutée puis confirmée.

chapitre 1

Des capteurs autonomes vers le biomimétisme

"En recherche, on ne peut pas se contenter de boites : il faut les ouvrir." Léonida Granon, le 10 octobre 2017 lors de sa soutenance de thèse

Sommaire

1.1	Introduction	
1.2	Application et sources pour la faible récupération d'énergie 4	
	1.2.1 L'application visée : les capteurs autonomes communicants	
	1.2.2 Différentes sources d'énergie	
	1.2.3 Les sources et micro sources d'énergie éolienne	
1.3	Efficacité des profils d'ailes	
1.4	Récupérateurs d'énergie éolienne de petites dimensions	
	1.4.1 Éoliennes à axe horizontal	
	1.4.2 Autres types de récupérateurs éoliens 19	
1.5	Études concernant des spécimens biologiques	
	1.5.1 Les samares	
	1.5.2 Les animaux volants	
	1.5.3 Biomimétisme	
1.6	Ce qu'il faut retenir	

1.1 Introduction

Le concept de récupération d'énergie (*energy harvesting* en anglais) est aujourd'hui ancré dans notre société. Il fascine de plus en plus de chercheurs et d'industriels, qui investissent du temps et de l'argent pour toujours développer de nouveaux systèmes plus performants. Son principe est globalement d'utiliser des sources d'énergie qui sont naturellement présentes dans notre environnement, et qui se dissipent sans être exploitées. Ces sources sont multiples et de différentes natures : solaire, éolienne, vibratoire... Nous le voyons surtout à grande échelle, avec principalement les champs d'éoliennes et de panneaux solaires qui se développent dans le monde entier. Mais de nombreux développements et applications concernent de plus petites dimensions, et donc de plus petites puissances récupérées utilisées afin d'alimenter des systèmes électroniques : c'est le domaine des microsystèmes électromécaniques (MEMS pour l'acronyme anglais), qui intéressent beaucoup les chercheurs depuis quelques années. Ces MEMS exploitent des microsources d'énergie, et servent alors par exemple à faire fonctionner des nœuds capteurs communicants, qui deviennent donc autonomes en énergie (plus de batterie externe qui se décharge avec le temps et qui doit être rechargée ou changée). On appelle nœud capteur un capteur communicant qui s'insère dans un réseau de plusieurs capteurs sans fil interconnectés.

L'attention se focalise plus particulièrement sur l'énergie provenant du vent. En effet, il existe quasiment en permanence des flux d'air en extérieur d'au moins 1 m.s^{-1} , voire en intérieur. Ceux-ci sont donc exploitables par des systèmes de type micro éoliennes. Nous nous penchons donc ici sur le fonctionnement des capteurs communicants afin de comprendre dans quelle mesure les dispositifs de microrécupération d'énergie sont capables de les alimenter. Puis, un état des derniers développements des micro éoliennes est fait, afin de définir les objectifs de ce travail de recherche.

1.2 Application et sources pour la faible récupération d'énergie

1.2.1 L'application visée : les capteurs autonomes communicants

Cette section est simplement présentée ici comme un cahier des charges à notre application, afin de se fixer un seuil de puissance générée à atteindre en fonction de la cible visée.

De nombreux travaux portent sur l'étude des nœuds capteurs sans fil, autonomes ou non, et notamment sur la réduction de leur consommation. Comme il est représenté en figure 1.1, en utilisant la récupération d'énergie, un nœud capteur peut être alimenté de deux manières. L'énergie récupérée est soit envoyée directement au nœud, soit stockée (dans une batterie interne par exemple) puis transmise au capteur lorsque celui-ci en a besoin. La première solution n'est utilisable que si le système de récupération d'énergie produit suffisamment de puissance pour répondre aux besoins du capteur en continu. La deuxième solution est intéressante si le capteur est optimisé, c'est-à-dire si son fonctionnement se fait par cycles espacés de quelques secondes ou quelques minutes.

En ce qui concerne l'architecture, un nœud capte des informations de l'environnement extérieur (température, pression, luminosité, présence etc.), mais il ne peut pas fonctionner seul : il doit être relié à un microcontrôleur (μ C) qui traite les informations, et à une puce radio-fréquences (RF) qui envoie les données. Des modules ou plateformes sont souvent composées de ces deux systèmes électroniques, ce qui permet d'y connecter facilement des nœuds capteurs et d'utiliser leurs mesures. Cette structure est représentée sur la figure 1.2. Pour la suite, nous faisons la distinction entre un "nœud capteur" désignant le nœud seul, et un "capteur" désignant un nœud capteur relié à un module {microcontrôleur + puce RF}. La figure 1.2 schématise les différentes étapes du cycle de fonctionnement d'un capteur, et le système de stockage utilisé pour pouvoir l'alimenter.

Concernant la consommation énergétique, une revue de littérature de 2015 résume les méthodes d'optimisation des besoins de différents capteurs de gaz [3]. Les consommations de puissance de com-



FIGURE 1.1 – Alimentation d'un capteur via la récupération d'énergie [1].



FIGURE 1.2 – Cycle de fonctionnement intermittent d'un capteur autonome communicant [2]. (i) Stockage de l'énergie dans un buffer (batterie ou autre), tous les circuits électroniques sont en veille, (ii) Démarrage du microcontrôleur et interrogation du capteur, (iii) Envoi de l'information par RF, (iv) Retour en mode veille, en attente d'un nouveau cycle.

posants couramment utilisés sont détaillées et sont reportées dans le tableau 1.1. On voit rapidement que les dispositifs de transmission/réception, les puces RF, sont bien plus gourmands en puissance que les autres composants. Cela est bien visible également dans les travaux de Moschitta *et al.* [4]. La plateforme ez430-RF2500 de Texas Instruments est testée sans capteur externe, et son cycle de fonctionnement est analysé. Les phases de transmission et de réception requièrent beaucoup de puissance : environ 82 mW et 75 mW respectivement. La veille du module consomme quant à elle seulement 2,3 µW.

Un autre article datant de 2016 concerne la récupération d'énergie pour les réseaux de nœuds capteurs sans fil [1]. La consommation de plateformes de nœuds capteurs commerciales y est analysée : les résultats sont reportés dans le tableau 1.1. Le fait de passer du mode actif au mode veille requiert également de l'énergie, mais le mode veille permet de réduire drastiquement la consommation ce qui est bien sûr intéressant.

Des capteurs détecteurs de gaz sont également étudiés dans plusieurs travaux. Un prototype (mesurant aussi la température et l'humidité) est conçu par Llosa *et al.*, avec pour but de s'inclure dans un réseau de nœuds capteurs [5]. Le contrôle et la communication sont assurés par un module ZigBit. En optimisant sa consommation électrique par l'utilisation des nanotechnologies, ils parviennent à un maximum de 30 μ W : il s'agit alors d'une optimisation portant plutôt sur la technologie utilisée. Une autre équipe a tenté de réduire la consommation d'un capteur fabriqué par NTC IGD (Russie) [6]. Le capteur est utilisé avec un microcontrôleur AtXmega32A4 et un module de communication sans fil ETRX3. La puissance nécessaire au fonctionnement est passée de 225 mW (dont 193 mW pour le capteur) à seulement 2,54 mW en utilisant notamment la méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion. Dans ce cas, l'amélioration est associée à une gestion énergétique.

Par ailleurs, Xiao *et al.* ont étudié la possibilité d'alimenter un capteur de température sans fil par fréquences radio [7]. Pour un cycle de fonctionnement complet, la consommation totale du capteur est de 18 mW. D'autre part, un nœud capteur de température seul destiné à des applications sans fil et nécessitant encore moins de puissance a été présenté par Lin *et al.* [8]. Sur une plage de fonctionnement de 0°C à 100°C, la consommation de celui-ci n'est que de 200 nW à 310 nW, sous une tension de 1 V.

Enfin, une équipe du CEA-LETI à Grenoble a répertorié les besoins énergétiques de différents capteurs et composants électroniques [2]. Leurs consommations ainsi que celles des systèmes précédemment cités sont répertoriées dans le tableau 1.1 ci-dessous.

Composant	Consommation moyenne	
Nœud capteur de température	220 nW [8]	
Montre	1-5 μW [2]	
Nœud accéléromètre 3 axes	30 µW [2]	
Détecteur de gaz avec nanomatériaux	30 µW [5]	
Nœud capteur de température TMP102 (Texas Instruments)	33 µW [3]	
Microcontrôleur MSP430F247 (Texas Ins- truments)	Veille : 3 µW, Actif : 1 mW [3]	
Nœud capteur d'humidité 808H5V5 (Sencera)	1,25 mW [3]	
Détecteur de gaz DTK (NTC IGD)	2,54 mW [6]	
Plateforme MicaZ (Memsic, Inc.)	2,8 mW [1]	
Microcontrôleur ATxmega32A4 (Atmel)	Veille : 2,1 µW, Actif : 3,3 mW [3]	
LED	1-10 mW [2]	
Plateforme iMote2 (Intel Research)	12 mW [1]	
Capteur de température alimenté par RF	18 mW [7]	
Récepteur GPS	70 mW [2]	
Puce RF CC2430 (Texas Instruments)	Trans. : 81 mW, Récep. : 75 mW [3]	
Plateforme ez430-RF2500 (Texas Instru- ments)	Veille : 2,3 µW, Trans. : 82 mW, Récep. : 75 mW [4]	
Puce RF ETRX35X (Telegesys)	Trans. : 93 mW, Récep. : 75 mW [3]	

TABLE 1.1 – Consommation de composants électroniques et de capteurs utilisés dans des réseaux de nœuds capteurs sans fil.

Ce tableau révèle que les composants les plus gourmands sont les puces RF pour la communication des données (environ 80 mW), bien que celles-ci ne fonctionnent pas en continu. Dans ses travaux de thèse, Huet s'est intéressé à la plateforme présentée dans [4], utilisée avec un accéléromètre consommant 320 μ W [9]. En étant alimentée par un générateur qui produirait seulement 100 μ W, elle pourrait réaliser sa procédure de mesure et de transmission toutes les 5,3 s, ce qui reste très correct. Cela donne une idée du niveau de puissance à atteindre avec notre micro éolienne : un minimum de 50 μ W est souhaitable,

afin de garantir un bon fonctionnement du système alimenté.

1.2.2 Différentes sources d'énergie

Afin de générer de l'énergie à partir de l'environnement, de nombreuses sources sont disponibles. Chacune d'elles possède ses avantages et inconvénients, et sa densité de puissance (la puissance qu'elle produit par mètre carré ou par mètre cube). Les plus courantes sont répertoriées dans le tableau 1.2; les densités de puissances des batteries sont également indiquées, afin de comparer leur "efficacité" à celle de la récupération d'énergie.

Source d'énergie	Densité de puissance $(\mu W.cm^{-2} \text{ ou } \mu W.cm^{-3})$	
Solaire (extérieur)	15000	
Flux d'air (5 m.s ⁻¹)	7500	
Solaire (intérieur)	100	
Vibrations	100	
Flux d'air (1 m.s ⁻¹)	60	
Gradients thermiques (10°C)	15	
Radio-fréquences	5	
Batteries lithium	45	
Batteries lithium rechargeables	7	

TABLE 1.2 – Différentes sources d'énergie (récupérables ou non) avec leur densité de puissance disponible [9].

Le solaire et l'éolien affichent les puissances disponibles les plus importantes, ce qui explique que les récupérateurs se servant de ces ressources soient largement utilisés. Le solaire est surtout présent à de grandes échelles, avec des champs de panneaux photovoltaïques ou sur les toits des maisons par exemple, et présente un rendement correct. L'éolien est aussi très développé en extérieur, sur terre ou en mer, avec des machines récupérant jusqu'à plusieurs mégawatts. La puissance étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, les densités de puissance sont encore plus élevées à 10 ou 15 m.s⁻¹. Concernant les énergies non renouvelables, comme les batteries, elles ne sont pas vraiment compétitives face à certaines sources naturelles : même à 1 m.s⁻¹, l'éolien produit plus de puissance par centimètre carré.

Ainsi, de nombreux récupérateurs d'énergie ambiante MEMS sont développés depuis plusieurs années. Les récupérateurs d'énergie vibratoire ont par exemple été améliorés par rapport à leurs dimensions : à faibles fréquences et faibles accélérations, le dispositif de Huet produit 8 μ W [9], et celui de Chamanian *et al.* par exemple délivre jusqu'à 125 μ W [10]. Un récupérateur utilisant des "radioétiquettes" RFID conçu par Ferdous *et al.* propose une puissance très intéressante de 3,36 mW maximum [11]. Des avancées notables ont également été faites pour les éoliennes de petites dimensions, mais cela fait l'objet d'une partie suivante.

Des systèmes plus originaux existent aussi pour utiliser les ressources naturelles. Une aile marine flexible de $2,5 \times 2,5$ m² est par exemple en phase de prototype chez *EEL Energy*, et génère plusieurs mégawatts par un mouvement d'ondulation. La saphonienne de *Saphon Energy* est un type d'éolienne qui n'est pas limité en rendement comme les modèles classiques, avec un mouvement de rotation très particulier et breveté; une autre génératrice non standard est développée par *TyerWind*, et s'inspire du mouvement des ailes du colibri pour produire jusqu'à 1 kW.

Nous nous focalisons dans toute la suite de ce manuscrit sur l'énergie qui nous intéresse plus particulièrement, à savoir l'éolien.



(a) La Saphonienne, une éolienne sans pale (source : Saphon Energy).



(b) L'éolienne imitant le comportement du colibri (source : Tyer Wind).

FIGURE 1.3 – Deux systèmes alternatifs et innovants.

1.2.3 Les sources et micro sources d'énergie éolienne

Le vent est une source d'énergie propre et renouvelable; elle est de plus en plus exploitée dans le monde entier, et les installations se développent à grande vitesse. Cette ressource offre une bonne alternative aux énergies non renouvelables dans certaines villes, et est utile dans des lieux isolés [12]. Les technologies utilisées sont sûres et maîtrisées, et extraient des puissances allant jusqu'à 8 MW pour des rotors de plus de 150 m de diamètre, très souvent pour des éoliennes off-shore.

La majorité des éoliennes en fonctionnement a besoin de vents suffisamment forts, et sont donc placées stratégiquement dans des sites propices. En France par exemple, un projet de construction éolienne est considéré comme rentable si la vitesse moyenne annuelle du vent sur le site dépasse les 7 m.s⁻¹. Même les éoliennes de petites dimensions, avec un diamètre inférieur à 40 cm, démarrent avec une vitesse de vent supérieure à 2 m.s⁻¹ [13, 14]. De nouvelles technologies d'éoliennes peuvent alors être développées, afin d'exploiter les vents en deça de 2 m.s⁻¹ : il est donc important de localiser les sources possibles de vents très faibles.

Pour étudier la possibilité d'implanter des éoliennes de taille standard (diamètre du rotor allant de 10 m à plus de 100 m), ou simplement pour les données météorologiques, les études de vent sont très souvent réalisées à au moins 10 m de hauteur. Ainsi, plusieurs articles rapportent les vitesses de vent dans différents endroits du monde, mesurées à 10 m ou 40 m de hauteur [12, 15–21]. La vitesse moyenne est alors comprise entre 3 et 10 m.s⁻¹ : les valeurs pour chaque localisation sont détaillées dans le tableau 1.3. Une étude en Turquie concernant la performance d'une pompe à chaleur sol-eau fournit également des informations sur la vitesse du vent, dans la ville de Denizli en 2008 [22]. Enfin, des historiques de données météorologiques sont disponibles en ligne pour certaines villes de France (www.tameteo.com).

Certaines études s'intéressent aux vitesses de vent à l'intérieur de différents types de bâtiments. Ainsi, un prototype miniature de pièce fermée surmontée d'une tour à vent a été réalisé [23]. La tour à vent permet une circulation de l'air dans la pièce depuis le vent extérieur. Les résultats montrent qu'avec une vitesse extérieure entre 0,5 et 5 m.s⁻¹, la vitesse moyenne de l'air à l'intérieur varie entre 0,09 et $0,99 \text{ m.s}^{-1}$. D'autres auteurs ont étudié la ventilation naturelle dans les bâtiments, encore une fois avec des prototypes miniatures [24]. Par exemple, le comportement d'un courant d'air a été mesuré, entre deux portes ouvertes et dans la direction du vent à l'extérieur. Dans ce cas, avec un vent à 10 m.s⁻¹ à l'extérieur, la vitesse moyenne intérieure est de 3 m.s⁻¹. La qualité de l'air fait aussi l'objet d'analyses, ce qui mène notamment à mesurer sa vitesse : à l'intérieur d'un appartement, d'une garderie et d'un bureau à Paris [25], ou encore dans des centres commerciaux en Chine en été [26]. La vitesse moyenne de l'air reste alors faible : entre 0,8 et 1,5 m.s⁻¹ à Paris, et entre 0,11 et 0,19 m.s⁻¹ en Chine. Une autre étude présente des mesures de vitesses d'air dans une étable au Danemark [27]. Avec une vitesse moyenne extérieure de 3,85 m.s⁻¹, le vent est mesuré en différents endroits dans le bâtiment : les vitesses sont comprises entre 0,1 et 1,2 m.s⁻¹.

Ainsi, les courants d'air sont souvent de l'ordre de 1 m.s⁻¹ en intérieur, mais ne sont pas du tout

Emplacement	Vitesse moyenne $(m.s^{-1})$
Est et sud-est de l'Iran [15]	4,47 - 8,81
Sud-est de l'Iran [16]	3,27 - 5,41
Inde [17]	4,7 - 5,6
Masdar (Émirats arabes unis) [18]	3,06
Roumanie [19]	6 - 10
Pologne [20]	6,9
Oklahoma (USA) [21]	2,8 - 5,5
Denizli [22]	0,43 - 2,28
Nantes (France), 2017	2,8 - 3,8
Paris (France), 2017	2,5 - 3,8
Annecy (France), 2017	1,6 - 2,7
Marseille (France), 2017	3,9 - 6,1

 TABLE 1.3 – Vitesses de vent en extérieur relevées dans différents endroits dans le monde.

exploités pour récupérer leur énergie. Cela est pourtant possible grâce à des récupérateurs éoliens de petites dimensions s'implantant facilement dans des pièces ou des couloirs. Un état des lieux des derniers développements et recherches concernant les micro éoliennes est proposé plus loin. Mais avant cela, il est nécessaire de mieux comprendre le comportement des profils de pales à des vitesses de vent faibles, afin de faire les bons choix et d'avoir la meilleure efficacité possible.

1.3 Efficacité des profils d'ailes

L'étude de l'aérodynamique des profils mérite une attention particulière. Les pales des éoliennes ont une géométrie avec un profil particulier, semblable au profil des ailes d'avion (figure 1.4a). Cette forme a pour but de maximiser la portance L (force qui soulève l'aile) et de minimiser la trainée D (force qui ralentit l'aile); ces forces sont représentées sur la figure 1.4b. On leur associe les coefficients de portance C_L et de trainée C_D comme les rapports de ces deux forces sur la force du vent arrivant sur le profil :

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho A U_0^2}$$
 et $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho A U_0^2}$, (1.1)

avec ρ la densité de l'air, A la surface projetée du profil et U_0 la vitesse du vent en amont du profil.

La différence entre les ailes d'avion et les ailes d'éoliennes est le vrillage : il est nul pour les avions (les ailes sont "plates"), alors qu'il est présent pour les éoliennes. Cela est dû à la rotation ω de l'hélice, qui induit une vitesse tangentielle le long des pales. Celle-ci est proportionnelle à la distance à l'axe $R : \|\vec{V}_{pale/sol}\| = R\omega$. Cela est schématisé en figure 1.5 : l'angle d'attaque α pour les profils d'avion est appelé angle d'incidence α_i pour les pales d'éoliennes. Il apparait entre la corde du profil (droite passant par le bord d'attaque et le bord de fuite) et la vitesse relative du vent par rapport à la pale $\vec{V}_{vent/pale}$. Un autre angle est introduit, α_c : appelé angle de calage, il définit l'écart fixé entre la corde et le plan de rotation de l'hélice. Pour un fonctionnement optimal, l'objectif est que l'angle d'incidence reste constant tout au long d'une pale, alors que la vitesse $\vec{V}_{pale/sol}$ va augmenter. L'angle de calage est donc utile à cela,



(a) Une aile d'avion d'envergure b avec son profil de corde de longueur c.



FIGURE 1.4 – Profil d'aile (source : Energie+).

puisqu'il va varier le long d'une pale; il va diminuer en s'éloignant de l'axe de rotation afin que la corde reste à un angle constant de $\vec{V}_{vent/pale}$. C'est cette variation de α_c qui va donner aux pales leur vrillage.



FIGURE 1.5 – Les différents angles au niveau d'un profil de pale, par rapport à son plan de rotation et au vent apparent.

Les profils classiques utilisés sont appelés les profils NACA (du National Advisory Committee for Aeronautics), et sont classés afin de les identifier facilement. Les références sont notées NACA MPXX : M désigne la cambrure maximale en pourcentage de la corde, P désigne la position de la cambrure maximale par rapport au bord d'attaque en dizaine de pourcentage de la corde et XX indique l'épaisseur maximale en pourcentage de la corde [28]. Ainsi, des profils non cambrés ou symétriques seront notés NACA 00XX. De nombreuses études ont porté sur l'analyse des performances de ces profils, à différentes vitesses de vent. Pour ces travaux, et comme en général en mécanique des fluides, le flux d'air est caractérisé notamment par une grandeur sans dimension, le nombre de Reynolds. Pour une pale, il est défini comme ceci :

$$Re = \frac{U_0 c}{v} \tag{1.2}$$

où U_0 est la vitesse du vent en amont de la pale, et v la viscosité cinématique de l'air. Cette grandeur indique la nature du flux : laminaire si 0 < Re < 2000, ou turbulent si Re > 2000. Comme la viscosité cinématique est constante (à température constante), la valeur du nombre de Reynolds est seulement proportionnelle à la vitesse du vent et à la longueur de corde. Nous recherchons avec la micro éolienne à exploiter des courants d'air à faibles vitesses : ainsi, ces deux paramètres sont petits, ce qui mène à des valeurs de nombres de Reynolds faibles. Le flux est alors laminaire ou faiblement turbulent, ce qui diminue les performances des profils à cause des pertes visqueuses de trainée et de l'épaisseur de la couche limite plus importante. À cause de cela, les profils de pales doivent être conçus différemment de ceux des éoliennes de grandes dimensions ou de ceux des ailes d'avion : en effet, ces derniers fonctionnent à des nombres de Reynolds bien plus élevés, de l'ordre de 10^6 [29, 30]. Nous nous intéressons donc ici plus particulièrement au comportement des profils à faibles nombres de Reynolds, c'est-à-dire inférieurs à 10^5 .

Des profils NACA symétriques ou plats ont été étudiés par de nombreux chercheurs [31–34]. Pour cela, ils mesurent en général les forces de portance L et de trainée D en faisant varier l'angle entre la direction du vent et le profil, noté α . Un paramètre souvent évalué également est le rapport de ces deux forces, appelé la finesse :

$$Finesse = L/D = C_L/C_D \tag{1.3}$$

L'effet de l'épaisseur de l'aile est examiné par Kunz, avec des profils NACA 0002, 0004, 0006 et 0008, à Re = 2000 et Re = 6000 [31]. Globalement, il remarque que plus le profil est fin, plus le coefficient de portance est bon, et plus la finesse est bonne avant le décrochage (phénomène caractérisé par un angle α qui entraine une chute brutale de la portance et donc du coefficient de portance). Un nombre de Reynolds plus faible ne fait pas diminuer la portance, mais il fait augmenter le coefficient de trainée, et donc diminuer la finesse : l'aile est moins efficace. Au contraire, Sheldahl et Klimas trouvent que pour $10^5 < Re < 10^6$, un profil NACA 0015 est plus intéressant qu'un NACA 0009 : le coefficient de portance est plus important juste avant le décrochage, alors que le coefficient de trainée reste sensiblement à la même valeur [32]. Cela soulève un changement de comportement intéressant et montre qu'à faibles Reynolds ($Re < 10^5$), il faut se tourner vers des profils les plus fins possibles afin de maximiser la force de portance. Deux autres équipes de chercheurs ont étudié l'évolution de la portance et du flux aval pour un profil symétrique NACA 0012 [33, 34]. Les paramètres variables sont l'angle d'attaque α et $Re: 0^{\circ} < \alpha < 180^{\circ}$ et $5300 < Re < 1.5.10^{5}$ (très faibles Reynolds). La vitesse du vent correspondante est comprise entre 0,05 et 4 m.s⁻¹. Pour ces expérimentations, un phénomène intéressant est à noter : le décrochage n'apparait pas pour *Re* très faible (5300), alors qu'il apparait pour $\alpha \approx 12^{\circ}$ à partir de $Re = 10^4$. Ce décrochage est caractérisé par l'éclatement de la bulle de séparation qui apparait à la transition avec le régime turbulent (sur l'extrados du profil, la face supérieure). Ainsi, pour un nombre de Reynolds assez faible, il n'y a pas de transition donc pas d'apparition de bulle de séparation, et le flux reste laminaire. Le coefficient de portance augmente donc continuellement jusqu'à $\alpha \approx 45^{\circ}$. À des nombres de Reynolds plus importants, la portance est maximale juste avant le décrochage, puis elle diminue, et augmente de nouveau jusqu'à $\alpha \approx 45^{\circ}$ (figure 1.6). Le comportement est similaire à $Re \approx 10^5$ pour des profils légèrement cambrés destinés à des pales d'éoliennes de grandes dimensions [35].

Parallèlement, la trainée et donc le coefficient de trainée augmentent pour α allant de 0 à 90°, pour être maximale à 90°. La meilleure finesse est donc obtenue juste avant le décrochage, là où le coefficient de portance est maximum et où la trainée reste très faible.

L'effet de la cambrure des profils sur la finesse a aussi été investigué, et les données sont nombreuses sur ce sujet. Kunz a par exemple comparé un NACA 0002 et un 4402, pour Re = 1000, 2000 et 6000 [31]. Globalement, la cambrure a un effet positif sur la finesse et l'efficacité de l'aile : C_D augmente légèrement, mais C_L augmente de façon beaucoup plus importante. Pour Re = 1000, la finesse passe de 4,5 à 5,4 grâce à la cambrure, et de 9,3 à 11 pour Re = 6000. Sunada *et al.* obtiennent les mêmes résultats : après avoir testé différents profils (NACA ou profils plats), ils en déduisent qu'une cambrure de 5%*c* est le meilleur choix pour avoir la finesse maximale [36]. Dans une étude de 1997, Laitone parvient à peu



FIGURE 1.6 – Évolution du coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque à différents nombres de Reynolds, pour un profil NACA 0012 [33].

près aux mêmes conclusions en s'intéressant à un NACA 0012, à un profil plat (1,3%c) d'épaisseur) et à un profil plat cambré (5%c) en arc de cercle), de longueur de corde c = 3, 1 cm [37]. Les nombres de Reynolds choisis sont inférieurs à 7.10^4 . Quelle que soit la valeur de Re, le meilleur profil est toujours le profil plat cambré, avec une finesse de 13,3 pour $Re = 2.10^4$. L'efficacité du profil NACA 0012 est très affectée par la valeur de Re, alors que celles des profils plats ne le sont pas : pour le NACA, un plus grand Re implique une finesse plus élevée, ce qui est parfaitement logique.

La position de la cambrure a également un effet : pour cela, Kunz a testé des profils à $Re = 1, 2.10^4$ avec une cambrure maximale de 2, 4 et 6%*c* et une position de la cambrure à 30, 50 et 70% de la corde. Les valeurs de finesses maximales qu'il trouve pour chacun sont données dans le tableau 1.4. Finalement, la cambrure à 70%*c* entraine toujours un L/D plus important, et on remarque que le profil le plus fin a des performances globalement meilleures.

	Finesse maximale pour cambrure maximale à :			
Cambrure maximale	30%c	50%c	70%c	
2%c	14,7	14,8	15,4	
4%c	13,7	13,9	15,7	
6%c	10,4	11,5	14,8	

TABLE 1.4 – Finesse maximale pour chacun des profils cambrés à $Re = 1, 2.10^4$ [31].

Sunada *et al.* parviennent quant à eux à un résultat différent pour des profils plats : le meilleur rapport L/D intervient lorsque la cambrure maximale est positionnée à 25% de la corde [36, 38]. Une étude similaire a été menée par Chen et Bernal : ils ont testé des profils particuliers servant pour des machines volantes autonomes, dont les ailes seraient recouvertes par des cellules solaires [39]. Ainsi, cinq profils ont été utilisés : quatre possédant des facettes plates (nommés BC) dont trois cambrés, et un souvent choisi pour un fonctionnement à faibles nombres de Reynolds (SD 7080). Les valeurs de *Re* pour ces travaux varient de 6.10⁴ à 2,5.10⁵. Une conclusion évidente est que plus *Re* est grand, plus *C_L* est grand au moment du décrochage, mais aussi plus l'angle α correspondant à ce décrochage est grand (autour

de $10-15^{\circ}$). Le profil BC symétrique (BC S127) montre des résultats moins satisfaisants comparé aux trois autres profils BC et au profil SD : une portance plus faible et une trainée plus grande. Par contre, les trois profils BC cambrés et plus particulièrement le plus fin (BC 3X92) sont plus intéressants que le SD 7080 : C_L est plus important et C_D est plus faible pour tous les *Re* testés, ce qui entraine une meilleure finesse. Ainsi, certains profils assez particuliers et peu utilisés se révèlent plus efficaces que certains plus "classiques".

Enfin, il est possible d'estimer l'efficacité des profils ou même d'un rotor d'éolienne par simulation numérique, afin de l'optimiser avant de passer à la fabrication. Pour cela, deux grands outils sont connus : le code XFOIL, relativement simple et appliqué aux profils d'aile, et le Computational Fluid Dynamics (CFD) qui gère toutes sortes de problèmes de mécanique des fluides. Un groupe de chercheurs s'est intéressé à ces deux solutions afin de savoir laquelle choisir pour des cas à faibles *Re* (de l'ordre de 10^5) [40]. La méthode CFD est ici utilisée via le logiciel *Ansys Fluent*. Finalement, ils concluent que le code XFOIL donne de très bonnes prédictions par rapport au comportement réel, et même meilleures que le CFD quel que soit le modèle choisi. De plus, un grand atout de XFOIL reste qu'il est facile d'utilisation. Malheureusement, aucune étude ne concerne des nombres de Reynolds plus faibles ; mais nous savons que pour $Re \approx 10^5$, XFOIL est le meilleur choix si une résolution numérique est nécessaire.

Afin de choisir un profil pour des pales fonctionnant à faibles/très faibles *Re* qui soit le plus efficace possible, nous retenons grâce à ces études que :

- le profil doit être très fin : 2 à 4% de la corde,
- il doit être cambré : environ 5% de la corde,
- une cambrure maximale plus proche du bord de fuite que du bord d'attaque est préférable.

La figure 1.7 représente par exemple un profil choisi par Bastankhah et Porté-Agel pour un prototype de micro éolienne d'après les conclusions de Kunz : il présente une épaisseur et une cambrure maximales de 5% de la corde [41].



FIGURE 1.7 – Profil de pale choisi par Bastankhah et Porté-Agel pour une micro éolienne d'après les travaux de Kunz. Ici, le bord d'attaque et le bord de fuite sont identiques et pointus [41].

Grâce à ces profils, des pales puis des rotors d'éoliennes ou de micro éoliennes fonctionnant à faibles/très faibles Reynolds sont créés. La section suivante présente les développements qui ont été menés sur la thématique des micro récupérateurs d'énergie éolienne.

1.4 Récupérateurs d'énergie éolienne de petites dimensions

Il existe différents types de systèmes exploitant l'énergie du vent : parmi eux, les principaux sont l'éolienne à axe horizontal (qui est simplifié en "éolienne horizontale" dans la suite), l'éolienne à axe vertical ("éolienne verticale"), et la membrane oscillante. Les éoliennes horizontales sont les plus connues et les plus largement utilisées, pour notamment une raison : leur rendement est nettement supérieur à celui des éoliennes verticales [42]. C'est pourquoi nous nous focalisons sur cette technologie dans la suite de ce travail. Néanmoins, quelques solutions d'éoliennes verticales particulières et de membranes oscillantes seront présentées.

Globalement, les différents récupérateurs ont la même architecture :

- un convertisseur dont le mouvement est induit par la force du vent, et qui transforme la puissance cinétique du vent P_{vent} en puissance mécanique de la partie mobile P_{meca} ,
- un système de conversion mécanique/électrique qui transforme *P_{meca}* en une puissance électrique de sortie *P_{elec}*.

Le passage entre deux étages s'opère avec un rendement très variable compris entre 0 et 100%. Le rendement lors de la première conversion mécanique/mécanique est appelé le coefficient de puissance, noté C_P . Il traduit seulement l'efficacité de la partie mobile à extraire l'énergie du vent. Un autre rendement apparait entre P_{meca} et la sortie de la génératrice, qui sera noté η_{gene} . Dans la plupart des cas ce dernier est très correct, aux alentours de 80% quel que soit le système utilisé. Par contre, la valeur de C_P est toujours limitée à un maximum de 59,3% d'après la théorie de Betz : c'est une caractéristique intrinsèque à l'écoulement d'un fluide [43]. En effet, le vent en amont du dispositif ayant une vitesse U_0 ne peut pas être ralenti jusqu'à une valeur nulle au niveau de l'hélice U_1 , car cela ne satisferait pas le principe de conservation de la masse. Si l'on note *a* le facteur d'interférence axial tel que $U_1/U_0 = 1 - a$, il est démontré grâce aux équations de Bernoulli que le rendement mécanique C_P s'écrit :

$$C_P = 4a(1-a)^2 \tag{1.4}$$

Ainsi, pour a = 0 ou a = 1 (soit $U_1 = U_0$ ou $U_1 = 0$) le rendement mécanique est nul, et il atteint son maximum pour a = 1/3 ($U_1 = 2/3.U_0$) avec une valeur de 16/27, soit 59,3%.

Finalement, la réunion de ces deux rendements donne le rendement total du système η , tel que $\eta = C_P \eta_{gene}$.

Dans l'état de l'art qui suit sont présentées des éoliennes d'environ 1 m de diamètre et moins. Cette plage ne représente pas que les micro éoliennes, qui sont plutôt de l'ordre de 10 cm et moins; mais grâce à cela, les changements qui surviennent lorsque les dimensions deviennent très faibles sont mis en lumière.

1.4.1 Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes horizontales sont constituées de plusieurs pales en liaison avec un axe de rotation. Comme leur nom l'indique, leur axe est colinéaire à la direction du vent (horizontal). Elles sont aujourd'hui très majoritairement utilisées, notamment à grande échelle dans les parcs éoliens. A grande échelle, la conversion mécanique/électrique est quasiment toujours effectuée à l'aide d'une génératrice électromagnétique. A plus petite échelle, d'autres solutions sont envisageables et ont été étudiées, comme les conversions piézoélectrique, triboélectrique ou encore électrostatique. Néanmoins, la solution électromagnétique reste la plus présente dans les systèmes développés.

Singh *et al.* conçoivent en 2013 une pale d'éolienne de 1,26 m de diamètre, pour un fonctionnement à faibles nombres de Reynolds (0,75.10⁵-2.10⁵). La pale est choisie après une série de simulations numériques sur différents profils, et sa forme est adaptée d'après ceux-ci (profil nommé AF300). Les simulations sont effectuées avec le code XFOIL et avec Ansys CFX. La pale est fabriquée puis testée expérimentalement, et ses performances de portance et trainée sont trouvées très proches des résultats numériques : pour ces valeurs de Reynolds, les simulations donnent de très bons résultats. Les auteurs déduisent ainsi que pour $Re = 10^5$, le rapport L/D maximal est de 54 à $\alpha = 8^\circ$. Une éolienne est ensuite constituée grâce à deux pales AF300. Finalement, pour un diamètre de 1,26 m, elle est capable de générer jusqu'à environ 70 W à $U_0 = 7,2$ m.s⁻¹, et montre un rendement total η maximal (et non un coefficient de puissance comme il est indiqué dans l'article!) de 29,1%. La vitesse du vent pour son démarrage est située entre 2,3 et 3 m.s⁻¹. Cette éolienne propose des puissances relativement importantes, et son rendement est également correct [29,44].

L'équipe américaine de Priya et al. travaille énormément sur le développement d'une mini éolienne de 40 cm de diamètre fonctionnant à des vents faibles, appelée SWEPT (Small-scale Wind Energy Portable Turbine). Une première étude est menée dans le cadre de ce projet en 2010. Le but est de charger une batterie de téléphone portable de 5 V grâce à une éolienne nomade de petites dimensions. Un comparatif de trois pales est fait, pour choisir la plus efficace à faibles vitesses de vent. Un rapport de réduction de 80:10 est utilisé entre l'arbre de l'hélice et celui de la génératrice, afin d'augmenter sa vitesse de rotation et son rendement. La résistance de charge associée à la génératrice est également optimisée : sa valeur optimale diminue quand la vitesse du vent augmente, et elle est située entre 1300 et 100 ohms pour 2 m.s⁻¹ < U_0 < 4,9 m.s⁻¹. L'hélice démarre à seulement 2,2 m.s⁻¹. La production électrique pour cette première version de la SWEPT est de 100 mW à $U_0 = 3,1 \text{ m.s}^{-1}$, et atteint 500 mW à 4,9 m.s⁻¹. Le rendement global de l'éolienne ou le coefficient de puissance ne sont pas indiqués, mais les valeurs ne dépasseraient pas 10% [13]. Après des modifications améliorant les performances de la SWEPT, le coefficient de puissance de l'hélice monte à 32% avec un rendement global de 21%, avec un train d'engrenages ou en prise directe. L'éolienne produit 1 W à la vitesse de vent nominale de 4 m.s⁻¹, et jusqu'à 9,8 W à 10 m.s⁻¹. La vitesse de rotation de l'hélice reste assez faible, 1600 trs.min⁻¹ pour $U_0 = 5,5 \text{ m.s}^{-1}$. La vitesse spécifique λ , qui est le rapport entre la vitesse en bout de pale $R\omega$ et la vitesse du vent U_0 (équation 1.5), s'étend de 0 à 6 pour toutes les vitesses de vent. La valeur de 6 est très bonne malgré une vitesse de rotation faible et est expliquée par le rayon assez important de l'éolienne (20 cm). Le coefficient de puissance est maximal pour $\lambda \approx 4$.

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_0} \tag{1.5}$$

Lors de ces études, les chercheurs utilisent une technique intéressante pour mesurer le couple sur l'arbre de l'hélice, sans besoin de capteur de couple. En mesurant ω et en traçant son évolution dans le temps, on détermine le couple grâce à la formule suivante, avec J le moment d'inertie de l'hélice complète :

$$C = J \frac{d\omega}{dt} \tag{1.6}$$

Cela décrit l'évolution du couple créé par l'hélice lors de son accélération, mais pas lors de sa rotation stabilisée (la dérivée de ω est alors nulle). Les auteurs proposent également l'utilisation d'un "diffuseur" autour de l'éolienne, qui accélère le vent à l'arrivée sur l'hélice. Sa forme est optimisée, et une fois mis en place il augmente la puissance électrique générée d'un facteur 1,4 à 1,6 par rapport au fonctionnement libre [45–47].

Une éolienne de taille similaire, 31 cm de diamètre, a été développée par Vardar *et al.*. Le travail est porté sur l'optimisation de l'hélice et des pales, avec quatre profils d'aile NACA fabriqués en Balsa et testés : NACA 0012, 4412, 4415 et 23012. Plusieurs paramètres sont modifiés afin de trouver la solution offrant les meilleurs performances : le nombre de pales, l'angle de vrillage des pales (différence entre l'angle en pied et en bout de pale), et la valeur de l'angle de calage en pied de pale. Les profils NACA les plus intéressants sont le 4412 et le 4415, qui sont des profils non symétriques et qui sont plus intéressants que les symétriques comme nous l'avons vu plus haut. La finesse L/D va de 19-20 à 35-36 pour U_0 allant de 1 à 6 m.s⁻¹ (soit un nombre de Reynolds très faible de 10³ à 6.10³), ce qui est très bon pour une éolienne de cette taille. Cela se ressent sur le coefficient de puissance qui atteint 42,5% avec une hélice composée de quatre pales NACA 4415. La vitesse spécifique λ vaut 13,3 au maximum, grâce à une vitesse de rotation maximale *N* de l'hélice de 3077 trs.min⁻¹, bien plus élevée que pour l'étude précédente. Néanmoins, le coefficient de puissance de 42,5% n'est pas atteint pour cette vitesse de rotation mais à une valeur un peu plus faible [48].

Une équipe de l'EPFL a mis au point très récemment une éolienne miniature de 15 cm de diamètre, dont le coefficient de puissance atteint presque 40% pour une vitesse de vent de 8 m.s⁻¹ et une vitesse spécifique de 4. Aucune valeur de puissance électrique récupérée n'est fournie. Pour leur prototype, ils utilisent comme profil de pale un profil fin (5% de la corde) et cambré (5% de la corde également), ce qui correspond aux critères discutés dans la partie précédente pour de faibles nombres de Reynolds. Ce profil

avec l'angle d'attaque choisi donnent une valeur de finesse de 13 [41,49]. De plus, les auteurs expliquent que la valeur du coefficient de puissance n'est pas seulement limitée par la loi de Betz : d'après la théorie de Schmitz, elle est aussi influencée par la finesse, et elle est d'autant plus faible que cette dernière est faible, comme le montre la figure 1.8.



FIGURE 1.8 – Coefficient de puissance atteignable $C_{P,ach}$ en fonction de la vitesse spécifique λ et de la finesse L/D [41].

La technologie piézoélectrique est préférée en tant que convertisseur pour une étude de Myers *et al.*. Le dispositif de récupération d'énergie est en fait constitué de trois éoliennes à axe horizontal en décalage radial, d'environ 13 cm de diamètre chacune. Elles sont reliées à un boitier contenant le générateur, qui est composé de 18 bimorphes piézoélectriques de $60 \times 20 \times 0.6$ mm³. La puissance générée est de 5 mW à $U_0 = 4.5$ m.s⁻¹, avec une vitesse de démarrage assez élevée de 2.4 m.s⁻¹ [50].

En-dessous de 10 cm de diamètre, Xu *et al.* ont développé une éolienne de 7,6 cm de diamètre, basée sur une hélice du commerce à quatre pales. Les tests ont été effectués avec un vent entre 3 et 4,5 m.s⁻¹; l'éolienne génère jusqu'à 18 mW à 4,5 m.s⁻¹, et possède un rendement total η de 8%. Les auteurs décrivent par ailleurs un modèle électrique équivalent pour la simulation du comportement mécanique des éoliennes [51]. L'équipe de Priya au Texas a travaillé également sur des éoliennes plus petites que leur SWEPT, avec deux prototypes de 7,2 cm de diamètre. Le premier datant de 2014 utilise une génératrice piézoélectrique. La vitesse de vent pour son démarrage est très faible, 1 m.s⁻¹, et elle produit 450 µW à 1,9 m.s⁻¹. Elle atteint un rendement C_P de 11% pour une vitesse spécifique λ de seulement 0,7 [52]. La deuxième éolienne est un peu plus efficace : elle produit de 2,29 à 227,41 mW pour U_0 allant de 2 à 11 m.s⁻¹, ce qui correspond à un rendement total η maximal d'environ 15% [53]. La dimension réduite commence à faire chuter le coefficient de puissance et donc le rendement total des dispositifs.

Des chercheurs italiens se sont plus particulièrement penchés sur le circuit d'extraction d'un prototype d'éolienne, et sur la gestion de la résistance de charge pour générer le plus de puissance. L'hélice a un diamètre de 6,3 cm et quatre pales, mais aucune indication supplémentaire sur son design n'est donnée. Le système produit une puissance de 2 mW à 2,4 m.s⁻¹ ($\eta = 3\%$) et 10 mW à 4,6 m.s⁻¹ ($\eta = 6\%$) [54].

Deux études portent sur des dispositifs avec un diamètre d'environ 4 cm. La première vise à comparer la performance de trois hélices à quatre pales, de 4,2 cm de diamètre. Pour celle de référence, avec un angle de calage des pales important (46°), le rendement total η est de 1,5% à 5,5 m.s⁻¹ (2,4 mW produits) et de 9,5% à 11,8 m.s⁻¹ (130 mW produits). Le rendement de la génératrice étant assez faible, 50% au maximum; le coefficient de puissance C_P atteint quant à lui des valeurs impressionnantes au vu des faibles dimensions : environ 18% pour l'hélice de référence, et jusqu'à 25% pour les deux autres [55]. Il est donc bien possible d'obtenir un C_P très correct malgré la petite taille des éoliennes. D'autres travaux ont été réalisés au CEA dans le cadre de la thèse de Matthias Perez : une micro éolienne de 4 cm de diamètre a été fabriquée et assemblée. Un des objectifs était le fonctionnement à très faibles vitesses de vent, et il est atteint puisque l'hélice démarre pour U_0 à seulement 1 m.s⁻¹, avec une production de 66 µW. La puissance monte à 1,7 mW à 10 m.s⁻¹, et C_P a une valeur maximale de 9%. Un paramètre optimisé est la vitesse de rotation de l'hélice N qui va jusqu'à 7000 trs.min⁻¹; malgré cette valeur importante, la vitesse spécifique λ est de seulement 1,8 à $U_0 = 10 \text{ m.s}^{-1}$ [43,56].

Une des plus petites micro éoliennes dans la littérature est un modèle de 2 cm de diamètre, avec un carénage de 3,2 cm de diamètre au total, de Howey *et al.*. Le design de l'hélice est particulièrement soigné, avec un profil de pale NACA 4402 choisi d'après les travaux de Kunz : en effet, nous sommes ici à des Reynolds de l'ordre de 2000. La longueur de corde c est de 3 mm, avec une hélice à douze pales. Pour générer le courant, seize paires d'aimants de 2 mm de diamètre sont insérés dans l'hélice, avec un bobinage fixe dans le carénage (figure 1.9). Cela permet de ne pas perdre de place au niveau de l'axe de rotation à cause de l'encombrement d'une génératrice classique.



FIGURE 1.9 – La micro éolienne carénée de 3,2 cm de diamètre avec douze pales, à côté d'une pièce de 1 livre. À droite, l'hélice avec six pales et avec les aimants pour la génération de puissance [57, 58].

Ce récupérateur fonctionne à des vents relativement faibles : le démarrage se fait à $U_0 = 3 \text{ m.s}^{-1}$. La puissance électrique en sortie est de 80 µW à 3 m.s⁻¹, 2,5 mW à 7 m.s⁻¹ et 4,3 mW à 10 m.s⁻¹. Le coefficient de puissance maximal est de 9%, pour une valeur de λ de seulement 0,6, ce qui est correct au vu des dimensions. La vitesse de rotation *N* est maximale à 5000 trs.min⁻¹ pendant les expérimentations : néanmoins, le maximum de puissance n'est pas forcément généré à cette valeur, mais à des vitesses plus faibles pour des vents plus faibles [57,58].

Enfin, la turbine complète la plus petite qui ait été construite vient de l'Imperial College de Londres, comme la précédente; son diamètre extérieur est de seulement 7,5 mm. Son moyen de conversion est semblable à celui utilisé par Howey *et al.* : il s'agit d'aimants placés sur le rotor, et de bobinage sur deux stators en amont et en aval. Par contre, elle fonctionne à des vitesses de vent très élevées, aux alentours de 40 m.s⁻¹. À cette vitesse de vent, le rotor tourne à 30 000 trs.min⁻¹; la puissance générée est de 1,1 mW par stator, soit 2,2 mW au total, ce qui correspond à un coefficient C_P très faible de 0,4% [59].

Afin de résultats de ces travaux, le graphique en figure 1.10 reprend toutes les valeurs du coefficient C_P et/ou du rendement total η , par rapport au diamètre de l'hélice du prototype.

Les valeurs de C_P sont assez loin de la valeur maximale atteignable, correspondant à la limite de Betz de 59,3%. Les récupérateurs qui s'en rapprochent le plus ont un diamètre de 15 à 40 cm, ce qui n'est pas dans le domaine des micro éoliennes. Pour la zone qui nous intéresse plus particulièrement, colorée en vert, le meilleur rendement est de 15% pour un diamètre de 7 cm et le meilleur C_P est de 25% pour 4 cm. Pour des dimensions encore plus petites, le coefficient de puissance ne dépasse pas 10%. Ainsi, il y a encore une grosse progression possible à des diamètres de l'ordre du centimètre : les dispositifs existants sont à seulement 1/6 de la valeur maximale de rendement mécanique.



FIGURE 1.10 – Résumé des valeurs de coefficient de puissance et de rendement total pour les articles cités précédemment.

Concernant la forme et le nombre de pales des éoliennes, Hau a établi en 2006 un graphique représenté en figure 1.11. Celui-ci reprend le coefficient de puissance de différentes configurations en fonction de la vitesse spécifique (*tip-speed ratio* en anglais), fondé sur la théorie de Schmitz [60].



FIGURE 1.11 – Évolution du coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes, en fonction de la vitesse spécifique [60].

Cet abaque illustre bien le fait que le nombre de pales est fortement lié à la vitesse spécifique λ : pour une efficacité optimale, le choix ne se fait pas au hasard. Nous nous rendons compte également que la limite de Betz est difficilement atteignable, et que le coefficient de puissance maximal est d'environ 50% pour une hélice à trois pales, à une vitesse spécifique d'environ 7. Pour les micro éoliennes présentées cidessus, la vitesse spécifique reste à des valeurs très faibles, de l'ordre de 2 : d'après l'abaque, il est donc difficile de monter au-dessus d'un coefficient de puissance de 30% pour une éolienne horizontale. Dans cette gamme de vitesses spécifiques, le type d'éolienne le plus efficace est l'éolienne dite "américaine" (utilisée à la base pour le pompage) qui possède un nombre bien plus important de pales que les autres types (une dizaine au minimum). La géométrie des moulins hollandais, à quatre pales rectangulaires, est également intéressante pour des valeurs de λ entre 2 et 4.

1.4.2 Autres types de récupérateurs éoliens

Il existe principalement deux autres types de récupérateurs d'énergie éolienne que l'éolienne horizontale : l'éolienne verticale et la membrane oscillante. Ici, nous allons nous attarder sur des prototypes de petites dimensions ou sur des technologies innovantes non conventionnelles, qui permettent d'améliorer le rendement et donc la génération de puissance.

Éoliennes à axe vertical

Les éoliennes verticales sont intéressantes par leur démarrage à faibles vitesses de vent et par leur rendement correct. Malgré cela, peu d'études de miniaturisation ont été menées. Perez a montré dans sa thèse que pour des systèmes centimétriques, les éoliennes horizontales atteignent des taux de puissances surfaciques plus intéressants que les éoliennes verticales.

Karami *et al.* ont analysé le comportement d'un prototype d'éolienne verticale de type Savonius, d'encombrement $8 \times 8 \times 17$ cm³, avec une génération de courant réalisée par des transducteurs piézoélectriques. La vitesse de vent U_0 pour le démarrage est faible : seulement 2 m.s⁻¹. Deux positionnements des films piézoélectriques sont testés, et la puissance générée est de 4 mW à un vent de 10 m.s⁻¹ avec un seul transducteur [61]. Le fonctionnement d'une autre éolienne verticale de type Darrieus de petites dimensions (12 cm de diamètre) est étudiée numériquement [62]. Sa particularité est que l'angle de calage des pales n'est pas fixe comme sur les modèles classiques, mais il est variable pour exploiter le vent au maximum (figure 1.12a). Cela permet d'obtenir un coefficient de puissance maximal de 38% à 10 m.s⁻¹. L'inconvénient est que ce dispositif rend l'éolienne sensible aux fluctuations de la direction du vent. Afin de garder de bonnes performances, il serait nécessaire d'ajouter un système de contrôle de l'angle de calage afin de le régler en fonction du vent.

Un autre moyen trouvé par Korprasertsak *et al.* pour augmenter les performances d'une éolienne verticale est l'ajout d'un "booster", qui guide et accélère le vent (figure 1.12b). Les chercheurs étudient numériquement une solution pour une éolienne de 40 cm de diamètre, puis réalisent des tests expérimentaux qui montrent une très bonne corrélation avec les simulations. Grâce à ce booster, la vitesse de rotation du rotor augmente de 50%, et le coefficient de puissance passe de 13% à 43% [63].

Une autre étude concerne une éolienne verticale à angle de calage variable, à faible vitesse spécifique λ et donc faibles vitesses de vent ($U_0 < 1 \text{ m.s}^{-1}$), mais avec une stratégie différente. L'angle de calage est ici commandé activement en fonction de la direction du vent : il y a donc nécessité d'avoir une source de puissance externe, ce qui est un inconvénient pour la récupération d'énergie. Les pales de dimensions $15 \times 30 \text{ cm}^2$ sont placées perpendiculairement à la direction du vent à l'aller : elles fonctionnent comme des pales d'une Savonius, en opposition au vent. Au retour, elles sont à l'inverse placées en drapeau, dans le sens du vent, pour avoir le moins de force appliquée possible qui les freineraient. Aucune valeur de puissance récupérée n'est fournie [64]. De la même manière, Pierre Dieudonné a mis au point le prototype *Eolprocess*. Il s'agit d'une éolienne verticale avec des pales qui suivent la direction du vent, à la manière d'une voile de bateau. Le fonctionnement est le même que le précédent, mais sans contrôle actif de l'angle de calage [65].



(a) Éolienne Darrieus à angle de pale variable [62].

(b) Booster pour Savonius qui accélère le vent arrivant sur les pales [63].

FIGURE 1.12 – Deux systèmes innovants pour des éoliennes verticales.

Enfin, des éoliennes verticales existent avec des pales constituées de plusieurs panneaux horizontaux, qui s'escamotent quand le mouvement de la pale est dans le sens contraire du vent, afin de ne pas la freiner [66]. D'après des tests avec des pales de $48 \times 60 \text{ mm}^2$, le meilleur C_P est de 21% pour un vent de 9 m.s⁻¹, ce qui est correct avec des dimensions si faibles [67].

Membranes oscillantes

Les membranes oscillantes, ou membranes aéroélastiques, sont un autre moyen d'extraire l'énergie du vent, en utilisant le phénomène que l'on peut observer sur des drapeaux qui flottent au vent par exemple (*fluttering* en anglais). Elles sont le plus souvent couplées à un système de conversion piézoélectrique. Il en existe différents types, qui sont répertoriés dans la revue de Truitt *et al.*. Il est par exemple possible de s'inspirer du fonctionnement de l'harmonica : le vent est conduit dans une chambre horizontale, et va passer par une petite fente ce qui va entrainer l'oscillation d'une fine membrane piézoélectrique perpendiculaire à la direction du vent. Les utilisations plus fréquentes sont faites avec des membranes placées dans la direction du flux d'air; l'encastrement est alors soit en amont de la membrane, soit en aval. Dans ce dernier cas, un solide appelé corps non profilé est fixé à l'autre extrémité de la membrane, en amont, et va vibrer grâce aux vortex créés autour de lui (figure 1.13a). Les systèmes référencés produisent de 4 μ W à 53 mW, avec une densité d'énergie de 88 à 30285 μ W.cm⁻³ [68].

Les membranes libres sont très étudiées et de plus en plus utilisées pour la récupération d'énergie, mais pour des vitesses de vent élevées, supérieures à 10 m.s⁻¹. Une étude théorique montre par exemple qu'avec une membrane de 58×20 cm², le démarrage se fait à 8 m.s⁻¹. Le système de conversion n'est pas piézoélectrique ici mais électromagnétique : un matériau conducteur est déposé sur la membrane, et celle-ci est placée entre deux panneaux magnétiques. La production théorique (avec des approximations concernant les rendements notamment) serait d'environ 45 kW à 26 m.s⁻¹ [70]. Perez *et al.* ont développé un système miniature, couplé cette fois-ci à une conversion électrostatique : la membrane a des dimensions de seulement 50×15 mm². Les coefficients de puissance trouvés sont très faibles, encore plus que pour les micro éoliennes : seulement 0,55% à $U_0 = 30$ m.s⁻¹, ce qui correspond à une production de 2,1 mW [69]. Pour la conversion piézoélectrique, il est possible de recouvrir entièrement la membrane d'un bimorphe, ou bien d'utiliser plusieurs "patchs" piézoélectriques de plus faibles dimensions. Dans ce cas, l'étude du couplage entre les patchs est importante [71]. Une application marine et à grandes dimensions de la membrane libre a été conçue par *EEL Energy* et parait très prometteuse : il s'agit d'une aile de 15×15 m², produisant jusqu'à 1 MW à un courant de 2,5 m.s⁻¹ [72].

Il est possible d'utiliser également les membranes équipées de corps non profilés pour alimenter des réseaux de capteurs. Par exemple, le fonctionnement d'un prototype miniature a été simulé par éléments



(a) Générateur utilisant un corps non profilé et deux membranes piézoélectriques, avec encastrement en aval : le corps va osciller dans la direction perpendiculaire à celle du vent [68].



(b) Membrane libre : l'oscillation se fait de haut en bas [69].



finis puis testé expérimentalement par une équipe allemande. Ce type de structures oscille grâce aux tourbillons de von Karman, qui se développent à des nombres de Reynolds entre 50 et 10^4 juste derrière le corps. La puissance extraite et générée atteint 108 µW à $U_0 = 45$ m.s⁻¹, ce qui reste très faible malgré les faibles dimensions (membrane de 42×12 mm²). Il serait possible d'après d'après les chercheurs de récupérer 10 mW en optimisant la céramique piézoélectrique [73]. Une étude théorique d'une équipe américaine s'est intéressée à l'optimisation de la géométrie du corps sur un système déjà développé. En fonction de celle-ci, carrée ou trapézoïdale, le système peut fonctionner à des *Re* très faibles, entre 10^3 et 8.10³. La vitesse de vent de démarrage est de l'ordre de 2 m.s⁻¹. Un panneau de 1 m² équipé de plusieurs prototypes, opérant à un rendement de 10% et à $U_0 = 10$ m.s⁻¹, permettrait de produire 54 W [74].

Enfin, un système miniature est développé par *Humdinger Wind Energy*. Il consiste en une membrane de 12×0.7 cm² qui va vibrer sous l'effet du vent; la différence avec les membranes précédentes est qu'elle est placée perpendiculairement à la direction du vent (figure 1.14). Elle est capable de démarrer à partir de courants d'air à 3 m.s⁻¹, et elle peut produite 200 μ W à 3,5 m.s⁻¹, 2 mW à 5,5 m.s⁻¹ et 5 mW à 7,5 m.s⁻¹ [75].



FIGURE 1.14 – La µicroWindbelt de Humdinger : la membrane au milieu vibre sous l'effet du vent [75].

Finalement, ces deux types de récupérateurs éoliens peuvent être intéressants à petite échelle; leur principal inconvénient est que les vitesses de vent nécessaires sont assez élevées. Comme il est déjà mentionné plus haut, nous nous intéressons seulement aux éoliennes horizontales dans la suite de ces travaux.

1.5 Études concernant des spécimens biologiques

Certains fonctionnements présents dans la nature sont très intéressants et sont proches des comportements que nous observons sur les éoliennes horizontales et leurs pales. C'est pourquoi une étude de la littérature sur ce sujet est réalisée ici. Les spécimens intéressants sont les graines d'érable, ou samares, et les animaux volants de petite taille : ils peuvent nous amener à utiliser des profils d'ailes différents, qui seraient plus efficaces pour des dimensions centimétriques. Enfin, certaines tentatives d'utilisation d'observations de la nature dans des prototypes, qui sont dit "bioinspirés", sont décrits et analysés.

1.5.1 Les samares

Une samare est un fruit sec provenant d'arbres tels que l'érable, l'orme ou le frêne par exemple. Elle est composée d'une graine et d'une ou deux ailes : ce dernier cas n'est valable que pour la graine d'érable, la plus connue, qui est aussi appelée "disamare" et qui possède donc une forme d'aile asymétrique. La longueur totale des samares est très variable, de 1 cm à 18 cm pour les cas "classiques" [76], même si des spécimens plus grands encore existent notamment en Amérique du sud, jusqu'à 30 cm [77]. Les ailes des samares ont pour fonction de favoriser l'anémochorie : en effet, après leur chute depuis une branche, les graines utilisent les vents latéraux pour se disséminer, et ainsi toucher un périmètre le plus large possible autour de l'arbre, de quelques mètres jusqu'à plusieurs kilomètres [78,79].

Le mouvement de chute des samares débute avec une phase de transition, durant laquelle un mouvement aléatoire apparait. Elle est rapidement suivie d'une phase beaucoup plus stable : la samare décrit alors un mouvement de rotation rapide tout en chutant à une vitesse quasi-constante (figure 1.15a). Les vitesses de rotation mesurées dans différents travaux sont comprises entre 80 et 150 rad.s⁻¹, et les vitesses de chute sont d'environ 1 m.s⁻¹, pour tous types de samares d'érable [30, 76, 80–82]. La rotation propre de la samare crée alors une grande force de portance sur l'aile, malgré la faible surface de cette dernière et les faibles vitesses relatives de l'air. Grâce à cela, la graine tombe à une vitesse relativement faible, et s'éloigne de l'arbre auquel elle était accrochée lorsque les courants d'air latéraux le permettent [76]. La portance importante est causée par l'apparition d'un vortex de bord d'attaque sur la face supérieure de l'aile (figure 1.15b) [83]; ce phénomène est également observé pour certains insectes et oiseaux qui développent de grandes forces de portance de par la forme de leurs ailes [84–86].





(a) Chute d'une samare en phase stable : chute verticale avec une rotation dans le plan horizontal [81].

(b) Vortex de bord d'attaque [83].

FIGURE 1.15 – Comportement d'une samare en chute libre.

Norberg étudie en 1973 la stabilité en vol de graines d'érable de type Acer platanoides, en prenant

notamment en compte les positions des centres de masse, de rotation et de pression. Il souligne le fait que, comme pour un parachute, une samare tombe à vitesse constante; son accélération est donc nulle et la résultante des forces aérodynamiques qui lui sont appliquées est directement opposée à son poids. De plus, grâce à la rotation, les forces centrifuges stabilisent la graine et son angle de conicité (l'angle entre l'aile et le plan horizontal). Grâce à une série de photographies, il apparait que le centre de rotation est quasiment confondu avec le centre de gravité [76]. La position du centre de gravité nécessaire à l'autorotation est discutée dans d'autres travaux [82]. Ici, des expériences sont réalisées avec des samares réelles, mais également avec des petites plaques faites en polystyrène et en balsa, et avec des modèles de samares en balsa. Pour l'autorotation, le centre de gravité des modèles en balsa doit être placé dans la même zone que pour les samares réelles : au niveau de la graine, proche du centre de rotation. Un autre point très intéressant développé dans cet article est l'influence de la géométrie et de certaines caractéristiques physiques sur les vitesses de rotation et de chute notamment. Ainsi, les samares réelles sont légèrement modifiées, en changeant la position de leur centre de gravite et en diminuant la rugosité de leurs ailes : les résultats montrent que ces samares modifiées présentent des vitesses de rotation 15% plus faibles, et des vitesses de chute plus élevées. Cela laisse à penser que les spécimens non modifiés sont optimisés afin de répondre au mieux à leur fonction : tomber le plus lentement possible afin de s'éloigner de l'arbre.

D'autres auteurs décrivent un modèle théorique du vol des samares, et comparent ses résultats à ceux d'une précédente étude de Norberg [76], notamment pour la vitesse de chute, la vitesse de rotation et l'angle de conicité [80,81]. Une distribution des coefficients de portance et de trainée C_L et C_D est proposée, fondée sur de nombreuses données de la littérature provenant de recherches sur les ailes des oiseaux et des insectes. Cette distribution n'est donc pas exactement celle des samares, et amène une incertitude sur les résultats du modèle. Une samare artificielle est aussi réalisée en carton, et son mouvement en chute libre est analysé et comparé au modèle théorique. Les erreurs observées entre les résultats expérimentaux et théoriques sont assez importantes : jusqu'à 43% pour l'angle de conicité de la samare réelle. Des samares artificielles sont également utilisées dans les travaux de Ulrich et al., dans le but de concevoir un véhicule volant miniature inspiré des formes des ailes des samares et de leur comportement en vol. Quatre modèles sont fabriqués en résine par prototypage rapide (tolérance de fabrication de l'ordre de 10 µm). La position du centre de gravité est connue grâce à la CAO, et est maintenue constante entre les graines. De même, les masses et surfaces d'ailes sont gardées constantes, mais les formes et les longueurs des samares varient, afin de pouvoir mettre en évidence leur impact sur les caractéristiques de vol. Le modèle possédant une forme très différente de celle des samares réelles présente la vitesse de chute la plus élevée, et donc une efficacité a priori inférieure. Durant les tests de chute, les mouvements sont mesurés grâce à des caméras faisant des acquisitions à 350 images par seconde. Trois marqueurs sont placés sur les ailes sous forme de petits disques très fins, et ils sont éclairés par un stroboscope fonctionnant à la même fréquence que les caméras. Un suivi de marqueurs est réalisé et permet de connaitre leur position dans l'espace à tout instant. On montre ainsi que les samares tournent autour de leur centre de gravité pendant leur chute; ce point décrit lui-même un mouvement hélicoïdal vertical, dont la valeur du rayon r_{CG} est discutée. Enfin, les petites variations des angles de tangage et de roulis sont déterminées [87, 88]. Enfin, une étude originale s'intéresse à l'effet de couper une partie de l'aile ou de la graine sur le comportement pendant la chute. Étonnamment, toutes les samares, même celles qui ne présentent quasiment plus d'aile, gardent un comportement "normal". Malgré cela, la vitesse de chute augmente (de $0.94 \text{ à } 2.95 \text{ m.s}^{-1}$), la vitesse de rotation augmente aussi (de 77,9 \text{ à } 124,5 \text{ rad.s}^{-1}), et l'angle de conicité diminue (de 25,8 à 16,4°) [89].

Pour ce genre d'études, les auteurs utilisent souvent des stroboscopes ainsi qu'une unique caméra pour analyser les chutes des samares. Il est ainsi possible d'avoir un nombre important d'images de bonne qualité dans un laps de temps réduit [30, 82, 87].
1.5.2 Les animaux volants

Les animaux volants sont évidemment très intéressants pour ce qui est de l'aérodynamique. À de petites dimensions, les plus proches de nos applications sont les insectes et les très petits oiseaux, no-tamment le colibri. Perez s'est brièvement tourné vers cela lors de sa thèse : il a créé le graphique en figure 1.16 qui compare certains animaux, avec représentée en rouge la zone d'intérêt dans le cadre de ses travaux, qui correspond également à la nôtre (dimension < 10 cm et $Re < 10^4$).



FIGURE 1.16 – Exemples d'animaux et de structures existantes classées par nombre de Reynolds et par dimension. Sont indiqués en rouge des oiseaux et en vert des insectes (en bleu des animaux marins, en marron des mammifères et en noir des structures créées par l'homme) [43].

Globalement, les ailes des animaux sont assez proches de celles des samares au niveau du profil : un bord d'attaque est toujours présent (avec pour les animaux le passage des os, tendons, ligaments etc), puis l'aile devient plus fine pour finir en forme pointue sur le bord de fuite.

Les oiseaux possèdent des profils assez semblables aux profils de type NACA utilisés pour les avions ou les éoliennes de grande taille. Leurs ailes atteignent rapidement plusieurs dizaines de centimètres de longueur, avec des plumes qui modifient un peu leur géométrie. Le colibri est un des plus petits oiseaux connus : ses ailes et son corps ne mesurent que quelques centimètres [38]. De plus, c'est le seul oiseau à être capable de faire du vol stationnaire. En effet, les autres oiseaux n'effectuent une poussée que lors du mouvement des ailes vers le bas, la phase de montée devant générer le moins de trainée possible. Le colibri quant à lui applique une force grâce à ses ailes durant les deux phases, ce qui lui permet des mouvements beaucoup plus complexes. C'est pourquoi il est souvent considéré comme à la frontière entre les oiseaux et les insectes. Ces derniers peuvent également faire du vol stationnaire, et ont des battements d'ailes très rapides en aller-retour également. Les longueurs des ailes des plus petits spécimens sont en général comprises entre 1 et 10 mm, ce qui en fait d'excellentes inspirations pour nos micro éoliennes, tout comme les samares [90]. La structure des ailes est assez différente de celles des oiseaux : sur une libellule par exemple, le profil n'est pas lisse mais présente des nervures (figure 1.17).

À de très faibles Re, de l'ordre de 6.10^3 à 10^4 , ces nervures permettent aux insectes d'être plus efficaces et de développer une meilleure finesse qu'avec des profils classiques ou plats [38, 91, 92]. Cela est dû notamment à des vortex de recirculation qui apparaissent dans ces nervures et qui augmentent la force de portée. Ces nervures et ces vortex sont d'ailleurs aussi observés sur les ailes des samares.

Il apparait donc intéressant d'essayer de "copier" les géométries et les profils d'aile observés sur les



FIGURE 1.17 – Profil des ailes de libellule : nous remarquons bien de nombreuses nervures [38].

graines d'érable et sur les insectes, afin de concevoir des ailes de véhicules volants ou des pales de micro éoliennes de meilleure efficacité.

1.5.3 Biomimétisme

Beaucoup d'équipes de recherche à travers le monde se tournent aujourd'hui vers le biomimétisme. L'argument principal est que la nature a mis des millions d'années à faire évoluer les espèces vivantes afin qu'elles s'adaptent au mieux à leur environnement (il faut néanmoins être prudent avant d'affirmer que tout est "optimisé"). Si cet environnement et si le comportement de certaines espèces correspondent à nos besoins, alors il est judicieux de s'en inspirer, afin d'écourter peut-être la durée des tests et des améliorations à effectuer.

Il est intéressant de noter que le nombre de Reynolds lors du vol des samares et des animaux volants est relativement faible, de l'ordre de $10^3 - 10^4$ [30, 80, 81, 83, 87]. Ces valeurs correspondent à celles présentes pour les micro éoliennes comme nous l'avons vu précédemment. Cela inspire alors de nouvelles géométries pour les pales d'éoliennes de petites dimensions, qui optimiseraient la puissance du vent à faible vitesse. Selon cette idée, des travaux ont mené à une étude numérique du flux d'air arrivant sur une samare (figure 1.18a). L'efficacité de la graine a été simulée : les résultats donnent un rendement mécanique de 59,1% (pour un maximum de 59,3% donné par la limite de Betz), contre 45,8% pour une hélice d'éolienne de taille classique, en simulation également. Une samare a donc été numérisée pour cela; les auteurs vont même plus loin en proposant une rétro-conception d'une pale de micro éolienne, basée sur la forme de la samare étudiée (figure 1.18b) [93,94]. Enfin, une équipe de recherche a analysé le comportement mécanique de pales bioinspirées, dans le but de concevoir une éolienne à axe vertical de petites dimensions pour une utilisation urbaine [95].



(a) Maillage de la samare numérisée et du cylindre modélisant les limites du flux d'air.



(b) Pale d'éolienne de petites dimensions basée sur la géométrie de la samare.

FIGURE 1.18 – Étude numérique du comportement d'une samare et rétro-conception [93, 94].

L'exemple le plus connu de l'utilisation du biomimétisme est celui de l'entreprise *Festo* : une branche de recherche et innovation sur cette thématique a été créée en 2006, le Bionic Learning Network. Depuis, les ingénieurs ne cessent de développer des animaux robotisés aux comportement impressionnants : papillon, poisson, chauve-souris, oiseau, mais aussi kangourou, araignée... De manière similaire, une équipe de Singapour a mis au point un micro véhicule volant battant des ailes de seulement 15 g, capable de décoller, de se déplacer, de faire du vol stationnaire et d'atterrir. Il possède deux paires d'ailes, une fixe et une mobile, pour des dimensions totales de 22 cm d'envergure et 22 cm de hauteur. Le nombre de Reynolds évalué au niveau des ailes pendant les battements est d'environ 10^4 [96].

Certains travaux portent simplement sur la modification de la géométrie de solutions déjà utilisées, comme les ailes ou les pales d'éoliennes. Il est par exemple possible de faire reculer le décrochage à un angle d'attaque α plus élevé sur une aile, en utilisant une forme observée sur les nageoires des baleines [97]. D'autre part, un bord d'attaque cranté, inspiré des plumes de chouettes, réduit la force de trainée et le bruit par rapport à un bord d'attaque classique [98]. Des chercheurs japonais ont également testé des formes de pales coudées inspirées des ailes des oiseaux. Sur un prototype d'éolienne de 1 m de diamètre, une forme optimisée permet d'atteindre une valeur plus élevée de C_P qu'une forme rectangulaire, surtout à vitesses spécifiques élevées [99].

Un autre aspect largement étudié est l'utilisation d'ailes ou de pales battantes et/ou flexibles sur des récupérateurs d'énergie, évidemment fondée sur le fonctionnement des animaux aériens et marins. Une simple pale placée dans l'eau et utilisant les effets de marée peut servir à extraire de l'énergie : il apparait alors qu'en la rendant flexible (aux bords d'attaque et de fuite), son coefficient C_P et son rendement sont multipliés par deux [100]. De façon similaire, Cognet *et al.* ont implanté trois pales flexibles sur une éolienne horizontale de 30 cm de diamètre. Les pales s'adaptent donc aux conditions de vent de manière entièrement passive : l'éolienne fonctionne alors sur une plus large gamme de vitesses de vent, et génère une puissance 35% plus importante qu'avec des pales rigides [101]. Par ailleurs, certaines pales sont rendues plus efficaces en leur ajoutant un degré de liberté en tangage (d'avant en arrière selon leur axe de déplacement) : on les appelle alors battantes. Deux chercheurs algériens ont ajouté deux pales de ce type derrière chacune des pales classiques sur une éolienne verticale. Cette technique améliore grandement le flux et diminue les turbulences derrière les pales [102].

Des avancées concernant la récupération d'énergie éolienne fondées sur le biomimétisme ont déjà été menées; il reste néanmoins beaucoup de pistes à explorer.

1.6 Ce qu'il faut retenir

Ce premier chapitre cadre le domaine de travail proposé dans le manuscrit. Cela met en lumière certaines facettes de l'état de l'art qui peuvent être encore exploitées et approfondies.

Les nœuds capteurs et même certains capteurs complets avec microcontrôleur en mode veille n'ont besoin que de quelques dizaines de microwatts pour fonctionner. Cela donne un objectif de puissance à produire avec une micro éolienne. Les flux d'air qui vont nous intéresser sont ceux à faible vitesse : ils sont peu présents à l'extérieur mais apparaissent *a priori* souvent en intérieur (bureau, chambre, couloir...).

De par les ordres de grandeur des nombres de Reynolds à ces dimensions $(10^3 - 10^4)$, nous sommes à un point de basculement au niveau duquel les effets visqueux deviennent plus importants et les phénomènes "macroscopiques" disparaissent. Ceux-ci prennent une place prépondérante pour des flux complètement laminaires, avec $Re \le 10^2$. Dans cette gamme, des solutions drastiquement différentes de celles utilisées à de grandes dimensions doivent être trouvées, mais n'émergent pas encore des travaux de recherche dans le domaine. Les développements menés dans ce manuscrit se placent donc à une frontière entre les géométries d'éoliennes existantes (plusieurs pales avec un profil NACA sur un axe en rotation) et des systèmes radicalement différents exploitant au maximum les effets visqueux.

Pour la conception des prototypes, nous avons de nombreux exemples d'architectures possibles pour une éolienne horizontale d'un diamètre de l'ordre de quelques centimètres. Malgré tout, le problème du coefficient de puissance et donc du rendement η très faibles reste bien présent et non résolu. Afin de pallier cela, des pistes sont disponibles concernant le profil d'aile le plus adapté aux faibles nombres de Reynolds : un profil très fin et cambré est optimal. Une voie assez différente suivie dans ce manuscrit est celle du biomimétisme. Il s'agit alors d'étudier des spécimens naturels, en particulier les graines d'érable qui agissent également à des Reynolds de $10^3 - 10^4$, et d'ajuster le design du prototype en fonction des géométries de ces graines. Le système est alors plus efficace, car mieux adapté à son environnement de fonctionnement.

Pour résumer, la question de recherche qui est soulevée et à laquelle nous tentons de répondre dans les travaux présentés ici est la suivante :

Est-il possible de concevoir un système de récupération d'énergie éolienne de 4 cm de diamètre ou moins, basé sur une géométrie d'éolienne horizontale, dont le rendement total dépasse 10%?

${\rm Chapitre}\,2$

Étude expérimentale du comportement des graines d'érable

"Regardez profondément dans la nature et alors vous comprendrez tout beaucoup mieux." Albert Einstein

Sommaire

2.1	Intro	luction
2.2	Matéi	iel et dispositifs
	2.2.1	Spécimens d'étude
	2.2.2	Dispositifs expérimentaux pour la stéréocorrélation d'images
2.3	Méthe	odes numériques et mesures 35
	2.3.1	Recherche de l'axe de rotation par optimisation
	2.3.2	Mesure de l'angle de conicité
2.4	Résul	tats
	2.4.1	Chutes libres
	2.4.2	Axe fixe en soufflerie
2.5	Discu	ssion sur les résultats
2.6	Ce qu	'il faut retenir

2.1 Introduction

Afin de répondre à la question de recherche que nous nous posons et au vu des différentes études sur les spécimens naturels aérodynamiques, il est choisi de se tourner vers le biomimétisme. L'organisme vivant le plus apte à aider à dépasser les faibles rendements observés dans la littérature est la samare, présentée dans le chapitre précédent.

Les travaux concernant l'analyse des chutes des graines d'érables utilisent pour la majorité un stroboscope et une seule caméra [30, 82, 87]. L'étude présentée ici consiste à utiliser une autre méthode, la stéréocorrélation d'images (SCI) : celle-ci fournit une vision en trois dimensions des mouvements qui porte sur toute la géométrie des graines plutôt que seulement des marqueurs. Ainsi, les vecteurs vitesse de rotation et vitesse de chute sont parfaitement connus (non seulement leurs composantes verticales) : les paramètres des faibles mouvements latéraux sont mesurables.

De plus, aucune des études sur les samares n'a intégré des expérimentations avec leur axe de rotation fixé. Afin de faire un premier pas vers des pales de micro éoliennes bioinspirées, il est proposé de guider les samares sur un axe métallique de petit diamètre dans une soufflerie horizontale afin d'empêcher leur mouvement de translation horizontal. De cette façon, elles ne peuvent tourner qu'autour d'un centre de rotation fixé : nous étudions alors leur réaction avec un vent dont la vitesse est proche de leur vitesse de chute libre (autour de 1 m.s⁻¹).

Enfin, ce mouvement contraint peut inspirer de nouvelles technologies : il est comparable au mouvement des pales d'éoliennes. Des éoliennes de très petites dimensions, du même ordre de grandeur que les samares, fonctionneraient alors avec les mêmes caractéristiques, afin de tirer le meilleur parti des faibles débits d'énergie éolienne. Le principal problème avec les éoliennes de taille centimétrique est une très faible efficacité de leurs hélices, d'environ 10% maximum, et donc une plus petite puissance récupérée [51,55–58]. La solution proposée ici pourrait être un moyen de l'augmenter.

2.2 Matériel et dispositifs

2.2.1 Spécimens d'étude

Des graines d'érable du type *Acer palmatum* sont étudiées ici. Pour la première partie, qui concerne la mesure des vitesses de rotation et de chute lors d'une chute libre, deux samares sont utilisées (numérotées samares 1 et 2). Leurs longueurs sont volontairement différentes, afin d'observer une éventuelle influence de ce paramètre sur les valeurs de vitesses de chute et de rotation. Pour chacune des deux samares, deux tests corrects sont enregistrés et analysés. Comme expliqué dans la sous-partie suivante, la difficulté d'obtenir une chute exploitable avec la samare passant dans le champ de la caméra nous contraint à ne pas avoir plus de données. Pour la mesure de l'angle de conicité, deux autres samares servent de modèles (samares 3 et 4). Toutes ont été pesées et mesurées : les longueurs totales (graine et aile comprises) et les masses de ces quatre spécimens sont détaillées dans le tableau 2.1 ci-dessous.

Numéro	Longueur totale (mm)	Masse (mg)
Samare 1	$35\pm0,5$	40 ± 1
Samare 2	$20\pm0,5$	10 ± 1
Samare 3	$35\pm0,5$	40 ± 1
Samare 4	$35\pm0,5$	40 ± 1

TABLE 2.1 – Longueur et masse des samares 1 à 4.

Il est intéressant de noter que la samare 2 est très différente des trois autres, au niveau de sa longueur et surtout de sa masse. De ce fait, en chute libre, deux "forces motrices" correspondant aux deux poids agissent, et induisent des conditions expérimentales différentes dont les effets potentiels sont analysés.

Pour les expériences avec l'axe de rotation fixé, cinq autres samares du même type sont choisies (figure 2.1). Encore une fois, la longueur d'aile (ou ici l'envergure entre l'axe et le bout d'aile) varie afin de détecter si elle influence la vitesse de rotation. Un trou de 1 mm de diamètre est percé dans la partie massive des graines, approximativement au niveau du centre de gravité. Ce trou est donc le centre de rotation artificiel des graines pour ces tests. L'envergure de chaque samare (entre le trou et le bout d'aile) et leur masse sont données dans le tableau 2.2.

Numéro	Envergure (mm)	Masse (mg)
Samare 5	$31\pm0{,}5$	35 ± 1
Samare 6	$20\pm0{,}5$	10 ± 1
Samare 7	$20\pm0{,}5$	10 ± 1
Samare 8	$23\pm0{,}5$	12 ± 1
Samare 9	$21\pm0{,}5$	10 ± 1

 TABLE 2.2 – Longueur et masse des samares 5 à 9.



FIGURE 2.1 – Les cinq samares utilisées pour les tests à axe fixe.

Toutes les samares sauf les 3 et 4 sont recouvertes d'un mouchetis noir sur leur face visible, afin de créer une distribution aléatoire de points pour que l'algorithme du logiciel de stéréocorrélation détecte correctement leurs changements de position (figure 2.2). Le mouchetis a été fait avec de la peinture, ce qui ajoute de la masse aux samares : une estimation de cette masse ajoutée est faite afin de vérifier qu'elle ne fausse pas les résultats des tests. La masse volumique de la peinture n'est pas connue exactement, mais elle est considérée à 1500 kg.m⁻³ d'après les masses volumiques d'autres peintures similaires couramment utilisées. Nous faisons l'hypothèse qu'elle est ajoutée sur la moitié de la surface des graines et sur une épaisseur de 10 μ m; cela donne alors une augmentation de masse d'environ 2 mg pour les samares 1 et 5, soit 5%, et d'environ 0,7 mg pour les autres soit 7%. Cet alourdissement est donc négligé pour les analyses.



FIGURE 2.2 – Samare 1 avec le mouchetis, vue en nuances de gris.

2.2.2 Dispositifs expérimentaux pour la stéréocorrélation d'images

La méthode de stéréocorrélation d'images est choisie pour étudier le mouvement des samares, lors des chutes libres et lors des tests sur axe fixe. Les champs de déplacement sont obtenus grâce au logiciel 7D qui utilise cette méthode [103].

Calibration, correspondance d'images et triangulation

La calibration est une étape obligatoire avant l'utilisation de la stéréocorrélation. Elle permet de connaitre les positions de chaque caméra entre elles ainsi que leurs paramètres intrinsèques, comme la distance focale ou la distorsion de la lentille [104]. Une mire plate de dimensions et motifs connus est utilisée. Le motif est un mouchetis aléatoire réalisé en peinture noire et blanche, qui optimise la correspondance des images. Plusieurs photos de la mire dans différentes positions et orientations sont prises par les deux caméras synchronisées, avec les mêmes paramètres que lors des tests.

Grâce à la calibration, les coordonnées des points sur les images provenant des deux caméras sont calculées dans le même repère. Ensuite, la triangulation est effectuée pour chaque point apparaissant sur chacune des images. En effet, le logiciel de corrélation compare les niveaux de gris de chaque image pour reconnaitre la position des différents points de la surface. Chaque image déformée est comparée à la première image de référence non déformée sur 7D, afin d'éviter la propagation des erreurs. Lors des essais, pour chaque paire d'images, une surface décrivant l'objet étudié est obtenue. Le champ de déplacement est ainsi calculé en comparant les différentes surfaces à la première. La précision de la méthode stéréocorrélation dépend de différents paramètres : positions des caméras, qualité du mouchetis, éclairage... Comme les caméras ne se déplacent pas entre deux mesures, la répétabilité est très bonne et n'implique pas d'erreurs entre les tests.

Équipement pour la SCI

Du fait de la vitesse de rotation importante des spécimens observés, des caméras rapides sont nécessaires afin de garantir un nombre suffisant d'images à exploiter. Le modèle utilisé est le SA3 de la marque Photron; cette caméra enregistre jusqu'à 120 000 images par seconde en faible résolution. Pour nos études, une fréquence de 2000 images par seconde est suffisante, avec une résolution d'images maximale pour cette fréquence de 1024×1024 pixels.

Dans un premier temps pour les tests de chute libre, les deux caméras ont été placées côte à côte, fixées à un trépied à environ 1 m de hauteur et filmant vers la bas afin de voir les samares par dessus lors des chutes. Pour optimiser la stéréocorrélation, un angle d'environ 15° entre les deux objectifs garantit une bonne sensibilité sur la carte des disparités gauche/droite tout en maintenant une excellente qualité de corrélation (figure 2.3a). Les samares tombent entre les deux caméras pour apparaitre dans le champ de vision, et la luminosité est ajustée grâce à deux projecteurs.

Les conditions d'éclairage et le réglage de la netteté ont mené à une profondeur de champ (dans laquelle les graines n'apparaissaient pas floues) assez faible. En effet, pendant les chutes les samares sont nettes sur une distance verticale d'environ 25 mm, ce qui équivaut à une cinquantaine d'images prises par les caméras. Les analyses ont donc été menées sur un quart de tour durant les révolutions des samares, et non sur plusieurs tours comme cela est possible avec un stroboscope par exemple. Néanmoins, cela



FIGURE 2.3 – Disposition des caméras pour les deux tests de chute.

est largement suffisant pour de la stéréocorrélation puisque seulement trois images consécutives sont nécessaires afin de calculer un champ de vitesses. Puis, afin de s'intéresser à l'angle de conicité pour les samares 3 et 4, les chutes sont filmées de profil avec une seule caméra (figure 2.3b). Cette caméra est positionnée horizontalement grâce à des niveaux à bulle. Les samares effectuent donc leur mouvement devant la caméra, avec un tableau blanc juste derrière elles afin d'obtenir les meilleures images possible.

Soufflerie à faibles vents

Pour compléter ces expérimentations, une soufflerie est conçue dans le but de tester les graines d'érable sur un axe fixe sous un courant d'air donné. Les dimensions choisies sont 600 mm de largeur, 360 mm de hauteur et 1500 mm de longueur; de plus, les quatre parois sont en polycarbonate, dont trois transparentes afin que l'intérieur soit visible. À l'entrée de la soufflerie, une structure en nid d'abeilles en carton renforcé de 25 mm d'épaisseur est placée afin de créer un flux le plus homogène possible, avec un faible niveau de turbulences. À l'autre extrémité, treize ventilateurs de $120 \times 120 \text{ mm}^2$ créent un flux d'air par aspiration et sont commandés par une alimentation réglable. Les vitesses de vent ainsi créées vont de 0 m.s⁻¹ à 2,3 m.s⁻¹. Elles sont mesurées avec une précision d'environ $\pm 5\%$ par un anémomètre à fil chaud (non visible sur la figure) placé à 400 mm en aval du nid d'abeilles. Les deux caméras rapides se trouvent au même niveau afin de visualiser l'intérieur de la soufflerie (figure 2.4a). Au milieu de la structure se trouve un support réalisé par prototypage rapide, qui sert à maintenir l'axe sur lequel les samares sont placées tout en créant un arrêt en translation (figure 2.4b). La stéréocorrélation d'images a de nouveau été utilisée pour ces tests avec le logiciel 7D.

Les graines sont percées à un diamètre de 1 mm et l'axe a un diamètre de 0,5 mm, afin de minimiser au maximum la friction entre les deux lors de la rotation. En effet, cette friction crée un couple résistant, ce qui perturbe potentiellement la rotation de la samare. Ce couple n'est pas déterminé; néanmoins, un simple "démarrage" manuel d'une samare et son ralentissement progressif jusqu'à l'arrêt nous indiquent que la friction ne freine pas significativement le mouvement.

L'épaisseur de la couche limite contre les parois est un facteur important dans une soufflerie, pour valider la justesse des mesures effectuées. Les vitesses mesurées à différentes positions dans la largeur de la soufflerie sont représentées en figure 2.5.

Ainsi, la couche limite est d'environ 100 mm de chaque côté, ce qui laisse une zone de 200 mm au milieu du conduit avec une vitesse adéquate par rapport à la vitesse de consigne. Les samares utilisées dans la soufflerie ayant une envergure maximale de 31 mm, cela donne un diamètre de 62 mm pendant leur rotation : ainsi, elles restent largement dans la zone correcte vis-à-vis de la vitesse de vent voulue.



(a) Soufflerie avec ses différents éléments.



(b) Support d'axe réalisé en prototypage rapide, avec l'axe de 0,5 mm de diamètre.

FIGURE 2.4 – Montage expérimental pour les tests avec axe de rotation fixé.



FIGURE 2.5 – Évolution de la vitesse de vent dans la soufflerie qui met en lumière la couche limite créée par les parois.

La soufflerie est également utilisée pour les tests de la micro éolienne (chapitre 4). Le support de fixation est modifié afin de s'adapter à la génératrice, et les deux trous servant pour le passage des caméras sont bouchés. Cela ne modifie pas le flux d'air qui est analysé et validé avec des filets de fumée.

2.3 Méthodes numériques et mesures

2.3.1 Recherche de l'axe de rotation par optimisation

Après avoir réalisé les prises de vue avec les caméras rapides, les images sont analysées à l'aide de 7D, puis les données brutes sont exploitées. Un paramètre important dans notre étude est l'axe ou le centre de rotation du mouvement des graines. Cette section décrit la façon dont celui-ci est déterminé.

Modèle direct

7D permet d'obtenir les positions des points reconnus sur une samare à chaque image. Ces informations sont données dans le repère de la caméra dite maitresse. Les points mesurés ont pour coordonnées : $M(x_M, y_M, z_M)$. Entre deux images, ou deux instants (i-1) et *i*, l'intervalle de temps *dt* est constant, et vaut ici 0,5 ms puisque nous enregistrons à 2000 images par seconde. Il est donc possible de connaitre la vitesse \vec{V}_M de chaque point M à l'instant *i*, par rapport aux instants (i-1) et (i+1) :

$$\vec{d}_{M}^{i} = \begin{pmatrix} x_{M}^{i} - x_{M}^{i-1} \\ y_{M}^{i} - y_{M}^{i-1} \\ z_{M}^{i} - z_{M}^{i-1} \end{pmatrix}, \vec{d}_{M}^{i+1} = \begin{pmatrix} x_{M}^{i+1} - x_{M}^{i} \\ y_{M}^{i+1} - y_{M}^{i} \\ z_{M}^{i+1} - z_{M}^{i} \end{pmatrix}$$
$$\Rightarrow \vec{V}_{M} = \frac{\vec{d}_{M}^{i+1} + \vec{d}_{M}^{i}}{2dt} = \frac{1}{2dt} \begin{pmatrix} x_{M}^{i+1} - x_{M}^{i-1} \\ y_{M}^{i+1} - y_{M}^{i-1} \\ z_{M}^{i+1} - z_{M}^{i-1} \end{pmatrix}$$
(2.1)

Le solide (la samare) est ici supposée indéformable. Ainsi, son mouvement de corps rigide par rapport au repère de la caméra est défini par le torseur cinématique suivant :

$$\begin{cases} \vec{\Omega} \\ \vec{V}_P \end{cases}_P = \begin{cases} \Omega_x . \vec{x} + \Omega_y . \vec{y} + \Omega_z . \vec{z} \\ V_{P,x} . \vec{x} + V_{P,y} . \vec{y} + V_{P,z} . \vec{z} \end{cases}_P$$
(2.2)

Ce torseur est valable pour tout point P de l'espace, de coordonnées (x_P, y_P, z_P) . $\vec{\Omega}$ est le vecteur vitesse de rotation et \vec{V}_P est le vecteur vitesse au point P. Si ce point est situé sur l'axe de rotation du mouvement, alors le vecteur \vec{V}_P devient colinéaire à $\vec{\Omega}$; il s'exprime comme ceci :

$$\vec{V}_P = k.\vec{\Omega} \ , \ k \in \mathbb{R}$$
(2.3)

Identification par méthode inverse

Un algorithme d'optimisation est utilisé afin d'identifier les paramètres du vol des graines par méthode inverse. Le vecteur paramètres variable en entrée de l'algorithme est :

$$\vec{X} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z, k, x_P, y_P, z_P)$$
(2.4)

D'après les composantes du torseur cinématique décrit ci-dessus, une vitesse théorique \vec{V}_M^* est calculée à chaque instant pour chaque point M sur la samare, grâce à leur position (x_M, y_M, z_M) :

$$\vec{V}_{M}^{*} = \vec{V}_{P} + \vec{MP} \wedge \vec{\Omega}$$

$$= k. \begin{pmatrix} \Omega_{x} \\ \Omega_{y} \\ \Omega_{z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{P} - x_{M} \\ y_{P} - y_{M} \\ z_{P} - z_{M} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} \Omega_{x} \\ \Omega_{y} \\ \Omega_{z} \end{pmatrix}$$
(2.5)

Le vecteur \vec{V}_M^* est exprimé entièrement grâce aux coordonnées du point M et du vecteur \vec{X} . Ce vecteur théorique est alors comparé au vecteur vitesse mesurée, ce qui crée une fonctionnelle à minimiser (vecteur erreur \vec{e}) :

$$\vec{e} = \vec{V}_M - \vec{V}_M^* \tag{2.6}$$

Les valeurs des trois composantes de ce vecteur erreur au carré sont minimisées par l'algorithme d'optimisation (minimisation des moindres carrés), en jouant sur les sept composantes du vecteur \vec{X} , en partant du vecteur initial choisi arbitrairement : $\vec{X}_0 = (0,0,0,0,0,0,0)$. Après plusieurs analyses, ce vecteur de départ ne pose pas de problème de convergence. Un point appartenant à l'axe de rotation de la samare est alors trouvé, P (x_P, y_P, z_P), ainsi que la vitesse de rotation réelle via le vecteur $\vec{\Omega}$. La position spatiale de l'axe de rotation est donc connue : il suffit de prendre l'intersection de celui-ci avec la graine d'érable pour trouver son centre de rotation. Le coefficient *k* est également déterminé par l'algorithme : la vitesse du point P \vec{V}_P et par définition celle de la samare sont donc déduites.

En ce qui concerne les incertitudes de mesure, le logiciel 7D est capable de localiser la position d'un point en trois dimensions au dixième de pixel près. Pour les images enregistrées ici, les dimensions d'un pixel sont de l'ordre de 50 μ m×50 μ m : ainsi, l'incertitude de position est de 5 μ m dans chaque direction. L'incertitude de déplacement entre deux points est alors de 10 μ m, et avec un pas de temps de 0,5 ms, cela mène à une incertitude de vitesse de 20 mm.s⁻¹, soit ± 0,01 m.s⁻¹. De plus, il est déduit de l'équation 2.5 que les composantes du vecteur $\vec{\Omega}$ sont déterminées avec une précision de ± 1 rad.s⁻¹.

2.3.2 Mesure de l'angle de conicité

Pendant le vol, le corps des samares n'est pas dans le plan perpendiculaire à leur axe de rotation : l'aile est inclinée vers l'arrière, dans le sens opposé à la chute, ce qui crée l'angle de conicité noté β .

Pour l'analyse de cet angle en chute libre, les images utilisées sont issues du montage avec une seule caméra positionnée horizontalement. Seules les samares 3 et 4 sont alors étudiées. Le logiciel Kinovea est choisi afin de déterminer l'angle de conicité : il permet de placer des marqueurs sur une vidéo et de connaitre leur position dans le plan de l'image. Des calculs de distances ou d'angles sont ensuite effectués. Ainsi, deux marqueurs sont utilisés pour représenter le segment du bord d'attaque de l'aile. Ils sont placés plusieurs fois, à plusieurs instants intéressants (figure 2.6). Pour ordre de grandeur, à l'endroit où la samare chute, la distance verticale vue par la caméra est d'environ 14 cm.

Avec ce protocole, l'angle de conicité ne peut être observé et mesuré que lorsque le bord d'attaque est dans le plan de la caméra. Ainsi, seules deux mesures par tour peuvent être effectuées. Grâce à deux marqueurs, l'angle du bord d'attaque de l'aile par rapport à l'horizontale est déterminé :

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{z_2 - z_1}{|x_2 - x_1|}\right) \tag{2.7}$$

et :

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{z_4 - z_3}{|x_4 - x_3|}\right) \tag{2.8}$$

L'angle de conicité β sur un tour est déduit des calculs de ces deux angles :

$$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \tag{2.9}$$



FIGURE 2.6 – Marqueurs placés sur une vidéo pour déterminer l'angle de conicité en chute libre.

En faisant ainsi la moyenne de deux valeurs sur un tour (une par demi-tour), la variation dans la mesure de l'angle due à une potentielle chute non parfaitement verticale est éliminée. Nous obtenons donc une valeur de β pour un instant donné : l'angle de conicité moyen final pour la samare est ensuite calculé grâce à plusieurs de ces mesures à différents instants de la chute. Compte tenu de la hauteur de chute, la moyenne est faite avec deux valeurs.

Enfin, les marqueurs ont été placés manuellement sur les images : l'incertitude de leur positionnement est de l'ordre du pixel, ce qui implique une incertitude sur la valeur des angles de $0,6^{\circ}$, soit $\pm 0,3^{\circ}$.

Pour le cas des tests en soufflerie, l'angle est calculé uniquement grâce aux résultats de l'analyse par SCI et non avec le logiciel Kinovea. Pour cela, un segment virtuel est créé entre le point à vitesse minimale et le point à vitesse maximale de la samare : ils sont donc situés proche du centre de rotation, et en bout d'aile. Ce segment représente le corps de la graine d'érable. L'angle de conicité est ensuite mesuré entre ce segment et le plan (\vec{x}, \vec{y}) (figure 2.7). Ici, l'incertitude sur la position des points dans 7D est de 5 µm, et donc 10 µm pour une distance entre deux points. L'angle étant ensuite déterminé grâce à une fonction trigonométrique, cela mène à une valeur d'angle calculée à $\pm 0.2^{\circ}$.



FIGURE 2.7 – Méthode de calcul de l'angle de conicité sur axe fixe.

Sur la figure 2.7, le point à vitesse minimale est noté P_{min} et celui à vitesse maximale P_{max} . L'angle

recherché est β , entre $\overrightarrow{P_{min}P_{max}}$ et le plan (\vec{x}, \vec{y}) . Une fois que les positions de P_{min} et de P_{max} sont déterminées, β est calculé d'après l'équation 2.10.

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\overrightarrow{P_{min}P_{max}} \cdot \vec{z}}{\left\|\overrightarrow{P_{min}P_{max}}\right\|}\right)$$
(2.10)

Ainsi, comme pour les vitesses de chute et de rotation, une valeur d'angle de conicité est déduite pour chaque image enregistrée puis une moyenne est effectuée.

2.4 Résultats

2.4.1 Chutes libres

Le logiciel 7D permet de connaitre les positions des graines d'érable pendant leurs chutes à chaque image, soit toutes les 0,5 ms. Les trajectoires de deux points particuliers sont tracées ci-dessous pour la samare 1, entre deux positions à 40 images d'intervalle, ou 20 ms (figure 2.8). La trajectoire du centre de rotation est représentée en vert, et celle du point ayant la vitesse maximale (en bout d'aile) est représentée en rouge. L'axe \vec{z} matérialise la verticale ascendante.



FIGURE 2.8 – Trajectoires de deux points particuliers sur la samare 1 (vue de côté et vue de dessus).

Le mouvement d'hélice de la graine est bien visible ici. Il apparait que le centre de rotation ne suit pas une trajectoire parfaitement verticale : il a des déplacements latéraux, ce qui crée un mouvement d'hélice également. Ses positions successives dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) pour un test de chute libre de la samare 1 sont tracées en figure 2.9. Vue du dessus, le mouvement hélicoïdal devient une trajectoire circulaire.

La vitesse instantanée de chaque point composant les samares a été déduit des mesures exportées de 7D. Le champ de vitesses est représentée en figure 2.10 pour les samares 1 et 2.

Le centre de rotation est situé dans la partie massive de la samare, au niveau de la graine; il est donc proche du centre de masse supposé, comme cela est attendu.

Vitesse de rotation et vitesse de chute

L'optimisation nous donne également les valeurs des composantes du vecteur vitesse de rotation $\vec{\Omega}$ et celles du vecteur vitesse de la samare \vec{V}_P , à chaque image. La figure 2.11 illustre ces deux vecteurs sur la graine et donne leurs composantes selon \vec{x} , \vec{y} et \vec{z} .

Le mouvement globalement vertical de la graine d'érable est visible. En effet, à l'instant de la figure, la composante selon \vec{z} du vecteur \vec{V}_P notée $V_{P,z}$ est de -1,02 ± 0,01 m.s⁻¹, alors qu'en comparaison les



Evolution of the center of rotation position

FIGURE 2.9 – Positions successives du centre de rotation pour un test avec la samare 1.



(a) La samare 1 mesure 35 mm de long; compte tenu de sa vitesse de rotation, sa vitesse en bout d'aile est d'environ 3 m.s^{-1} .



(b) La samare 2 est plus petite, mais tourne quasiment à la même vitesse que la samare 1 : sa vitesse en bout d'aile est donc d'environ 2 m.s⁻¹.

FIGURE 2.10 – Représentation des vecteurs vitesse pour chaque point mesuré sur les samares, et position du centre de rotation.

composantes selon \vec{x} et \vec{y} sont de l'ordre du pourcent (-0,01 et 0,01 ± 0,01 m.s⁻¹). Cela est vrai pour toutes les images prises pendant le mouvement de chute. De la même manière, la rotation s'effectue principalement dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) : la composante Ω_z vaut 102 ± 1 rad.s⁻¹ tandis que les deux autres valent 1 et -1 ± 1 rad.s⁻¹. Les vitesses de rotation et de chutes moyennes pour les deux samares sont données dans le tableau 2.3.

Lors de ses deux tests de chute libre, la samare 1 a tourné dans deux sens différents (positif et négatif dans le plan (\vec{x}, \vec{y})), à cause de l'inversion des ses faces supérieures et inférieures. La samare 2 a elle tourné deux fois dans le sens négatif. Malgré cela et malgré leurs dimensions différentes, les deux graines ont des comportements très similaires : les valeurs de $|\Omega_z|$ et de $V_{P,z}$ sont très proches.

Angle de conicité

Grâce aux calculs détaillés dans les équations 2.7, 2.8 et 2.9, un angle de conicité β est déterminé pour chaque chute libre des samares 3 et 4. Pour presque tous les tests, deux valeurs de β ont été mesurées ("mesure 1" et "mesure 2"), à deux instants différents des chutes, au début de la partie visible du



FIGURE 2.11 – Vecteurs $\vec{\Omega}$ et \vec{V}_P pour la samare 1.

	Ω_z (rad.s ⁻¹)		$V_{P,z}$ (m.s ⁻¹)	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Samare 1 (positif)	102 ± 1	0,3	$\textbf{-1,}01 \pm 0,\!01$	0,01
Samare 1 (négatif)	-122 ± 1	0,2	$\textbf{-0,99} \pm 0,01$	0,01
Samare 2 (négatif)	-104 ± 1	0,2	$\textbf{-1,09} \pm \textbf{0,01}$	0,01
Samare 2 (négatif)	-107 ± 1	0,6	$\textbf{-1,}12\pm0,\!01$	0,02

TABLE 2.3 – Valeurs moyennes des vitesses de rotation et de chute durant les chutes libres.

mouvement et à la fin. Les samares ont tourné aléatoirement dans le sens positif ou négatif dans le plan horizontal. Cela mène à des valeurs d'angle de conicité assez variables en fonction du sens de rotation. Ces valeurs sont répertoriées dans le tableau 2.4.

	Valeur de β (°)		
	Mesure 1	Mesure 2	
Samare 3 (nég.)	6,7 ± 0,3	$7{,}9\pm0{,}3$	
Samare 3 (pos.)	8,9 ± 0,3	$10{,}9\pm0{,}3$	
Samare 3 (nég.)	$8{,}6\pm0{,}3$	$7{,}8\pm0{,}3$	
Samare 4 (pos.)	$23\pm0{,}3$	-	
Samare 4 (nég.)	$2{,}9\pm0{,}3$	$3\pm0,3$	
Samare 4 (nég.)	$3,4\pm0,3$	$4\pm0,3$	

TABLE 2.4 – Valeurs de l'angle de conicité pour les samares 3 et 4.

Ces deux graines d'érables se sont adaptées différemment à chaque chute. Néanmoins, il apparait que l'angle de conicité reste globalement à des valeurs comprises entre 3° et 11°, la samare 3 présentant un angle un peu plus important que la 4.

2.4.2 Axe fixe en soufflerie

Une étude similaire a été menée avec le montage expérimental présenté en figure 2.4. Dans cette section, l'axe de rotation des samares est fixe. La vitesse du vent dans la soufflerie pour ces tests est

réglée à 1 m.s^{-1} grâce à un anémomètre, ce qui correspond à la vitesse de chute moyenne des samares lors des chutes libres : les deux comportements peuvent donc être comparés. Cette fois-ci, seule la vitesse de rotation est analysée, le mouvement linéaire des samares étant arrêté par le support.

Les caméras capturent de nouveau 2000 images par seconde, avec donc un pas de temps de 0,5 ms entre deux images. Comme précédemment, le logiciel 7D extrait la vitesse de chaque point mesuré sur les samares dans l'espace $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ (figure 2.13a). L'axe \vec{z} est placé dans la direction du flux d'air dans la soufflerie, et donc colinéaire à l'axe principal de rotation des samares. La position du centre de rotation est toujours déterminée par l'algorithme d'optimisation : celle-ci devrait être quasiment fixe, compte tenu de la contrainte appliquée aux graines d'érable. La figure 2.12 permet de vérifier que le centre de rotation reste bien dans un espace très restreint dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) , contrairement à la situation de la figure 2.9.



FIGURE 2.12 – Positions successives du centre de rotation pour la samare 5, pour 29 images (numérotées de 0 à 28). Elles sont contenues dans un cercle de 1 mm de diamètre, à cause de la contrainte physique de l'axe fixe.

De par le montage réalisé, une moitié de révolution est enregistrée pour les samares 5 à 9, correspondant à environ 30 images. La rotation s'effectue dans le sens trigonométrique ou horaire en fonction de la graine. Aucune accélération ou décélération n'est observée pendant ce mouvement : la vitesse de rotation reste quasi-constante. À cause du support de l'axe dans la soufflerie, la partie centrale des samares est cachée à la caméra : seules les ailes sont visibles et donc exploitables, mais cela suffit largement à obtenir des résultats satisfaisants (les points sur la graine ont des vitesses beaucoup plus faibles que les ceux des ailes car la distance au centre de rotation est moins importante).

Vitesse de rotation

Les composantes du vecteur $\hat{\Omega}$ de la samare complète sont de nouveau calculées à chaque pas de temps par l'algorithme. Un de ces instants est représenté en figure 2.13b pour la samare 5. Dans cette représentation en trois dimensions, les composantes de \vec{V}_P confirment que la samare n'a pas de mouvement de translation : les trois valeurs de vitesse sont nulles.

La composante Ω_z est logiquement plus importante que les autres, du fait que l'axe de la caméra principale soit placé colinéaire à l'axe de rotation des samares. Mais ici, les deux autres composantes Ω_x et Ω_y ne sont pas toujours significativement plus faibles : à certains instants pour différents tests, leurs valeurs atteignent presque 19% de Ω_z (contre environ 1% pour les chutes libres). Cela montre qu'il y a des rotations secondaires ou des oscillations autour d'autres axes que \vec{z} . Le mouvement ne se fait pas



(a) Avec une envergure de 31 mm, la vitesse du point extrême en bout d'aile est d'environ $4,5 \text{ m.s}^{-1}$.

(b) Les points mesurés sur la partie visible de la samare sont tracés en bleu, et le vecteur $\vec{\Omega}$ en rouge.

FIGURE 2.13 – Représentations des vitesses des points et du vecteur $\vec{\Omega}$ pour la samare 5.

entièrement dans un seul plan, les samares ajustant leur position grâce à la liaison rotule créée entre elles et l'axe. Dans ces conditions, Ω_z est à nouveau mesuré et comparé aux résultats précédents. Les valeurs pour les samares 5 à 9 sont détaillées dans le tableau 2.5, avec leur sens de rotation (positif ou négatif selon \vec{z}). Pour chaque samare, la mesure est effectuée deux fois.

	$\Omega_z (\mathrm{rad.s}^{-1})$			
	Mesure 1		Mesure 2	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Samare 5 (pos.)	151 ± 1	3,9	140 ± 1	5,7
Samare 6 (nég.)	-177 ± 1	5,2	-182 ± 1	5,3
Samare 7 (pos.)	140 ± 1	2,4	142 ± 1	2,5
Samare 8 (nég.)	-165 ± 1	4,1	-163 ± 1	1
Samare 9 (nég.)	-190 ± 1	1,7	-193 ± 1	1,2

TABLE 2.5 – Valeurs des vitesses de rotation moyennes pour les samares avec axe fixe.

Le point intéressant est de comparer ces valeurs avec celles des vitesses de rotation obtenues lors des tests de chute libre, pour les samares 1 et 2. La comparaison est possible du fait que la vitesse relative entre le vent et les graines est identique dans les deux configurations. En effet, lors des chutes libres les samares ont une vitesse verticale d'environ 1 m.s^{-1} avec un vent en amont nul. C'est l'inverse dans le deuxième cas en soufflerie : les samares sont fixes et le flux d'air créé a une vitesse de 1 m.s^{-1} .

La comparaison révèle qu'avec leur axe de rotation fixé, ce qui n'est pas le cas en chute libre, les graines d'érable du type étudié ici ont toujours une vitesse de rotation plus importante. L'augmentation de vitesse la plus faible est calculée entre la mesure 1 de la samare 7 et le deuxième test de la samare 1 : cela donne 140/122 = 1, 15, soit 15%. La plus importante est calculée entre la mesure 2 de la samare 9 et le premier test de la samare 1 : 193/102 = 1, 89, soit une augmentation de 89%. Globalement, l'axe fixe implique une vitesse de rotation de 15% à 89% plus rapide. Ce résultat est très prometteur et montre que le comportement des graines d'érable en rotation peut être optimisé. La vitesse de rotation ne semble pas corrélée avec l'envergure de la samare : par exemple, les samares 5 et 7 ont des envergures et des masses différentes, et pourtant leur vitesse de rotation est très proche. Elle dépend donc d'autres facteurs, qui ne sont pas déterminés dans ces travaux.

Angle de conicité

Les résultats sont reportés dans le tableau 2.6.

	$eta/ec{z}$ (°)			
	Mesure 1		Mesure 2	
	Moyenne Écart-type		Moyenne	Écart-type
Samare 5 (pos.)	$8{,}4\pm0{,}2$	0,5	$7{,}4\pm0{,}2$	0,3
Samare 6 (nég.)	$12{,}6\pm0{,}2$	0,7	$14{,}3\pm0{,}2$	1,2
Samare 7 (pos.)	$11,\!8\pm0,\!2$	0,9	$10\pm0,\!2$	0,6
Samare 8 (nég.)	$13,\!1\pm0,\!2$	2	$11{,}5\pm0{,}2$	1,3
Samare 9 (nég.)	$17,1\pm0,2$	3,4	$9{,}5\pm0{,}2$	9,2

TABLE 2.6 – Valeurs de l'angle de conicité pour les samares avec axe fixe.

Les valeurs sont plus proches les unes des autres que celles des chutes libres. En fonction de la samare, l'angle va de 7,4 à $17,1 \pm 0,2^{\circ}$, avec une faible variation pour une même samare entre deux mesures. La mesure 2 pour la samare 9 est aberrante (l'écart-type est trop important), et n'est donc pas prise en compte. Une nouvelle fois, les valeurs d'angles ne semblent pas dépendre seulement de l'envergure ou de la masse, ni de la vitesse de rotation. En effet, les samares 6 et 7 ont la même envergure et la même masse, mais un angle de conicité bien différent. De même, les samares 5 et 7 ont des vitesses de rotation proches, mais leur conicité n'est pas la même. Ce paramètre doit également être relatif à d'autres facteurs non déterminés ici.

Le fait que les valeurs d'angle soient similaires pour les cinq samares est intéressant pour l'évolution vers des pales de micro éolienne. En effet, le choix est assez restreint pour l'angle de conicité à appliquer aux hélices : la valeur choisie reste dans tous les cas proche des valeurs de l'ensemble des samares. Le comportement aérodynamique est donc bien reproduit et les performances sont attendues comparables à celles des samares.

2.5 Discussion sur les résultats

Tout d'abord, que ce soit en chute libre ou sur un axe fixe, la longueur des samares n'influence pas leur vitesse de rotation. Leur comportement semble donc dépendre de phénomènes plus complexes que cela. Davantage d'expériences sur un plus grand nombre de spécimens doivent être réalisées pour disposer de données plus fiables. À propos, la méthodologie employée dans ce chapitre connait certaines lacunes et est critiquable : en effet, le nombre d'expérimentations et donc de résultats pour chaque samare est très faible. Une quantité plus importante de données (une trentaine d'enregistrements pour chaque chute par exemple) est nécessaire afin de mener des études statistiques. Néanmoins, l'objectif n'est pas ici de dégager une loi précise, mais plutôt une tendance globale. Les tests en chute libre viennent seulement valider les grandeurs énoncées dans la littérature, et ceux sur axe fixe servent à vérifier ou non une modification du comportement des graines. Ainsi, seuls quelques essais permettent de mettre cela en avant.

De plus, pour faire un premier pas vers la conception d'hélices miniatures, il est possible de regarder la vitesse spécifique λ des samares sur axe fixe. Cette valeur peut être calculée pour les samares 5 à

9 d'après l'équation 1.5 du chapitre 1 : elle est alors comprise entre 2,8 et 4,7. Grâce aux travaux de Hau [60] présentés au chapitre 1, il est possible de connaitre le type d'éolienne le plus approprié (figure 1.11). Avec des valeurs comprises entre 2,8 et 4,7, il semble que le nombre optimal de pales pour une éolienne horizontale soit de quatre ou plus. Le coefficient de puissance C_P sera alors d'environ 30% au maximum. Ce serait donc un meilleur résultat que pour toutes les micro-éoliennes de la littérature.

Enfin, les vitesses de rotation importantes des samares observées lors des tests à axe fixe n'informent en rien sur le couple moteur qui est créé. Il est certain qu'une vitesse de rotation plus élevée n'implique pas forcément une puissance générée plus élevée, car elle affecte la vitesse spécifique et que cette valeur doit être choisie de manière optimale en fonction du type d'hélice. Néanmoins, il y a fort à parier que ces vitesses de rotation élevées à vide impliquent des vitesses de rotation suffisamment grandes, même avec un couple résistant créé par une génératrice en aval.

2.6 Ce qu'il faut retenir

Ce chapitre retrace ce qui est pour le laboratoire une étude très prospective et originale quant au thème de recherche abordé. Il nous permet de mieux appréhender la dynamique des graines d'érable, en vol lors d'une chute libre ou en soufflerie sur un axe. Pour cela, deux caméras rapides filmant à 2000 images par seconde sont utilisées, ainsi que la technique de stéréocorrélation d'images développée dans le logiciel 7D.

Des tests en chute libre sont menés, et ont pour objectif de confirmer les données observées dans la littérature, mais aussi de servir de référence pour la deuxième partie des mesures. Il a été montré que le type de samares utilisé présente une vitesse de chute verticale $V_{P,z}$ assez semblable entre les spécimens, comprise entre -0,99 et -1,12 \pm 0,01 m.s⁻¹ (toutes chutes confondues). Leur sens de rotation est aléatoire et dépend des conditions de chute et de la phase transitoire. La vitesse de rotation est quasiment constante également, et ne dépend pas du sens de rotation : pour les samares testées, elle est comprise entre 102 et $122 \pm 1 \text{ rad.s}^{-1}$ (soit entre 974 et $1165 \pm 9,5 \text{ tr.min}^{-1}$). Ces résultats viennent effectivement confirmer ce qui est présenté dans de précédentes études. De plus, l'angle de conicité β est mesuré grâce à des images de chutes prises de côté. Pour chaque enregistrement, une moyenne est effectuée afin de calculer l'angle de conicité réel par rapport au plan de rotation. Les valeurs de β vont de 2,9 à 23 \pm 0,3°, et sont cette fois-ci assez dépendantes du sens de rotation et de la géométrie de la samare.

Dans un second temps, des tests expérimentaux sont réalisés avec des samares tournant autour d'un axe fin en acier, dans une soufflerie. Un point intéressant et très prometteur est démontré grâce à ce montage. En effet, les résultats montrent que les samares ont une vitesse de rotation de 15% à 89% plus élevée qu'en chute libre lorsque leur axe est fixé (jusqu'à $193 \pm 1 \text{ rad.s}^{-1}$ soit $1843 \pm 9,5 \text{ tr.min}^{-1}$). Cela met en lumière pour la première fois le fait que leur comportement est améliorable, en tout cas du point de vue de la vitesse de rotation. Une vitesse de presque 2000 tr.min⁻¹ comme pour la samare 9 avec un vent de seulement 1 m.s⁻¹ serait très utile dans le cadre d'une application de micro éolienne. L'angle de conicité β est de nouveau calculé, grâce à une méthode différente de la précédente.

L'idée est finalement de se baser sur la forme et le comportement des graines d'érable pour concevoir des pales bioinspirées de très petites dimensions, qui opéreraient à de très faibles vitesses de vent. Cela peut améliorer les rendements des micro éoliennes qui sont toujours très faibles, comme décrit dans le chapitre précédent. Enfin, la mesure de l'angle de conicité permet de créer ces pales le plus proche possible des samares et ainsi de profiter de leurs excellentes capacités aérodynamiques.

chapitre 3

Réalisation d'une micro éolienne bioinspirée

"Innover en latin veut dire renouveler à l'identique. Ce n'est pas ce que l'on cherche!" Vincent Bontems

Sommaire

3.1	Introd	luction
3.2	Analy	se des samares réelles
	3.2.1	Numérisation 3D
	3.2.2	Répartition de masse
3.3	Choix	du procédé de fabrication 49
	3.3.1	Procédés classiques
	3.3.2	Fabrication additive
3.4	Conce	eption
	3.4.1	Samare artificielle
	3.4.2	Conception d'hélices
3.5	Micro	éolienne
	3.5.1	Fabrication d'hélices par stéréolithographie 56
	3.5.2	Génératrice électromagnétique
	3.5.3	Micro éolienne complète
3.6	Ce qu	'il faut retenir

3.1 Introduction

Les expérimentations décrites dans le chapitre précédent nous incitent à nous tourner vers la bioinspiration pour notre application. Comme nous l'avons déjà vu, un design classique ne permet pas d'atteindre une efficacité optimale, alors qu'une géométrie bioinspirée peut s'avérer plus adéquate.

Nous suivons donc dans ce chapitre les différentes étapes qui mènent finalement à la réalisation d'une micro éolienne originale à haut rendement mécanique C_P . Dans un premier temps, une des samares utilisées dans le chapitre 2 est numérisée afin de connaitre la géométrie de son aile. Après le choix du procédé de fabrication idéal pour réaliser les hélices, principalement basé sur une résolution suffisamment faible, celles-ci sont conçues en se basant sur une première conception de la samare entière. Plusieurs prototypes sont proposés avec différentes valeurs des paramètres suivants : nombre de pales N_p , angle de calage α_c et angle de conicité β . Ainsi, il est possible d'analyser l'influence des ces trois réglages en testant toutes les hélices, afin de finalement sélectionner la meilleure pour les essais finaux.

Puis, la fabrication des hélices avec ses diverses difficultés est présentée. Enfin, celles-ci sont assemblées avec une génératrice miniaturisée fabriquée par Pierre Gasnier du CEA Grenoble. La micro éolienne complète est alors prête pour être testée en soufflerie.

3.2 Analyse des samares réelles

La réalisation d'hélices se voulant bioinspirée dans le cadre de ces travaux, il est important de connaitre les caractéristiques physiques des samares afin que le résultat soit le plus fidèle possible.

3.2.1 Numérisation 3D

Dans un premier temps, il est nécessaire de récupérer la géométrie des samares afin d'aller vers une rétro-conception progressive. Pour cela, le spécimen présentant la plus grande vitesse de rotation avec axe fixé parmi les neuf testés, la samare 9, est choisi. Elle sert donc de modèle dans toute la suite de ce manuscrit pour la réalisation et la fabrication des hélices.

Le scan 3D est effectué grâce à une machine de mesure tridimensionnelle AltiSurf 520 de la marque *Altimet* (figure 3.1), qui utilise la technique de microscopie confocale. Elle est équipée d'une sonde confocale chromatique, qui lui permet de mesurer les surfaces avec une très bonne résolution. Pour notre cas, le pas vertical (selon l'axe \vec{z}) est de 0,0336 µm, ce qui est extrêmement faible et permet de faire ressortir les moindres aspérités et reliefs de la surface. Pendant la numérisation, un laser parcourt une zone rectangulaire déterminée en effectuant des passes selon les axes \vec{x} et \vec{y} définissant le plateau. Une grille est ainsi construite avec l'altitude z de chaque point.

La samare est fixée temporairement à la plaque support de la machine afin qu'elle soit immobile pendant les mesures. Du fait de sa forme globalement courbée, la différence d'altitude entre le point le plus haut et le point le plus bas est trop importante pour un scan en une fois. Il est donc exécuté en deux fois, avec une hauteur de mesure de 1 mm : il est vérifié que ces deux passes ont une zone de recouvrement, afin que le logiciel puisse retrouver les points en commun (figure 3.2a). La structure est ensuite reconstruite entièrement à partir de ces deux passes pour donner la samare complète, représentée en figure 3.2b. Ainsi, l'on devrait plutôt parler de scan "2,5D" plutôt que de scan 3D, car seule la cartographie d'une surface est obtenue à l'aide de cette technique et non la forme complète de la pièce. Le pas de la tête de mesure selon les axes \vec{x} et \vec{y} est de 10 µm, pour des longueurs totales respectives de 28 et 11 mm. Cela implique un peu plus de 3 000 000 de points mesurés, ce qui représente un nombre important de données pour les exploitations ultérieures.



FIGURE 3.1 – La machine AltiSurf 520 utilisée.



(a) Les deux passes de mesure effectuées par la machine. Ces deux passes ont certaines zones en commun, afin que la reconstruction se fasse au mieux.



(b) Samare complète avec les altitudes des points mesurés par rapport à la plaque support.

FIGURE 3.2 – Scan 3D de la samare 9.

La géométrie est donc décrite très précisément et permet de relever de nombreux détails. Tout d'abord, nous remarquons le perçage au centre de la graine, qui a servi lors des tests sur axe fixe du chapitre 2. Son diamètre est effectivement être estimé à 1 mm. Ensuite, deux paramètres particulière-

ment importants sont bien visibles. D'une part, l'ondulation "macroscopique" de l'aile, surtout en bord de fuite dans la zone représentée en rouge et blanc, entre 15 mm et 25 mm sur la figure 3.2b. Cette ondulation est une des caractéristiques propres aux samares et est observée sur tous les spécimens. D'autre part, les petites nervures qui partent de la graine et qui vont jusqu'au bout de l'aile ressortent nettement grâce à la numérisation. Leur hauteur est difficile à estimer, mais ne dépasse certainement pas 50 μ m, et la largeur de leur crête doit être tout au plus de quelques microns. Elles sont également présentes sur tous les spécimens de graines d'érable existants. De plus, d'après les conclusions tirées du chapitre 1, il est probable qu'elles aient un rôle à jouer dans les excellentes propriétés aérodynamiques des samares, en exploitant les effets visqueux très importants à leur échelle.

Ainsi, il apparait important de copier ces deux spécificités sur le modèle numérique de pale bioinspirée, qui est le pilier des hélices innovantes attendues. Le contour extérieur de l'aile et son ondulation sont facilement exploitables et réalisables par n'importe quel procédé de fabrication, car la résolution nécessaire est raisonnable. En revanche, les nervures très fines et d'une hauteur extrêmement faible sont difficilement fabricables, et ce quel que soit le procédé utilisé.

Il est donc décidé de laisser de côté les nervures pour la suite de ces travaux afin d'éviter de trop grosses difficultés, malgré leur potentielle importance. Une discussion sur ce choix est apportée au chapitre 4 avec la présentation des résultats d'efficacité des hélices.

3.2.2 Répartition de masse

La forme des samares est importante et est en partie responsable de leur manière si particulière de tourner en chute libre. Néanmoins, d'après notamment les travaux de Norberg [76] et après différents tests de chute effectués avec des prototypes variés, il apparait que la répartition de masse est un facteur clé dans le comportement des graines d'érable. Nous ne chercherons pas ici à calculer une masse volumique, qui n'est pas forcément évidente à déterminer pour ce type de structures et qui est très variable entre les zones des samares (graine, bord d'attaque et aile) et entre les samares elles-mêmes.

Afin de créer un modèle numérique de samare le plus proche possible de la réalité, la répartition de masse entre la graine (partie plus massique) et l'aile (partie fine) est donc étudiée. Pour cela, huit spécimens sont utilisés; ils présentent tous le même degré de séchage avancé. Chacun d'entre eux est tout d'abord pesé afin d'avoir sa masse totale, puis la graine et l'aile sont séparées (figure 3.3).





Les deux parties sont pesées individuellement, ce qui donne la répartition de masse entre elles. Le tableau 3.1 ci-dessous présente la masse contenue dans la graine en pourcentage de la masse totale, pour chacune des huit samares.

Comme cela pouvait être attendu, la masse est principalement située dans la graine : c'est là que se trouve la partie biologiquement utile de la samare pour sa reproduction. Cette concentration de masse à une extrémité, combinée avec une masse beaucoup plus faible sur une partie fine et quasi-plane, sont de manière générale les facteurs qui mènent n'importe quelle structure à avoir un mouvement de rotation

Numéro	Longueur (mm)	Masse totale (mg)	Masse dans la graine (%)
1	28	32	75
2	28	35	78,6
3	29	37,5	77,3
4	29	76	88,2
5	30	54,5	85,3
6	31	37	73
7	34	87	86,8
8	35	46,5	73,1
Moyenne	30,5	50,7	79,7
Écart-type	2,7	20,5	6,2

TABLE 3.1 – Proportion de la masse totale contenue dans la graine pour chacun des huit spécimens pesés.

dans le plan horizontal lors d'une chute verticale. La position du centre de rotation de l'objet est alors intimement liée à la zone où la masse est majoritairement présente. La partie beaucoup plus légère mais avec une surface plus importante, appelée l'aile sur les samares, sert finalement à ralentir la chute de la partie massique en créant ce mouvement singulier.

Notons que pour les huit samares pesées, la longueur est peu variable (écart-type de 2,7 mm pour une moyenne de 30,5 mm), alors que la masse est elle très disparate : 20,5 mg d'écart-type pour une moyenne de 50,7 mg. Quant au pourcentage de la masse contenue dans la graine, il présente un écart-type également faible de 6,2%. Cela apporte la preuve que, malgré le fait que les samares puissent avoir des propriétés physiques (longueur, masse) plus ou moins différentes, peu importent celles-ci, la répartition de la masse doit être précisément respectée. Ces organismes ont donc évolué au fil des milliers d'années et ont convergé vers une proportion de leur masse contenue dans la graine d'environ 80% pour optimiser leurs qualités aérodynamiques.

Ce pourcentage est donc gardé en mémoire pour la phase de conception, et est bien sûr un objectif à viser afin de développer une samare artificielle la plus ressemblante (autant visuellement qu'aérodynamiquement) aux réelles.

3.3 Choix du procédé de fabrication

Avant de débuter la conception, les différents procédés de fabrication pouvant convenir pour notre application sont comparés, afin de choisir le plus adéquat avec nos contraintes. Ses caractéristiques doivent par la suite guider la création du modèle numérique, au niveau des épaisseurs et des formes réalisables.

3.3.1 Procédés classiques

Une première possibilité pour fabriquer les samares et les hélices est de recourir aux procédés d'usinages. Ceux-ci, appelés aussi procédés de fabrication soustractive, ou par enlèvement de matière, fonctionnent avec un outil qui vient retirer de la matière sur une pièce au départ plus volumineuse que le résultat voulu. Après un bref état des centres d'usinage disponibles et de leurs caractéristiques, il apparait que ces derniers ne sont pas assez précis et trop complexes à mettre en place pour des épaisseurs de l'ordre du dixième de millimètre et des résolutions nécessaires encore inférieures. De plus, lors de la fabrication, la pièce doit être maintenue en position par un système de brides. Les samares ayant une forme élancée, cela implique un usinage en porte-à-faux qui induit des vibrations sur la pièce et la déforme. Cela détériore évidemment la qualité de fabrication, et donc celle de la géométrie et de l'état de surface : or, la forme de la samare doit être respectée précisément afin de conserver ses propriétés. Le modèle CAO de la samare étant complexe (pas de surface plane ou circulaire), la réalisation nécessite un centre d'usinage cinq axes, et donc une mise en œuvre à distance : d'un point de vue pratique, cela poserait des problèmes quant à la vérification des pièces après fabrication, et prendrait beaucoup de temps lors des allers-retours pour réglage, modification de CAO etc. La solution de l'usinage est donc écartée.

Une autre possibilité est de se tourner vers le moulage. Le procédé de fonderie et l'injection sont donc également envisagés, car ils permettent d'obtenir une bonne qualité de surface et une bonne résolution sur la géométrie. Malgré tout, une nouvelle fois, leur mise en œuvre pour des pièces aussi fines est difficile, notamment à cause de la viscosité des liquides utilisés qui parviennent difficilement dans des zones très restreintes. De plus, le moulage possède l'inconvénient de devoir retirer les pièces après fabrication, celles-ci étant encore "collées" au moule. Mener cette étape sans les détériorer s'avère compliqué vues l'épaisseur des samares. De la même manière que pour l'usinage, la logistique avec une fabrication à distance est également compliquée. Un système de moulage pourrait être développé "à la main" afin de réaliser des prototypes; mais la qualité attendue sur la samare et sur les hélices ne serait pas au rendez-vous. Pour toutes ces raisons, ce type de procédé n'est finalement pas sélectionné.

3.3.2 Fabrication additive

Notre attention se porte donc sur les procédés de fabrication additive, qui sont largement développés à l'école d'ingénieurs Polytech Annecy-Chambéry ainsi qu'à l'IUT d'Annecy. Les différents types de prototypage rapide sont nombreux et variés : nous ne faisons pas de description détaillée pour chacun d'eux ici. Celui possédant les meilleures résolutions et étant le plus accessible pour nous est la sté-réolithographie, et en particulier la technique de photopolymérisation (ou SLA pour StereoLithography Apparatus), qui fabrique les pièces grâce à un faisceau laser venant polymériser de la résine liquide. Le modèle numérique d'entrée est au format STL (pour STereoLithography), format conçu à l'origine spécifiquement pour ce procédé. La pièce est découpée en tranches, passant ainsi du 3D au 2D, avec une épaisseur de tranches choisie par l'utilisateur. Cette épaisseur joue un rôle important dans la qualité de la pièce produite.

Le choix de l'imprimante se porte sur un modèle accessible à l'IUT d'Annecy, la Form 2 du constructeur *Formlabs* (figure 3.4b). Elle fonctionne en SLA inversé, c'est-à-dire que les pièces sont fabriquées "tête en bas", avec la plateforme support au-dessus (figure 3.4a).

Sa précision de fabrication est correcte : le faisceau laser qui polymérise la résine plastique a un diamètre de 140 μ m, et l'épaisseur de couche peut être réglée à 25, 50 ou 100 μ m. Elle est choisie à 25 μ m pour nos fabrications de sorte d'avoir la meilleure qualité d'impression possible. Cette résolution est à prendre en compte pour l'étape de conception afin de proposer des pièces réalisables. Néanmoins, au vu du diamètre du laser et même avec l'épaisseur de couche minimale, nous pouvons déduire que les nervures sur l'aile de la samare sont impossibles à fabriquer correctement. En effet, leurs dimensions sont du même ordre de grandeur que l'épaisseur de couche. Ainsi, ce procédé présentant pourtant de très bonnes résolutions n'est pas suffisant pour ce genre de micro fabrications.



(a) Principe du SLA inversé (source : Free Spirit Design).

(b) Imprimante Form 2 utilisant le SLA inversé (source : Formlabs).

FIGURE 3.4 – Principe du SLA et machine utilisée pour nos impressions.

3.4 Conception

La géométrie précise des samares et la répartition de masse entre la graine et l'aile sont les caractéristiques principales à relever afin de concevoir une samare la plus ressemblante possible au modèle naturel. Ainsi, la cartographie de la surface de la samare 9 est utilisée dans les étapes de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), et les épaisseurs de profils sont ajustées afin que la proportion de masse dans la graine soit respectée.

Cela mène à la conception d'une samare artificielle, servant à avoir un modèle numérique le plus proche possible de la samare naturelle, du point de vue de la répartition de masse et donc des caractéristiques aérodynamiques. La partie de l'aile de ce modèle sert ensuite à l'assemblage d'une hélice bioinspirée, qui conserve les propriétés de la samare.

3.4.1 Samare artificielle

La CAO est effectuée à l'aide du logiciel SolidWorks développé par *Dassault Systemes*. Les points obtenus grâce au scan 3D sont importés dans le logiciel : malheureusement, comme il est noté plus haut, leur nombre trop important (plus de 3 000 000) ne permet pas de créer un surfaçage automatique, le logiciel ne prenant pas en compte une telle quantité de données. Néanmoins, les points du contour sont extraits afin d'avoir l'enveloppe extérieure de la samare et de copier sa géométrie.

Les profils d'aile intérieurs doivent donc être créés manuellement, tout en respectant les épaisseurs mesurées sur la samare réelle. La partie la plus massique et correspondant à la graine a une épaisseur maximale de 2 mm avec une forme assez ronde; son profil est illustré en vert en figure 3.5a. Au niveau de l'aile, le bord d'attaque a une épaisseur de 0,5 mm, puis le profil s'affine jusqu'à l'aile en elle-même avec une épaisseur de 0,1 mm (figure 3.5b). Les profils et les épaisseurs sont adaptés de telle sorte que la répartition de masse suive le pourcentage d'environ 80% déduit des mesures précédentes.

Une ondulation la plus proche possible de l'ondulation naturelle est ajoutée en bord de fuite de l'aile (figure 3.5c). Son amplitude est connue grâce aux hauteurs des points relevées lors de la numérisation.

Le résultat visuel est très satisfaisant au regard des formes observées sur les samares naturelles, en laissant de côté les nervures sur l'aile. Malheureusement, après de premières fabrications avec les paramètres de la machine détaillés plus haut, la qualité des pièces produites n'est pas acceptable. Notamment, de nombreuses zones sur les ailes sont très souvent mal fabriquées voire manquantes, à cause de la finesse de la structure (figure 3.6). Cela nous contraint donc à augmenter les épaisseurs, tout en conservant les proportions, afin que les pièces soient exploitables.



(d) Modèle numérique de la samare.

FIGURE 3.5 – Profils le long de la samare et modèle reconstruit en CAO.



FIGURE 3.6 – Une hélice avec des pales de 0,1 mm d'épaisseur présentant des zones non imprimées ou détériorées.

La nouvelle épaisseur appliquée à la partie fine de l'aile est choisie à 0,4 mm, pour minimiser le risque de mauvaise fabrication tout en conservant une dimension faible. Les autres parties sont donc modifiées en conséquence : la graine est épaissie à 3,8 mm au maximum, et le bord d'attaque de l'aile à 1 mm. Grâce aux estimations de volume proposées par SolidWorks, la proportion de masse contenue dans la graine est calculée à 77,5% : cette valeur est tout à fait correcte par rapport à la cible de 79,7%.

La samare avec cette nouvelle géométrie, qui convient beaucoup mieux pour la fabrication, est représentée en figure 3.7.

Pour revenir sur la conclusion quant à la répartition de masse des samares, prenons l'exemple d'un prototype antérieur réalisé avec des épaisseurs de profils arbitraires. Cette samare artificielle antérieure



FIGURE 3.7 – Modèle numérique de la samare avec les nouvelles épaisseurs.

ne présente alors pas du tout le phénomène d'autorotation des spécimens réels, mais chute de manière chaotique. La proportion de sa masse présente dans la graine est calculée à 49,8% : ce paramètre est donc effectivement critique dans l'aérodynamique. Au contraire, nous vérifions bien que le modèle présenté ci-dessus chute avec une autorotation similaire à celle des samares naturelles.

3.4.2 Conception d'hélices

Le modèle numérique de samare est finalement utilisé pour créer les pales d'une micro éolienne. Les parties massives des samares, les graines, sont retirées afin de pouvoir fixer chaque aile sur un moyeu cylindrique de 8 mm de diamètre. Le volume occupé par ce moyeu correspond le plus possible au volume occupé auparavant par la graine, et son centre (spécifié par le point gris sur la figure 3.8) est localisé au centre de la graine afin d'obtenir des caractéristiques aérodynamiques proches de celles de la samare.



FIGURE 3.8 – Modèle CAO d'une pale de micro éolienne. La forme du futur moyeu a été retirée du modèle complet de la samare.

Le moyeu est ensuite ajouté; celui-ci est percé d'un trou de 1,8 mm de diamètre en son centre, afin de raccorder l'hélice à la génératrice utilisée. Les angles de calage α_c et de conicité β sont créés entre le plan de la pale et le plan du moyeu, comme définis dans les chapitres 1 et 2. Enfin, le nombre de pales peut être ajusté : trois exemples d'hélices sont proposés en figure 3.9.

Comme discuté au chapitre 2, le nombre de pales choisi a une importance particulière vis-à-vis du rendement mécanique. Avec les vitesses spécifiques observées sur les samares, d'après la figure 3.10, le nombre de pales optimal serait de 4 (éolienne du type moulin hollandais). Il est judicieux d'estimer que la vitesse de rotation des hélices est inférieure à celle des samares, à cause du couple résistant dû à la génératrice. De plus, les vitesses de vent auxquelles la micro éolienne est testée sont supérieures ou égales à 1 m.s⁻¹ : ainsi, la vitesse spécifique λ sera plus faible, comme sur les micro éoliennes étudiées



FIGURE 3.9 – Exemples de modèles d'hélice, avec $\alpha_c = 30^\circ$ et $\beta = 5^\circ$.

dans le chapitre 1. Cela fait donc passer sur un autre type d'éoliennes, les éoliennes américaines, avec un nombre de pales beaucoup plus important que les moulins hollandais.

Ainsi, le nombre de pales minimal pour les prototypes est choisi à quatre. Sont également conçues des hélices en comprenant six et huit, cette dernière valeur étant la limite supérieure à cause de l'encombrement : plus de pales ne peuvent pas tenir sur le moyeu. Plusieurs prototypes avec plusieurs trios de valeurs (N_p, α_c, β) sont proposés et listés dans le tableau 3.2. Cela permet de tous les tester afin de finalement déterminer la configuration optimale.

L'influence de chacun des trois paramètres est analysée de manière indépendante, avec les deux autres paramètres fixés. L'angle de calage varie de 8° à 50° sur les prototypes avec $N_p = 6$ et $\beta = 5^\circ$. L'angle de conicité quant à lui prend les valeurs de 5°, 10° et 15°, avec $N_p = 6$ et $\alpha_c = 30^\circ$. Enfin, le nombre de pales varie pour deux couples (α_c , β) : (20°, 5°) et (30°, 5°).

La fabrication de ces hélices est décrite dans la partie suivante.



FIGURE 3.10 – Types d'éoliennes visées pour le prototype de micro éolienne, et coefficient de puissance envisageable [60].

Nom	N_p	$lpha_{\!\scriptscriptstyle {\cal C}} (^\circ)$	β (°)
6A8B5	6	8	5
4A20B5	4	20	5
6A20B5	6	20	5
8A20B5	8	20	5
4A30B5	4	30	5
6A30B5	6	30	5
6A30B10	6	30	10
6A30B15	6	30	15
8A30B5	8	30	5
6A40B5	6	40	5
6A50B5	6	50	5

TABLE 3.2 – Hélices conçues avec différents trios de valeurs pour les paramètres N_p , α_c et β .

3.5 Micro éolienne

Les hélices conçues sont fabriquées par stéréolithographie, afin de servir dans la micro éolienne à convertir l'énergie mécanique du vent en énergie mécanique de rotation sur un axe. Dans notre micro éolienne, l'hélice est interchangeable afin de pouvoir tester tous les modèles réalisés. En outre, l'élément qui va transformer l'énergie mécanique produite par l'hélice en énergie électrique, utilisable pour alimenter un capteur, est une génératrice électromagnétique, de dimensions du même ordre de grandeur que le moyeu des hélices.

3.5.1 Fabrication d'hélices par stéréolithographie

Le procédé de stéréolithographie dispose de plusieurs réglages à choisir convenablement en fonction de nos besoins. Avec l'épaisseur de couche, les paramètres très influents sur la qualité des pièces sont l'orientation des pièces et le type de supports. Ces deux réglages peuvent être entièrement choisis par l'utilisateur, ou bien laissés à déterminer par le logiciel associé à la machine (qui choisit dans ce cas les meilleurs d'après lui). Il est remarqué qu'une fabrication des hélices à plat implique une dégradation des pièces par rapport à une fabrication plutôt verticale : les pales sont mal imprimées et présentent des zones vides. Toutes les pièces sont donc orientées verticalement, de manière à optimiser la qualité finale. Avec une épaisseur de couche de 25 μ m, cela représente environ 1700 couches pour chaque hélice ; il faut compter environ 8 heures de fabrication pour une dizaine d'hélices.

Les supports servent à soutenir la pièce pendant l'impression, et en particulier les parties en porte-àfaux. Ce procédé est utilisé sur de nombreux types de fabrications additives, et est obligatoire pour garantir une bonne qualité de fabrication. Pour le procédé du SLA, les supports sont des tiges cylindriques verticales qui viennent se fixer à différents endroits stratégiques de la pièce. Sur le logiciel *PreForm* associée aux machines *Formlabs*, les paramètres réglables de ces supports sont leur densité et leur diamètre en pointe, au contact avec la pièce (figure 3.11). La combinaison des deux réglages doit être correcte afin de minimiser le risque de zones mal imprimées. Trop peu de supports et un diamètre trop faible ne suffiraient pas : certaines parties de la pièce seraient fabriquées "dans le vide" et se déformeraient alors pendant l'impression. Si les paramètres choisis ne conviennent pas, le logiciel émet une réserve quant à la fabrication pour prévenir l'utilisateur.



FIGURE 3.11 – Étape d'ajout des supports à une hélice : réglage de la densité et du diamètre de pointe ("taille du point").

La densité des supports peut être choisie entre 0,5 et 1,5 avec une valeur par défaut à 1. Cette valeur n'est pas à mettre en relation avec le volume de la pièce ou un autre paramètre : le logiciel propose simplement un nombre de supports correct d'après lui, qui correspond à la densité 1, et l'utilisateur peut ensuite modifier le nombre de supports entre 50% et 150% de cette densité. Deux exemples avec les densités extrêmes sont représentés en figure 3.12, pour un même diamètre de pointe.

Le réglage de la densité des supports fait très clairement une différence : sur la figure 3.12a, leur répartition est très sommaire et les parties de la pièce au-dessus de la moitié de sa hauteur ne sont pas du tout supportées (au risque donc d'être de très mauvaise qualité). Au contraire, en figure 3.12b, de nombreux supports sont présents pour chaque pale, ce qui garantit peu de déformations suite à la fabrication.

Le diamètre en pointe va de 0,3 mm à 1,3 mm, avec une valeur par défaut de 0,6 mm. Deux généra-



(b) Densité de 1,5.

FIGURE 3.12 – Supports ajoutés à l'hélice. Variation de la densité de 0,5 à 1,5 avec un diamètre en pointe fixe de 0,6 mm (valeur par défaut).

tions de supports avec ces deux diamètres sont proposés en figure 3.13.

Ce paramètre modifie nettement moins les supports que la densité, leurs emplacements sont conservés; seules les extrémités sont impactées. Son choix est donc moins critique vis-à-vis de la fabrication. On peut néanmoins remarquer sur la figure 3.13a un point d'exclamation rouge à côté du paramètre "Taille du point" : lorsque le diamètre choisi par l'utilisateur est trop faible, le logiciel prévient que cette valeur risque de compromettre la suite du processus.

Les supports ainsi placés pour soutenir la pièce ne servent que lors de la fabrication : ils doivent donc être retirés une fois les pièces terminées afin de permettre leur utilisation. Cela constitue une étape délicate pendant laquelle les pièces peuvent être détériorées. Une Dremell est utilisée avec un disque abrasif très fin, afin de découper les supports un à un, au niveau de l'attache avec la pièce. Cette contrainte post-fabrication est prise en compte dans le choix des caractéristiques des supports. Leur densité est donc choisie la plus faible possible, afin d'en avoir moins à retirer et donc de minimiser le risque de dégradation de l'hélice. De ce fait, le diamètre de pointe ne peut pas être choisi au minimum, mais doit avoir une valeur suffisante pour que la fabrication soit correcte. Les hélices après fabrication avec leurs supports se présentent comme montré en figure 3.14.



(b) Diamètre en pointe de 1,3 mm.

FIGURE 3.13 – Supports ajoutés à l'hélice. Variation du diamètre en pointe de 0,3 mm à 1,3 mm avec une densité fixe de 1 (valeur par défaut).

3.5.2 Génératrice électromagnétique

La génératrice à conversion électromagnétique que nous utilisons est obtenue grâce à une collaboration avec le pôle du CEA de Grenoble, et plus particulièrement Pierre Gasnier qui travaille également sur des éoliennes et hydroliennes de quelques centimètres de diamètre [105]. Ses travaux antérieurs ont mené à la réalisation d'une génératrice miniature présentant un bon rendement (qui est calculé dans nos tests de récupération d'énergie, au chapitre 4). La génératrice réelle avec ses dimensions est présentée en figure 3.15.

Son fonctionnement est assez classique : un aimant permanent cylindrique en samarium-cobalt (SmCo) est collé à l'axe de rotation, et un bobinage de fil de cuivre est effectué autour d'une armature plastique. L'alliage SmCo est choisi pour son importante induction rémanente de 1,1 T qui rend l'aimant très magnétique, et donc très efficace pour créer un courant dans la bobine. L'axe de rotation, sur lequel l'hélice vient se fixer, est monté sur deux roulements à billes de 5 mm de diamètre extérieur avec billes en céramique. Ce type de roulements présente un couple de démarrage dû aux frottements très faible, ce qui est recherché dans notre cas afin que l'éolienne démarre avec un couple moteur mécanique le plus faible



FIGURE 3.14 – Une hélice après fabrication, avec tous ses supports qui devront être retirés. Un petit défaut est à noter sur l'aile en bas à droite.



FIGURE 3.15 – La génératrice utilisée pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. La pièce de un euro permet de comparer.

possible. Une vue en coupe de l'intérieur de la génératrice est proposée en figure 3.16.

Sa faible surface apparente face au vent (ou prise au vent) d'environ 1,5 cm², est intéressante car elle laisse une surface libre relativement importante pour l'hélice. En effet, la surface de la génératrice face au vent implique une énergie quasiment perdue sur cette partie de l'hélice, car elle bloquera le vent juste en aval du rotor. Or, d'après la théorie de Betz, pour que la puissance produite par une hélice soit maximale il faut que l'on ait les relations suivantes entre la vitesse en amont U_0 , la vitesse au niveau de l'hélice U_1 et la vitesse du vent en aval U_2 [43] :

$$U_2 = \frac{1}{3}U_0$$
 et $U_1 = \frac{2}{3}U_0$ (3.1)

Si la vitesse juste après l'hélice U_1 est quasi nulle du fait d'une surface non libre, la puissance générée sur cette surface sera nulle également. Il faut donc toujours chercher à la minimiser.


FIGURE 3.16 – Vue en coupe partielle de la génératrice. L'aimant ainsi que les deux roulements sont bien visibles.

La génératrice a une résistance interne mesurée à $84,5 \Omega$. Cette résistance doit être prise en compte lors du calcul des pertes résistives dans la bobine, abordé au chapitre 4. L'extrémité de l'axe de rotation a un diamètre de 1,8 mm, et les hélices sont montées légèrement en force dessus, ce qui suffit pour qu'elles entrainent l'axe.

3.5.3 Micro éolienne complète

Finalement, le prototype de micro éolienne complet est obtenu en assemblant la génératrice avec une des hélices fabriquées. Toutes les hélices seront testées de cette manière, avec la même génératrice. Une vue 3D de la CAO de l'éolienne ainsi que l'éolienne réelle sont présentées en figure 3.17, avec la même hélice à six pales.



(a) Version numérique de la micro éolienne avec une hélice à six pales.



(b) La micro éolienne réelle avec une des hélices imprimées ($\beta = 15^{\circ}$). La pièce de un euro permet de comparer.

FIGURE 3.17 – CAO de la micro éolienne et version réelle.

L'encombrement de ce prototype est intéressant à connaitre. Le diamètre extérieur total est celui de l'hélice, donc d'environ 44 mm (plus ou moins en fonction de l'angle β) et la profondeur totale est de 25 mm. L'encombrement extérieur total représentant alors un cylindre de diamètre 44 mm et de longueur 25 mm est donc d'environ 38 cm³. Il peut être considéré comme plus faible en ne prenant en compte que les volumes extérieurs de la génératrice et de l'hélice. Cette grandeur est très convenable par rapport à l'état de l'art dans le domaine des micro éoliennes. En effet, le prototype de Howey *et al.* étant un des

plus petits avec un diamètre d'hélice de seulement 2 cm, a un encombrement de l'ordre de 32 cm^3 à 40 cm^3 .

3.6 Ce qu'il faut retenir

Ce chapitre décrit les étapes d'exploitation de la géométrie d'une samare, choisie parmi les cinq étudiées dans le chapitre 2 : numérisation de sa surface, reconception puis fabrication. Il vise à proposer des hélices bioinspirées pour micro éolienne, afin de dépasser les efficacités des hélices plus classiques proposées dans la littérature (avec des profils NACA ou des profils fins et cambrés).

La numérisation fournit une description très précise de la géométrie d'une face de la samare (résolutions latérale de 10 µm et verticale de 0,03 µm). Cette cartographie est utilisée afin de connaitre les amplitudes de certaines caractéristiques, notamment l'ondulation globale de l'aile. Une reconception en CAO est ensuite effectuée grâce au contour de la samare. L'épaisseur minimale permettant une fabrication correcte est déterminée par essais erreurs. Puis la partie correspondant à l'aile est utilisée afin de concevoir une hélice, en étant dupliquée N_p fois et fixée à un moyeu cylindrique plat. Ainsi, des prototypes d'hélices de 44 mm de diamètre sont conçus avec différents trios de paramètres (α_c, β, N_p). Ces paramètres varient linéairement et sont par la suite testés indépendamment.

Enfin, ces hélices (présentées dans le tableau 3.2) sont fabriquées par stéréolithographie. Le choix du procédé se fonde sur la résolution de fabrication par rapport à la qualité de pièce souhaitée et sur les disponibilités proches du laboratoire. Les paramètres propres à la stéréolithographie (orientation de la pièce, supports) sont étudiés et choisis de manière optimale pour les pièces réalisées ici. Par ailleurs, la fabrication est ici une limitation pour aller vers de plus petites échelles. Les hélices sont finalement assemblées avec une micro génératrice conçue au CEA de Grenoble. Elle est constituée d'un aimant cy-lindrique en alliage samarium cobalt (SmCo) tournant dans une bobine de fil de cuivre. La liaison pivot avec l'armature est assurée par deux roulements à billes céramique.

La micro éolienne ainsi créée est testée, avec chacune des hélices proposées, dans le chapitre suivant.

${\rm CHAPITRE}\,4$

Essais en soufflerie et résultats

"La Nature, en voilà une qui s'est spécialisée dans le pratique ! Pratique et pas couteux. Très bon rapport qualité-prix. L'ingénieur du pauvre." Éric-Emmanuel Schmitt, Lorsque j'étais une œuvre d'art

Sommaire

4.1	Introduction		54
4.2	Mesur	res des puissances et des pertes	54
	4.2.1	Puissance générée	55
	4.2.2	Pertes dues à la rotation	56
	4.2.3	Pertes résistives dans la bobine	58
4.3	Comp	araison des paramètres influents	59
	4.3.1	Angle de calage	70
	4.3.2	Angle de conicité	72
	4.3.3	Nombre de pales	73
	4.3.4	Validité du choix	75
4.4	Résult	ats pour l'hélice optimale	76
	4.4.1	Puissance produite par la micro éolienne	77
	4.4.2	Évolutions du coefficient de puissance et du rendement	79
	4.4.3	Retour sur l'état de l'art	31
4.5	Ce qu ²	'il faut retenir	33

4.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de finalement tester la micro éolienne dont la fabrication et l'assemblage sont présentés dans le chapitre précédent. Cela permet de tirer des conclusions quant à son efficacité et sa validité par rapport à l'utilisation prévue : l'alimentation de nœuds capteurs autonomes.

Les méthodes de calcul des pertes à différents niveaux dans la micro éolienne sont présentés, afin d'avoir la chaine d'énergie la plus complète et détaillée possible. Ces pertes rentrent notamment en compte dans le calcul du rendement mécanique de l'hélice C_P . De plus, le circuit électrique servant à mesurer la puissance générée et donc récupérable est détaillé.

Les résultats de puissance extraite du vent sont ensuite présentés pour toutes les hélices fabriquées. L'influence du nombre de pales N_p , de l'angle de calage α_c et de l'angle de conicité β est analysée pour des vitesses de vent allant de 1,2 m.s⁻¹ à 2,3 m.s⁻¹. Pour cela, les expérimentations sont effectuées dans la soufflerie présentée dans le chapitre 2. Une étude orthogonale avec paramètres indépendants conduit au choix de la meilleure hélice pour cette gamme de vitesses. Les performances de cette hélice sont alors testées à des vents plus forts, jusqu'à 8 m.s⁻¹, dans une soufflerie plus importante. Les mesures des puissances générées mènent en particulier au calcul du coefficient de puissance et du rendement total, ce qui permet de classer les performance du prototype par rapport à ceux présentés dans la littérature.

Enfin, la comparaison avec les niveaux de puissance requis pour un nœud capteur permet d'avoir un regard critique sur la possibilité ou non d'utiliser la micro éolienne, afin d'avoir un temps de cycle de mesure raisonnable.

4.2 Mesures des puissances et des pertes

Comme expliqué dans le chapitre 1, la puissance du vent arrivant sur l'hélice est dissipée en partie par des phénomènes non souhaités, ce qui se traduit par une moindre puissance récupérable en sortie du système de conversion électromécanique. La figure 4.1 représente les différentes étapes de la puissance d'entrée jusqu'à la puissance générée en sortie. Chaque étape possède des pertes propres, et donc un rendement toujours inférieur à 100% évidemment.



FIGURE 4.1 – Arbre des puissances depuis le vent en amont jusqu'à la résistance de charge en aval.

Dans un premier temps, la loi de Betz s'applique à la puissance du vent en limitant à environ 60%

sa partie récupérable par le dispositif : la puissance inexploitable et "perdue" est donc de 40%. Ensuite, l'hélice intervient et avec elle sa performance aérodynamique à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation : son rendement (par rapport à la puissance d'entrée du vent) est alors le coefficient de puissance C_P . Puis, avant d'arriver à la transformation en énergie électrique, deux nouvelles pertes entrent en jeu. L'axe de rotation entraine des pertes du simple fait de son mouvement. Entre autres, les roulements de la génératrice soutenant l'axe ne sont en effet pas parfaits, et présentent des frottements. De plus, l'axe est en partie freiné par l'interaction entre l'aimant et la bobine de la génératrice. L'ensemble de ces pertes dues à la rotation sont notées $P_f^{(-)}$ pour la suite. La dernière étape se passe au niveau de la bobine, avec sa capacité à transformer la rotation de l'aimant en courant électrique dans la bobine. Des pertes résistives ou pertes Joule sont alors présentes, notées $P_J^{(-)}$. Les estimations de $P_f^{(-)}$ et de $P_J^{(-)}$ sont effectuées respectivement dans les sections 4.2.2 et 4.2.3.

4.2.1 Puissance générée

Afin de mesurer la puissance produite par la micro éolienne, la génératrice de celle-ci est directement reliée à une résistance de charge variable R_{ch} . L'énergie générée se déchargera donc entièrement dans cette résistance. Afin de mesurer la tension à ses bornes notée V_{eff} , un oscilloscope est branché en parallèle (modèle DSO1014A de *Agilent Technologies*). La figure 4.2 schématise ce circuit électrique.



FIGURE 4.2 – Circuit électrique utilisé pour les tests, avec la génératrice de la micro éolienne, la résistance de charge et l'oscilloscope.

La génératrice possède sa propre résistance interne R_{int} , qui vaut 84,5 Ω . Pour les essais expérimentaux en soufflerie, la résistance de charge R_{ch} varie de 90 k Ω à 5 Ω au minimum.

L'oscilloscope fournit la valeur de la vraie tension efficace, ou tension RMS. Il indique également la fréquence du signal, qui est directement la fréquence de rotation de l'hélice notée f_h . Cet appareil possède sa propre impédance I_{osc} de 1 M Ω , qui vient en parallèle de la résistance de charge. Il est important de la prendre en compte pour les calculs de puissance ; ainsi, la résistance équivalente du circuit est :

$$R_{eq} = \frac{1}{1/R_{ch} + 1/I_{osc}} \ . \tag{4.1}$$

Finalement, I_{osc} étant très grande, elle n'impactera la valeur de R_{eq} que pour les grandes valeurs de R_{ch} , de l'ordre du mégaohm ou de plusieurs centaines de kiloohm. Pour des valeurs plus faibles, le terme $1/I_{osc}$ deviendra négligeable devant $1/R_{ch}$.

La puissance générée par la micro éolienne est donc dissipée dans la résistance de charge et dans l'impédance de l'oscilloscope. Elle est calculée grâce à la tension efficace mesurée et à la résistance équivalente :

$$P_{elec} = \frac{V_{eff}^2}{R_{eq}} \,. \tag{4.2}$$

La valeur de R_{ch} a beaucoup d'influence sur le comportement de l'hélice. Une très grande valeur (de l'ordre du mégaohm) ne la freine pas du tout; par contre une valeur plus faible, à partir du kiloohm

et en-dessous, la ralentit en créant un couple magnétique résistant plus important. Ce comportement affecte directement la fréquence du signal f_h , mais également la qualité de celui-ci. Pour exemple, deux signaux sont représentés en figure 4.3; ils sont obtenus pour une vitesse de vent de 2 m.s⁻¹. L'un est bien sinusoïdal (figure 4.3a), obtenu pour une valeur de R_{ch} très élevée (90 k Ω). L'autre au contraire est très déséquilibré et non centré verticalement sur 0 (figure 4.3b) et apparait pour une très faible valeur de la résistance de charge (50 Ω).





(a) Signal correct pour une résistance de charge de 90 k Ω .

(b) Signal déséquilibré pour une résistance de charge de 50 Ω .

FIGURE 4.3 – Évolution de la tension efficace en fonction du temps pour une vitesse de vent de 2 m.s⁻¹. Une résistance de charge importante donne un signal très sinusoïdal; au contraire, une résistance faible rend le signal asymétrique et saccadé.

Le couple résistant est donc variable pendant la rotation de l'hélice, du fait du champ magnétique de l'aimant et de la construction de la génératrice : l'hélice a un mouvement irrégulier.

De plus, grâce aux échelles de temps sur ces deux graphiques, il est bien vérifié que le signal correct a une fréquence bien plus élevée que celle du signal déséquilibré.

La vitesse de rotation de l'hélice est prise en compte dans les tracés de puissance. Comme vu dans l'état de l'art, pour représenter la puissance produite par la micro éolienne, l'axe des abscisses représente la vitesse spécifique λ . Elle est calculée ici d'après l'équation 4.3 avec *R* le rayon de l'hélice et U_0 la vitesse du vent en amont dans la soufflerie.

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_0} = \frac{R2\pi f_h}{U_0} \tag{4.3}$$

Cette grandeur varie donc en fonction de la valeur de R_{ch} , tout comme la fréquence f_h .

4.2.2 Pertes dues à la rotation

Les pertes mécaniques dues à la rotation de l'axe de la génératrice sont estimées grâce à des essais utilisés dans la littérature, appelés "let it roll" [105, 106]. Le principe est simple : la génératrice est alimentée par une source de tension sinusoïdale à une fréquence donnée. Puis, à l'instant 0, la source de tension est désactivée et l'hélice voit sa vitesse de rotation diminuer progressivement jusqu'à l'arrêt total. La figure 4.4 représente le signal délivré par la génératrice pour un essai de ce type, avec une fréquence d'excitation de départ de 40 Hz, soit une vitesse de rotation $\omega_0 = 2\pi \times 40 = 251$ rad.s⁻¹. Avant t = 0, l'amplitude est constante à environ 5 V et la fréquence est également constante. Puis ces deux grandeurs diminuent jusqu'à ce que l'hélice soit quasiment arrêtée, à droite du graphique.

Ce ralentissement progressif est dû en partie aux frottements dans les roulements entre l'axe de rotation et l'armature de la génératrice, mais aussi au couple créé par l'aimant ainsi qu'à la résistance du



FIGURE 4.4 – Évolution du signal électrique de la génératrice en fonction du temps lors d'un essai "let it roll". Essai effectué avec une hélice à quatre pales et une fréquence de départ de 40 Hz.

vent sur l'hélice. Cette dernière cause rentrant finalement en compte dans l'efficacité aérodynamique de l'hélice, il est choisi de la conserver. Afin de la supprimer, il faudrait effectuer le test sous une cloche à vide. La liaison pivot de l'axe étant assurée par deux roulements à billes, les contacts de celles-ci avec les bagues créent un couple de frottements. Ce couple est proportionnel à la vitesse de rotation, et peut être calculé d'après la relation suivante :

$$C_f = C_0 + K_v \omega \tag{4.4}$$

Dans cette équation, C_0 et K_v sont positifs ou nuls : C_0 est le couple à vitesse de rotation nulle (couple de "démarrage"), et K_v traduit le lien proportionnel du couple de frottements avec ω . Ces deux paramètres doivent être déterminés afin de calculer le couple résistant et donc d'estimer les pertes de puissance dans les roulements.

Dans cet objectif, Mungan propose une méthode dans un article de 2012 sur un disque en rotation [106]. Grâce aux relevés de l'essai "let it roll", la décroissance de la vitesse de rotation ω est décrite. De plus, l'évolution de ω dans le temps est régie par l'équation 4.5, dans laquelle les facteurs C_0 et K_v interviennent.

$$\boldsymbol{\omega}(t) = (\boldsymbol{\omega}_0 + \frac{C_0}{K_v}) \cdot \exp\left(\frac{-K_v t}{I}\right) - \frac{C_0}{K_v}$$
(4.5)

Il suffit alors de trouver le meilleur couple (C_0, K_v) pour que la courbe s'ajuste sur les valeurs expérimentales.

Pour cela, nous choisissons ici de détecter les pics du signal de la génératrice (voir figure 4.4) : entre chacun de ces pics, la période (ou pseudo-période) est calculée. Ainsi, les valeurs successives de ω dans le temps sont connues (voir figure 4.5). Nous observons bien une décroissance exponentielle. La loi proposée par Mungan dans l'équation 4.5 est ensuite déterminée au plus près de ces valeurs grâce à un algorithme d'optimisation aux moindres carrés.

Celui-ci renvoie alors les valeurs optimales selon lui de C_0 et de K_v , affichées sur le graphique : $C_0 = 0$ N.m et $K_v = 5,84.10^{-8}$ N.m.s.rad⁻¹. Grâce à cette identification, le couple de frottements C_f est connu



FIGURE 4.5 – Ajustement de la loi définissant $\omega(t)$ (équation 4.5) sur les mesures expérimentales grâce aux paramètres C_0 et K_v . Essai effectué avec une hélice à quatre pales.

et les pertes par frottements dans les roulements sont calculées simplement par l'équation suivante :

$$P_f^{(-)} = C_f \boldsymbol{\omega} = (C_0 + K_v \boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\omega}$$
(4.6)

Ici, la valeur de C_0 étant nulle, ces pertes sont proportionnelles à la vitesse de rotation de l'axe, donc de l'hélice, au carré. Ainsi, à des vitesses de rotation élevées donc à des vitesses spécifiques λ élevées, ces pertes seront plus importantes. Une estimation rapide de leur ordre de grandeur peut être faite. La vitesse de rotation de l'hélice est en général de l'ordre de 1000 tr.min⁻¹, soit environ 100 rad.s⁻¹. Avec $K_{\nu} = 5,84.10^{-8}$ N.m.s.rad⁻¹, nous avons :

$$P_f^{(-)} = K_{\nu} \omega^2 \approx 5,84.10^{-8} \times 100^2 \approx 10^{-3} \text{ W}$$
(4.7)

Les pertes estimées sont de l'ordre du milliwatt, ce qui est conséquent au vu des puissances produites visées. Mais il faut garder en tête que la puissance maximale n'est pas atteinte pour la vitesse spécifique (donc la vitesse de rotation) maximale, mais pour une valeur optimale plus faible. Les pertes par frottements sont alors plus faibles et le rendement est meilleur.

Le fait que l'optimisation déduise que $C_0 = 0$ est critiquable. Il parait en effet étonnant que le couple de démarrage de la génératrice soit nul : il existe toujours un couple résistant, même très faible, qui empêche la rotation de l'axe. Cette valeur nulle est tout de même conservée, faute d'autre moyen pour la déterminer.

4.2.3 Pertes résistives dans la bobine

Les autres pertes qui peuvent être anticipées sont celles qui apparaissent dans la bobine par effet Joule. Elles sont alors simplement calculées de la manière suivante : $P_J^{(-)} = R_{int}I^2$, avec I l'intensité du courant traversant la bobine. Lors des mesures, cette intensité n'est pas directement mesurée; nous connaissons par contre la tension aux bornes de la résistance de charge. Les pertes dans la bobine s'expriment donc :

$$P_J^{(-)} = R_{int} I^2 = R_{int} \left(\frac{V_{eff}}{R_{eq}}\right)^2$$
(4.8)

Les pertes dans la bobine seront donc d'autant plus grandes que la résistance équivalente (et donc la résistance de charge variable) sera faible. Comme dans la section précédente, une estimation rapide donne une idée de la valeur de ces pertes. La tension efficace est de l'ordre du volt, et les valeurs les plus faibles de R_{eq} correspondant à cette tension sont d'environ 100 Ω . Alors, nous pouvons estimer les pertes résistives :

$$P_J^{(-)} = R_{int} \left(\frac{V_{eff}}{R_{eq}}\right)^2 \approx 84, 5 \times \left(\frac{1}{100}\right)^2 \approx 84, 5 \times 10^{-4} \approx 10^{-2} \,\mathrm{W}$$
(4.9)

La puissance perdue par effet Joule est estimée à environ 10 mW. Cette valeur est surement surévaluée : en effet, pour une résistance de charge aussi faible que 100 Ω , la tension à ses bornes est probablement bien plus faible que 1 V. Les pertes sont précisées avec les analyses des résultats en section 4.4.

Il est intéressant de noter le moment où les deux pertes dans la génératrice apparaissent. La puissance perdue par frottements est grande quand la vitesse de rotation est grande : donc pour une grande vitesse spécifique. À l'inverse, la puissance perdue par effet Joule est inversement proportionnelle à la résistance équivalente au carré. Comme il est précisé en section 4.2.1 et en figure 4.3, une faible résistance équivalente et donc une faible résistance de charge va mener à une plus faible vitesse de rotation, soit finalement une plus faible vitesse spécifique.

Ainsi, l'amplitude des deux types de pertes est maximale à des valeurs de vitesse spécifique λ différentes : $P_J^{(-)}$ aux faibles valeurs et $P_f^{(-)}$ aux grandes valeurs. Les pertes dues à la rotation de l'axe et notamment dans les roulements sont donc prédominantes lorsque la vitesse spécifique est grande, donc avec une grande vitesse de rotation et/ou une faible vitesse de vent. Au contraire, aux faibles vitesses de rotation et/ou aux fortes vitesses de vent, ce sont les pertes résistives qui sont les plus notables. La zone intermédiaire présente alors *a priori* une puissance perdue totale moins importante et donc une meilleure puissance électrique de sortie.

4.3 Comparaison des paramètres influents

Dans cette section, la micro éolienne est testée en soufflerie avec chacune des hélices du tableau 3.2. Les différentes valeurs des paramètres α_c , β et N_p sont alors comparées, afin de finalement déterminer l'hélice optimale pour la géométrie bioinspirée et pour de faibles vitesses de vent.

Il est choisi de comparer les valeurs de coefficient de puissance C_P et de rendement total η pour chaque hélice. Le rendement est calculé simplement d'après la puissance du vent et la puissance électrique en sortie :

$$\eta = \frac{P_{elec}}{P_{vent}} \times 100 \tag{4.10}$$

Pour connaitre le coefficient de puissance, qui est le rendement mécanique propre à l'hélice, il faut connaitre la puissance mécanique que celle-ci développe, $P_{meca,h}$. Grâce aux calculs des pertes dans les roulements et dans la bobine de la génératrice et d'après la figure 4.1, son expression est la suivante :

$$P_{meca,h} = P_{elec} + P_J^{(-)} + P_f^{(-)}$$
(4.11)

Alors, le coefficient de puissance est connu :

$$C_P = \frac{P_{meca,h}}{P_{vent}} \times 100 = \frac{P_{elec} + P_J^{(-)} + P_f^{(-)}}{P_{vent}} \times 100$$
(4.12)

Concernant la gamme de vitesses de vent utilisée : d'une part, la valeur maximale atteignable dans la soufflerie est de 2,3 m.s⁻¹. C'est donc la valeur limite haute pour ces analyses. D'autre part, les hélices sont toutes testées à la vitesse la plus faible possible. Ainsi, comme il est décrit dans les sections suivantes, les meilleures d'entre elles sont entrainées en rotation jusqu'à 1,2 m.s⁻¹, alors que certaines s'arrêtent en-dessous de 1,4 m.s⁻¹, voire 1,7 m.s⁻¹. Ce phénomène est bien sûr pris en compte dans le choix des paramètres optimaux : le but étant d'avoir une micro éolienne fonctionnant à la plus faible vitesse possible, les hélices tournant à 1,2 m.s⁻¹ sont favorisées devant les autres.

La méthode suivie n'est pas un plan d'expériences, les trois paramètres étant considérés comme indépendants. Des tests entièrement orthogonaux sont réalisés : deux des paramètres sont fixés à une valeur par défaut tandis que le troisième varie. La validité du choix final est confirmée par une analyse *a posteriori* à l'aide d'un outil logiciel de plans d'expériences.

4.3.1 Angle de calage

Les angles de calage α_c choisis pour les pales des hélices sont de 8°, 20°, 30°, 40° et 50°. Chaque hélice a un angle de conicité fixe, $\beta = 5^\circ$, et un nombre de pales fixe également, $N_p = 6$. Ainsi, l'influence de l'angle de calage est analysée indépendamment des autres paramètres.

La figure 4.6 représente le coefficient de puissance de chaque hélice à différentes vitesses de vent.



FIGURE 4.6 – Coefficient de puissance en fonction de la vitesse du vent, pour différents angles de calage des pales α_c .

Deux premières conclusions apparaissent très clairement : le coefficient de puissance pour les angles de 8° et de 50° est bien plus bas que les autres. De plus, nous remarquons que la vitesse de vent minimale atteignable est plus élevée que pour les autres angles : $1,7 \text{ m.s}^{-1}$ pour $\alpha_c = 8^\circ$, et 1,4 m.s⁻¹ pour $\alpha_c = 50^\circ$. L'hélice ne démarre pas en-dessous de ces valeurs, alors que l'objectif avec la micro éolienne est d'exploiter les vitesses les plus faibles possibles. Le choix d'un de ces angles n'est donc pas judicieux, l'angle de 8° se révélant être le moins intéressant.

Les angles de 20°, 30° et 40° permettent eux un démarrage et une production d'énergie à $1,2 \text{ m.s}^{-1}$. Parmi eux, le moins efficace est celui de 40° : bien qu'il présente un coefficient de puissance un peu plus élevé pour $1,2 \text{ m.s}^{-1}$, sa valeur plafonne rapidement à 17% à partir de $1,7 \text{ m.s}^{-1}$. Enfin, il faut s'attarder sur les angles de 20° et 30°, qui sont les plus prometteurs. Le premier induit un C_P plus faible que le deuxième pour les vitesses de vent les plus faibles, mais l'égale puis le dépasse à partir de 2 m.s⁻¹. Sa progression est en tout cas toujours croissante jusqu'à 2,3 m.s⁻¹. Le deuxième, $\alpha_c = 30^\circ$, est plus intéressant à faibles vitesses : son coefficient de puissance associé augmente rapidement, mais il plafonne ensuite à 25% puis retombe à 24% pour 2,3 m.s⁻¹.

Au niveau du coefficient de puissance, le choix se fait donc entre $\alpha_c = 20^\circ$ et $\alpha_c = 30^\circ$, avec une préférence pour le premier à des vitesses supérieures à 2 m.s⁻¹ et pour le deuxième à des vitesses inférieures.

Le même type de graphique est réalisé en figure 4.7, avec cette fois-ci les valeurs du rendement total η .



FIGURE 4.7 – Rendement total en fonction de la vitesse du vent, pour différents angles de calage des pales α_c .

Une nouvelle fois, les angles de 8° et de 50° présentent les plus faibles rendements. Ils sont donc clairement écartés.

Par contre, la situation se renverse partiellement pour les trois autres angles de calage. En effet, l'angle de 20° mène à un rendement de la micro éolienne plus faible que celui de 40° pour toutes les vitesses de vent testées. Pour sa part, l'angle de 30° apparait comme le meilleur choix même si le rendement qu'il entraine est un peu inférieur à celui pour 40°, à très faibles vitesses. Sa progression est cette fois-ci constante, son évolution ne présente pas de "plateau".

Une chose étonnante à observer est que l'angle de calage mesuré sur la samare 9 lors des tests sur axe fixe, $\alpha_c = 8^\circ$, conduit aux pires performances pour la micro éolienne, que ce soit pour le coefficient de puissance ou pour le rendement global. Ainsi, le fait d'associer plusieurs ailes de samares entre elles doit modifier leur comportement aérodynamique et en tout cas leur orientation optimale dans l'espace.

Choix de l'angle de calage optimal

Finalement, au vu des résultats pour le coefficient de puissance et pour le rendement de la micro éolienne, un angle de calage $\alpha_c = 30^\circ$ est choisi. Il présente globalement le meilleur rendement, et son coefficient de puissance est également très bon, même si sa valeur parait plafonner à partir de 1,7 m.s⁻¹.

4.3.2 Angle de conicité

Une étude similaire est menée afin de déterminer l'angle de conicité β optimal. Pour cela, l'angle de calage est fixé à la valeur choisie dans la section précédente, 30°, et le nombre de pales est fixé par défaut à six. Les angles β testés sont de 5°, 10° et 15°. Ces valeurs sont choisies car elles correspondent à la gamme d'angles de conicité mesurés sur les samares sur axe fixe, et détaillés dans le tableau 2.6.

Les valeurs de C_P pour les hélices conçues avec ces paramètres sont tracées dans le graphique en figure 4.8.



FIGURE 4.8 – Coefficient de puissance en fonction de la vitesse du vent, pour différents angles de conicité β .

Nous remarquons tout de suite, sur la plage testée, la plus faible influence du paramètre β sur le coefficient de puissance que celle de l'angle α_c : les valeurs sont beaucoup plus resserrées entre elles.

À très faible vitesse de vent, $U_0 = 1,2 \text{ m.s}^{-1}$, l'angle de 10° est bien au-dessus des deux autres ; mais sa progression n'est pas suffisante et il présente le plus faible coefficient de puissance dès 1,7 m.s⁻¹ et au-delà. L'angle de 5° est quant à lui le plus intéressant pour toutes les vitesses de vent supérieures à 1,2 m.s⁻¹. Pour 2 m.s⁻¹ et 2,3 m.s⁻¹, les valeurs $\beta = 5^\circ$ et $\beta = 15^\circ$ ont des efficacités équivalentes.

Un point global à relever concernant le coefficient de puissance est le fait que, pour les trois angles de conicité indifféremment, celui-ci atteint son maximum à $1,7 \text{ m.s}^{-1}$ ou 2m.s^{-1} puis décroit à $2,3 \text{ m.s}^{-1}$. Cela laisse à penser que les hélices sont bien optimisées pour un fonctionnement à faibles vitesses de vent, ce qui était visé avec la conception inspirée des samares, et que leur efficacité chute pour les vitesses trop élevées.

La figure 4.9 représente cette fois l'évolution du rendement total de la micro éolienne pour la gamme de vitesses de vent, pour les trois valeurs d'angle de conicité.

L'analyse est assez similaire à celle pour le coefficient de puissance. L'hélice ayant un angle de 10° est un peu plus efficace que les deux autres à la vitesse minimale, mais elle perd cet avantage au-delà. Globalement, un angle β de 5° est le plus justifié car il donne un meilleur rendement pour quasiment toutes les vitesses de vent testées.

Cette fois-ci, l'évolution du rendement en fonction de la vitesse est beaucoup plus constante et quasi linéaire. Le maximum est atteint pour la vitesse la plus grande : il n'y a pas de chute du rendement



FIGURE 4.9 – Rendement total en fonction de la vitesse du vent, pour différents angles de conicité β .

pour $U_0 = 2,3 \text{ m.s}^{-1}$. Les hélices (et leur coefficient de puissance associé) sont moins efficaces à cette vitesse qu'à 2 m.s⁻¹, alors que la micro éolienne est au contraire dans l'ensemble plus efficace : cela implique que les pertes par frottements et par effet Joule sont plus faibles à plus grande vitesse, et que la génératrice a donc un meilleur rendement interne.

Choix de l'angle de conicité optimal

Les conclusions des analyses concernant le coefficient de puissance et le rendement total convergent : dans les deux cas, le meilleur choix pour l'angle de conicité est $\beta = 5^\circ$, même s'il ne présente pas les meilleures performances pour une vitesse de vent de 1,2 m.s⁻¹.

Nous pouvons alors noter la différence entre cette valeur optimale pour l'hélice et la valeur mesurée sur la samare 9 lors des tests sur axe fixe du chapitre 2. En effet, l'angle de conicité était alors naturellement de 17,1°. Or, d'après les résultats présentés dans cette section, le réglage équivalent de cet angle à $\beta = 15^{\circ}$ n'est pas le réglage optimal. De manière similaire à l'angle de calage, la géométrie d'hélice proposée implique peut-être une modification du comportement des pales par rapport à la rotation libre d'une samare sur un axe. L'angle de conicité menant à la plus grande efficacité aérodynamique est modifié.

4.3.3 Nombre de pales

L'influence du troisième paramètre variable, le nombre de pales fixées au moyeu de l'hélice, est étudiée ici. Les deux résultats précédents sont exploités : l'angle de calage est fixé à $\alpha_c = 30^\circ$ et l'angle de conicité à $\beta = 5^\circ$. Les trois hélices utilisées ont un nombre de pales choisi à $N_p = 4$, $N_p = 6$ et $N_p = 8$.

Les coefficients de puissance de chaque hélice aux différentes vitesses de vent sont donnés en figure 4.10.

Il est rapidement conclu qu'un choix de quatre pales n'est pas pertinent. En effet, dans un premier temps, l'hélice à quatre pales ne fonctionne pas en-dessous de $1,4 \text{ m.s}^{-1}$ alors que les deux autres descendent à $1,2 \text{ m.s}^{-1}$. Dans un second temps, le coefficient de puissance de cette hélice est inférieur à celui des deux autres pour toutes les vitesses jusqu'à $2,3 \text{ m.s}^{-1}$. Cette valeur est donc écartée.



FIGURE 4.10 – Coefficient de puissance en fonction de la vitesse du vent, pour quatre, six et huit pales.

Entre six et huit pales, les différences sont beaucoup plus minces. Le coefficient de puissance est identique à toutes les vitesses de vent, sauf $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ et $1,7 \text{ m.s}^{-1}$. Pour la plus faible le paramètre $N_p = 8$ est bien meilleur, tandis que pour la seconde c'est le réglage de $N_p = 6$ qui montre un petit avantage. Il est donc difficile de les départager, même si la volonté d'avoir une micro éolienne efficace à des vents les plus faibles possibles fait tendre le choix vers une hélice à huit pales.

Afin de compléter ces conclusions, l'évolution du rendement total η en fonction du nombre de pales est représentée en figure 4.11.



FIGURE 4.11 – Rendement total en fonction de la vitesse du vent, pour quatre, six et huit pales.

Concernant l'hélice à quatre pales, l'analyse est identique à celle du coefficient de puissance : l'hélice

ne tourne pas à $1,2 \text{ m.s}^{-1}$, et le rendement associé est toujours inférieur à celui pour les autres hélices. Ce choix est donc le moins judicieux.

Par ailleurs, la distinction entre $N_p = 6$ et $N_p = 8$ est plus aisée ici. À part pour 2 m.s⁻¹ où le rendement est égal pour les deux valeurs, l'hélice à huit pales se révèle conduire à une micro éolienne plus efficace à toutes les vitesses de vent. Ainsi, vis-à-vis du rendement total, l'utilisation d'une hélice à huit pales est donc la plus évidente.

Choix du nombre de pales optimal

D'après les résultats et les explications précédentes, le réglage optimal du nombre de pales est très clairement $N_p = 8$. Pour revenir à l'étude de Hau sur les coefficients de puissance pour différents types d'éoliennes (figure 3.10), cela nous place dans la catégorie des éoliennes américaines avec un grand nombre de pales, plutôt que dans celle des moulins à quatre pales. Ce choix est validé dans la partie résultats quant à la gamme de vitesses spécifiques en jeu.

Il est à noter que les résultats pour le couple $(\alpha_c, \beta) = (20^\circ, 5^\circ)$ avec quatre, six et huit pales ne sont pas présentés ici. Néanmoins, les mesures de coefficients de puissance et de rendements sont réalisées. La conclusion quant au nombre de pales est identique : le choix le plus logique reste huit pales.

Enfin, un phénomène particulier apparait pour quasiment toutes les hélices (il est rapidement décrit dans la section précédente). En effet, une différence d'évolution entre le coefficient de puissance et le rendement global est toujours présente. La vitesse du vent augmentant, le rendement augmente de manière assez linéaire et sa valeur est maximale (dans la gamme de vitesses utilisée) à 2,3 m.s⁻¹. Cela est vrai pour toutes les hélices testées. En parallèle, le comportement du coefficient de puissance est différent. Sa dépendance à la vitesse de vent suit une courbe en forme de cloche, avec un maximum à 1,7 m.s⁻¹ ou 2 m.s^{-1} en fonction des hélices. Sa valeur pour la vitesse maximale de $2,3 \text{ m.s}^{-1}$ est toujours inférieure. De cette manière, en ne prenant en compte que le coefficient de puissance, il apparait que les hélices sont optimisées et présentent une efficacité optimale pour de faibles vents. Mais au vu du rendement total de la micro éolienne, cette moindre efficacité à la vitesse de vent maximale est contrebalancée par des pertes dans la génératrice plus faibles. Pour résumer, le rendement optimal n'est pas induit par le coefficient de puissance optimal.

4.3.4 Validité du choix

Les analyses de l'influence de l'angle de calage, de l'angle de conicité et du nombre de pales nous mènent à choisir leur valeur conduisant à la meilleure hélice, pour la gamme de vitesses de vent utilisée $(1,2 \text{ m.s}^{-1} \text{ à } 2,3 \text{ m.s}^{-1})$. Le modèle optimal est alors le 8A30B5, avec $\alpha_c = 30^\circ$, $\beta = 5^\circ$ et $N_p = 8$.

Ce choix est validé grâce à une analyse post-essais proposée dans le logiciel *Ellistat*. La grandeur utilisée comme réponse pour chaque hélice est la valeur du rendement total η obtenue à 2,3 m.s⁻¹. Les résultats des essais précédents sont renseignés dans le logiciel, et un modèle quadratique est demandé pour chaque paramètre. Le rendement s'exprime donc :

$$\eta = c_1 \cdot \alpha_c + c_2 \cdot \beta + c_3 \cdot N_p + c_4 \cdot \alpha_c^2 + c_5 \cdot \beta^2 + c_6 \cdot N_p^2 + c_7 , \qquad (4.13)$$

 c_i étant des réels. La figure 4.12 représente l'influence de chaque paramètre sur la réponse.

Les traits verticaux rouge correspondent aux valeurs d'angle de calage, d'angle de conicité et de nombre de pales pour lesquels le rendement est maximal. Avec les résultats des essais menés, la configuration optimale est d'après le logiciel (α_c , β , N_p) = (31,52°, 5°, 8). Cela confirme le choix effectué, avec un angle de calage de 30° au lieu des 31,52° théorique.



FIGURE 4.12 – Modèle quadratique pour chaque paramètre avec comme réponse le rendement total à 2,3 m.s⁻¹. La maximisation de cette réponse implique un trio de paramètres tel que $(\alpha_c, \beta, N_p) = (31,52^\circ, 5^\circ, 8)$.

4.4 Résultats pour l'hélice optimale

L'hélice optimale étant identifiée, cette section présente donc les résultats de puissances générées et de rendements avec la micro éolienne dotée de ce modèle.

Par ailleurs, quelques détails sur son comportement général sont nécessaires. En particulier, les vitesses de démarrage (*cut-in speed*) et d'arrêt (*cut-off speed*) sont des paramètres importants pour caractériser une éolienne et sont toujours rapportées dans les études sur celles-ci. Ces essais sont effectués ici avec une résistance de charge de 1 M Ω , considérée comme une résistance "infinie". Elle crée alors le couple résistant le plus faible possible sur l'axe de rotation, ce qui montre les capacités maximales de la micro éolienne sous de faibles vents.

L'hélice choisie pour ces travaux démarre d'elle-même à environ 2 m.s^{-1} , pour s'arrêter si la vitesse passe en-dessous de 1 m.s^{-1} . Toutefois, la vitesse minimale permettant d'avoir un signal correct et exploitable est de $1,2 \text{ m.s}^{-1}$. Ainsi, les tests effectués entre $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ et 2 m.s^{-1} nécessitent de lancer l'hélice, avec un vent plus fort ou manuellement, avant de redescendre la vitesse à l'intérieur de la souffierie.

De plus, différentes gammes de vitesses de vent sont utilisées. De $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ à $2,3 \text{ m.s}^{-1}$, les essais expérimentaux sont menés dans la soufflerie construite dans le cadre de ces travaux, qui ne permet pas d'obtenir un vent plus important. Bien que l'objectif soit de proposer une micro éolienne optimisée pour les faibles vitesses, celle-ci a tout de même été testée pour une deuxième gamme de vents allant de 3 m.s^{-1} à 8 m.s^{-1} , correspondant plutôt à des vitesses observées en extérieur et exploitables par des éoliennes de grandes dimensions. Cela permet de définir l'évolution du coefficient de puissance et du rendement et par suite de constater les performances du prototype, à des hautes vitesses de vent auxquelles il risque d'être soumis en fonction du lieu de son implantation.

Une soufflerie différente a alors été nécessaire : avec des dimensions bien plus imposantes et une vitesse maximale d'environ 45 m.s⁻¹, une version de la soufflerie commercialisée par *Deltalab* est accessible et convient à nos besoins (figure 4.13).

Avec cette installation, il est nécessaire d'appliquer un filtre sur le signal délivré par la génératrice. En effet, le boitier d'alimentation de la soufflerie émet énormément de bruit, ce qui perturbe le relevé de l'oscilloscope et donc la tension efficace. Ces bruits ont une fréquence très variable mais toujours élevée, alors que l'axe de rotation de la micro éolienne ne dépasse pas $f_h = 125$ Hz. Par conséquent, un filtre



FIGURE 4.13 – Soufflerie Deltalab utilisée pour les essais à des vents de 3 m.s⁻¹ à 8 m.s⁻¹.

numérique passe-bas intégré à l'oscilloscope est utilisé : pour tous les essais, sa fréquence de coupure est modifiée et est réglée juste au-dessus de la fréquence de la génératrice. De cette manière, tous les bruits parasites sont supprimés.

Finalement, afin que la mesure de la vitesse du vent soit reproductible entre les essais, l'anémomètre installé sur la plus petite soufflerie est ensuite équipé sur celle-ci. L'essai mené à 2,3 m.s⁻¹ est réalisé dans chacune des souffleries, dans le but de vérifier que les puissances mesurées et que le comportement de l'hélice soient identiques. Ainsi, les résultats sont effectivement comparables malgré l'utilisation de deux machines différentes.

Le nombre de Reynolds est calculé pour l'hélice sélectionnée et pour les vitesses de vent employées, afin de le comparer aux valeurs relevées pour les insectes et les graines d'érable dans le chapitre 1. La longueur de corde c de chacune des huit pales est de 8 mm. Par suite, le nombre de Reynolds vaut 640 à $U_0 = 1,2 \text{ m.s}^{-1}$ et environ 4300 à $U_0 = 8 \text{ m.s}^{-1}$. Cela correspond tout à fait à la plage mesurée sur les ailes de spécimens vivants, d'environ $10^3 - 10^4$. Nous pouvons donc nous attendre à un fonctionnement aérodynamique aussi efficient que ceux-ci.

4.4.1 Puissance produite par la micro éolienne

La puissance électrique en sortie de la génératrice est calculée comme décrit en début de chapitre, grâce à la tension efficace mesurée par l'oscilloscope. Cette tension varie en fonction de la valeur de la résistance de charge. Pour chaque vitesse de vent, celle-ci est réglée à 90 k Ω puis est diminuée jusqu'à la valeur faisant s'arrêter l'hélice, à cause d'un trop grand couple résistant. Les premières puissances mesurées sont situées à de grandes vitesses spécifiques (à droite sur les graphiques), puis ce paramètre diminue jusqu'à l'arrêt total (proche de $\lambda = 0$). Par conséquent, la forme classique et attendue des courbes "vitesse spécifique/puissance" est une cloche où apparait un optimum, ou parfois un plateau de puissances maximales.

Ainsi, la figure 4.14 représente ces courbes pour la première gamme de vitesses de vent (vents "faibles"). Dans la légende en haut à droite, le premier pourcentage correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance, et le deuxième à celle maximale du rendement total.

La puissance maximale développée par la génératrice s'échelonne d'environ 50 μ W à 1,2 m.s⁻¹ à 1 mW à 2,3 m.s⁻¹, pour une limite haute de vitesse spécifique de 1,6. De plus, il y a bien toujours un optimum de vitesse spécifique auquel la puissance produite est la plus grande. Cette optimum, noté λ_{opt} se situe entre 0,5 et 1 pour la présente gamme de vitesses de vent. Cependant, les courbes ne présentent pas un pic très marqué : nous avons plutôt une présence de plateaux. La "largeur" de ces plateaux, pour laquelle la puissance reste à au moins 95% de sa valeur maximale, est d'environ 0,2 à 0,3 unités de la vitesse spécifique. Par conséquent, le paramètre influençant celle-ci étant la résistance de charge, son



FIGURE 4.14 – Puissance générée en fonction de la vitesse spécifique pour l'hélice 8A30B5, pour des vents faibles.

réglage connait une plage de valeurs adéquates assez importante : en effet, une faible modification de la résistance autour de la valeur optimale n'engendre pas de chute de puissance.

Concernant les besoins des capteurs communicants énoncés dans le chapitre 1, les analyses de Huet sur une plateforme complète avec accéléromètre [9] montrent que 100 μ W permettent un cycle de transmission/réception toutes les 5,3 s, ce qui est très suffisant. Ici, la micro éolienne délivre cette puissance dès 1,4 m.s⁻¹ sur une gamme de vitesses spécifiques très étendue (de 0,4 à 0,8). Malgré seulement 50 μ W générés à 1,2 m.s⁻¹, un capteur est tout de même capable d'avoir un fonctionnement tout à fait correct avec un temps de cycle un peu plus long, de 15 s à 20 s.

Enfin, le coefficient de puissance et le rendement augmentent avec la vitesse de vent, pour atteindre respectivement 25% à 2 m.s⁻¹ et 9% à 2,3 m.s⁻¹. Ils présentent en effet de très bonnes valeurs pour des vents aussi faibles, par rapport aux résultats de la littérature aux même dimensions.

En outre, le même type d'essais sont menés pour des vents "forts", de 3 m.s^{-1} à 8 m.s^{-1} . Les résultats sont reportés dans la figure 4.15.

Les puissances en jeu sont alors dans une gamme supérieure, de l'ordre de plusieurs dizaines de milliwatts. La valeur maximale mesurée est d'environ 4 mW à 3 m.s⁻¹ et monte jusqu'à 80 mW à 8 m.s⁻¹. Ici, la vitesse spécifique est supérieure également et dépasse 2 pour toutes les vitesses de vent; de plus, sa valeur λ_{opt} menant à la puissance maximale est comprise entre 1 et 1,4. De nouveau, des plateaux optimums sont visibles avec une largeur d'environ 0,5 pour la vitesse spécifique, ce qui est toujours positif.

Ainsi, sous un vent de 8 m.s^{-1} , la micro éolienne a la capacité d'alimenter en continu un capteur autonome standard sans stockage d'énergie. En effet, les puces RF sont les plus énergivores avec une consommation d'environ 80 mW : cette puissance est donc entièrement disponible via notre prototype. Par conséquent, si le capteur alimenté a un temps de cycle de quelques secondes et qu'il dispose d'un système de stockage d'énergie, il est tout à fait possible de le remplir au maximum aux vents forts, pour pallier la plus faible production électrique aux vents très faibles voire l'absence de vent.

Par ailleurs, le coefficient de puissance et le rendement total atteignent d'excellentes valeurs : 29% et 17,5% respectivement à 4 m.s⁻¹, qui est la vitesse de vent optimale. Nous remarquons que ceux-ci



FIGURE 4.15 – Puissance générée en fonction de la vitesse spécifique pour l'hélice 8A30B5, pour des vents forts.

n'augmentent pas de manière constante avec le vent, et que les meilleurs valeurs ne sont pas obtenues à 8 m.s^{-1} . La section suivante étudie justement ces évolutions.

4.4.2 Évolutions du coefficient de puissance et du rendement

La progression du coefficient de puissance en fonction des vitesses de vent testées est tracée en figure 4.16.



FIGURE 4.16 – Évolution du coefficient de puissance maximal en fonction de la vitesse de vent.

En premier lieu, le maximum local de 25% à faible vitesse ($U_0 = 2 \text{ m.s}^{-1}$) est de nouveau mis en lumière ici. Le coefficient de puissance redescend ensuite pour $U_0 = 2,3 \text{ m.s}^{-1}$. Dans un second temps, il remonte brusquement à 29% pour 3 m.s⁻¹ et 4 m.s⁻¹, puis chute de nouveau à 26-27% au-delà. Globalement, l'évolution semble suivre une loi logarithmique, avec une ascension très rapide puis une stabilisation autour de 27%.

De la même manière, la figure 4.17 représente l'évolution du rendement total maximal à chaque vitesse de vent.

FIGURE 4.17 – Évolution du rendement total maximal en fonction de la vitesse de vent.

Cette fois-ci, la progression est assez différente. En effet, de $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ à 4 m.s^{-1} le rendement suit une loi très linéaire. Puis au-dessus de 4 m.s^{-1} , tout comme sur la figure 4.16, il n'augmente plus et est limité à environ 17%.

Par conséquent, la micro éolienne n'est pas forcément optimisée pour de très faibles vitesses de l'ordre de 1 m.s^{-1} à 2 m.s^{-1} . Mais l'objectif initial est tout de même partiellement rempli, 4 m.s^{-1} étant une force de vent encore faible. De plus, il est très fréquent dans la littérature de voir le rendement total augmenter jusqu'à 10 m.s^{-1} et plus. Le fait qu'il atteigne ici son maximum beaucoup plus bas est une avancée notable et prouve une meilleure prise en compte des effets de la réduction du nombre de Reynolds pour le prototype présenté.

En comparaison avec le coefficient de puissance, l'évolution du rendement total met en avant le fait que les pertes rencontrées entre la puissance sur l'hélice et celle en sortie de la génératrice sont plus importantes entre $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ et 4 m.s^{-1} . Cela est vérifié en traçant le profil du rendement de la génératrice seule, en figure 4.18. Ce rendement est simplement calculé comme le rapport du rendement total et du coefficient de puissance, et d'après les équations 4.10 et 4.12 :

$$\eta_{gene} = \frac{\eta}{C_P} \times 100 = \frac{P_{elec}}{P_{elec} + P_I^{(-)} + P_f^{(-)}}$$
(4.14)

La génératrice est donc de plus en plus efficace lorsque la vitesse de vent augmente, jusqu'à atteindre presque 65% de rendement à 5 m.s⁻¹. Les pertes dans les roulements et dans la bobine sont en effet importantes : à 3 m.s⁻¹, seulement 45% de la puissance mécanique arrivant sur l'axe de rotation est finalement convertie en puissance électrique. Ce pourcentage chute à 30% à 2 m.s⁻¹, et à moins de 20% à $1,2 \text{ m.s}^{-1}$.

Néanmoins, ce rendement est globalement tout à fait correct, en comparaison des travaux effectués à cette échelle de grandeur. Par exemple, l'éolienne de Rancourt *et al.* démontre un coefficient de puissance important de 25% à environ 12 m.s⁻¹; malgré cela, le rendement calculé de la génératrice est au maximum de 50% à cette vitesse de vent [55]. De la même manière, le convertisseur mécanique/électrique



FIGURE 4.18 – Évolution du rendement de la génératrice maximal en fonction de la vitesse de vent.

de la micro éolienne développée par Howey *et al.* présente une efficacité optimale de 50% également à 7 m.s⁻¹ [58]. En somme, les dispositifs de conversion électromagnétique sont assez peu efficaces et ne parviennent à transformer que la moitié de la puissance leur étant fournie. Ce constant est encore pire à des vents inférieurs à 5 m.s⁻¹, avec des rendements de génératrice de l'ordre de 25% et moins.

Ainsi, les 65% atteints par la génératrice dans nos essais sont finalement élevés pour ses très faibles dimensions (environ 3 cm³). Le travail de miniaturisation réalisé par les chercheurs du CEA Grenoble est donc remarquable. Mais le rendement η_{gene} peut très certainement être encore amélioré, avec une attention toutes particulière à la réduction des pertes relevées et estimées dans ce manuscrit.

Pour conclure, le point de fonctionnement idéal de la micro éolienne, tant pour le coefficient de puissance que pour le rendement total, se situe à une vitesse de vent de 4 m.s^{-1} . Son efficacité reste très satisfaisante à des vitesses supérieures; cependant, ses caractéristiques se dégradent pour des vents plus faibles, tout en restant correctes.

Ces conclusions sont confrontées à la littérature, afin de vérifier le positionnement global de nos travaux. Notamment, la comparaison du coefficient de puissance avec l'étude de Hau est menée.

4.4.3 Retour sur l'état de l'art

D'après les résultats de puissance produite présentés en figures 4.14 et 4.15, le meilleur coefficient de puissance et le meilleur rendement de la micro éolienne apparaissent tous les deux à 4 m.s^{-1} . La vitesse spécifique à laquelle l'hélice agit à cette vitesse de vent est comprise entre 0,25 et 2. Finalement, il est intéressant d'étudier les différences entre ce prototype et les caractéristiques proposées par Hau pour le type d'éolienne correspondant [60]. Bien que le rapport d'échelle entre notre prototype et les éoliennes classiques soit important, cette comparaison donne une idée des écarts restant entre les deux. Comme discuté dans le chapitre 3, les éoliennes optimales pour une vitesse spécifique de 0 à 2 sont les éoliennes américaines avec un grand nombre de pales. Cela coïncide bien avec le nombre de pales optimal identifié à huit.

Pour cela, l'évolution du coefficient de puissance de la micro éolienne à 4 m.s^{-1} est tracée en figure 4.19, avec celle du coefficient de puissance maximal atteignable pour les éoliennes américaines.

Les deux courbes sont donc parfaitement dans la même gamme de vitesses spécifiques : leurs coefficients de puissance sont alors bien comparables. Le maximum décrit par Hau d'environ 31% est approché



FIGURE 4.19 – Reprise de la figure 1.11 pour le type "éolienne américaine", avec ajout des résultats présentés ici pour le coefficient de puissance optimal.

par notre prototype avec 29%. Mais ces deux maximums ne ressortent pas au même endroit : autour de $\lambda = 1$ en théorie pour l'éolienne américaine et $\lambda = 1,4$ pour la micro éolienne. Pour une vitesse spécifique plus faible, entre 0,5 et 1,4, l'efficacité réelle de l'hélice utilisée est bien moindre que la théorie. Il y a donc une place importante pour une amélioration des performances dans cette plage et par conséquent pour des vitesses de rotation faibles.

Par ailleurs, il est surprenant de voir le coefficient de puissance dépasser la valeur théorique au-dessus de $\lambda = 1,75$. Alors qu'il est censé chuter à ces vitesses spécifiques, il diminue plus lentement pour nos essais.

Ces résultats sont globalement très encourageants et montrent une bonne exploitation de l'hélice par rapport au coefficient de puissance théorique envisageable, pour les vitesses spécifiques en jeu. D'autant plus que les valeurs déterminées par Hau s'appliquent à des éoliennes de dimensions "standard", avec de bien plus grands rotors et donc des nombres de Reynolds plus élevés.

Enfin, les valeurs maximales de rendements mesurées lors des essais sont mises en relation avec celles de la littérature, pour toutes les éoliennes de 10 cm de diamètre et moins. La figure 4.20 reprend l'état de l'art des différents coefficients de puissance et rendements totaux exposé dans le chapitre 1 (1.10), avec nos résultats.

Le meilleur coefficient de puissance dans la littérature est celui de Rancourt *et al.* avec 25%, pour un diamètre de 4,2 cm [55]. Nos travaux se placent juste au-dessus, avec 29% pour 4,4 cm de diamètre. L'hélice bioinspirée est ainsi la plus efficace. La plus-value est meilleure concernant le rendement total. En effet, il est au maximum de 15% pour le prototype de Marin *et al.* avec 7,2 cm de diamètre [53], et de 9,5% pour 4,2 cm [55]. Notre micro éolienne démontre pour sa part un rendement total supérieur, avec 17,5% à seulement 4 m.s⁻¹.

Par conséquent, non seulement l'hélice propose les meilleures caractéristiques aérodynamiques intrinsèques, mais la génératrice électromagnétique employée possède également un très bon rendement. Cela mène à une efficacité globale très intéressante au vu des faibles dimensions. Ces résultats se rapprochent de certains observés pour de plus grands diamètres où les nombres de Reynolds sont bien plus importants, avec par exemple les travaux de Kishore *et al.* [45–47].



FIGURE 4.20 – Reprise de la figure 1.10 sur la zone 0 - 10 cm, avec ajout des résultats présentés ici.

4.5 Ce qu'il faut retenir

Cette dernière partie du manuscrit se focalise sur la vérification expérimentale des capacités de la micro éolienne, afin de comparer celle-ci à la littérature et de revenir sur les objectifs initiaux.

Pour cela, dans un premier temps, les pertes dans les roulements de la génératrice dues aux frottements et les pertes par effet Joule dans la bobine sont estimées. Pour les premières, des essais "let it roll" sont menés afin de mesurer la décroissance de la vitesse de rotation de l'hélice. L'ajustement d'une loi théorique conduit à déterminer les deux paramètres pilotant les pertes, en partie proportionnelles à la vitesse de rotation. Les pertes résistives sont calculées grâce à la valeur de la résistance interne de la génératrice et au courant mesuré dans le circuit. Ces estimations servent à remonter à la puissance mécanique disponible sur l'hélice, puis d'en déduire assez finement le coefficient de puissance.

Dans un second temps, nous analysons l'influence des trois paramètres géométriques des hélices à faibles vitesses de vent (de 1,2 m.s⁻¹ à 2,3 m.s⁻¹), à savoir l'angle de calage α_c , l'angle de conicité β et le nombre de pales N_p . Les valeurs optimales se dégagent assez clairement, et guident vers le choix de l'hélice optimale : le modèle 8A30B5, avec $\alpha_c = 30^\circ$, $\beta = 5^\circ$ et $N_p = 8$. Le nombre de pales place donc la micro éolienne dans la catégorie des éoliennes américaines décrite par Hau.

Ensuite, les résultats des essais avec l'hélice choisie sont présentés. Les vitesses de vent vont alors de 1,2 m.s⁻¹ à 8 m.s⁻¹, dans deux souffleries différentes. La micro éolienne démarre sous un vent d'environ 2 m.s^{-1} , et s'arrête à partir de 1 m.s⁻¹. La puissance maximale produite et déchargée dans la résistance de charge va d'environ 50 µW à 1,2 m.s⁻¹ ($C_P = 14\%$ et $\eta = 2,5\%$) à plus de 80 mW à 8 m.s⁻¹ ($C_P = 27\%$ et $\eta = 17,1\%$). L'optimum de coefficient de puissance et de rendement total n'intervient pas à la plus grande vitesse testée, mais à 4 m.s⁻¹, avec $C_P = 29\%$ et $\eta = 17,5\%$. La vitesse spécifique reste dans une plage allant de 0,1 à 2,1, avec une valeur optimale entre 0,5 et 1,4 en fonction de la force du vent. Par ailleurs, l'évolution du coefficient de puissance et du rendement total en fonction de la vitesse du vent présentent un plateau à partir de $U_0 = 4 \text{ m.s}^{-1}$: en effet, pour des vitesses plus importantes, elles ne progressent plus et se stabilisent. Le phénomène est identique pour le rendement interne à la génératrice, qui plafonne à environ 65%. Cette conclusion est intéressante dans notre cas, puisqu'elle démontre que la micro éolienne est optimisée pour des flux assez faibles et ne nécessite pas de forts vents pour déployer

toute son efficacité.

Un retour à l'état de l'art permet de nous positionner par rapport aux travaux antérieurs. En comparaison au coefficient de puissance atteignable par les éoliennes américaines d'après les travaux de Hau, les meilleurs résultats pour le prototype présenté ici sont très satisfaisants. Ils approchent la valeur maximale de 31% et dépassent la courbe théorique pour une vitesse spécifique supérieure à 1,75. Cela est très encourageant du fait que l'étude de Hau s'intéresse aux éoliennes de grandes dimensions, opérant à des vitesses de vents et donc des nombres de Reynolds plus élevés. Il est donc possible d'accroitre considérablement l'efficacité aux faibles dimensions par rapport à la littérature.

Pour finir, le coefficient de puissance et le rendement total dépassent ceux des différents prototypes décrits dans le chapitre 1. Notre micro éolienne est ainsi la plus efficiente de toutes celles ayant un diamètre de 10 cm et moins. En comparaison avec les travaux de Rancourt *et al.*, dont le rotor a un diamètre très similaire à celui développé dans ces travaux (4,2 cm contre 4,4 cm), il apparait que la plus grande progression concerne le rendement qui passe de 9,5% à 17,5%. Pour revenir aux objectifs initiaux, la barre des 10% de rendement est belle et bien dépassée.

Conclusion générale

"Ce n'est pas fini tant que ce n'est pas fini." Yogi Berra

Conclusions

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit portent sur la miniaturisation d'un système de récupération d'énergie éolienne, plus particulièrement d'une éolienne à axe horizontal. Ils se déroulent au sein du laboratoire SYMME à Annecy, avec une collaboration du CEA de Grenoble ayant également des activités dans ce domaine. Ils permettent de répondre à la question de recherche définie lors du premier chapitre :

Est-il possible de concevoir un système de récupération d'énergie éolienne de 4 cm de diamètre ou moins, basé sur une géométrie d'éolienne horizontale, dont le rendement total dépasse 10%?

Le domaine d'application est focalisé sur l'alimentation de capteurs autonomes fonctionnant dans l'Internet des Objets et requérant des puissances de quelques microwatts à plusieurs milliwatts. Une utilisation en intérieur étant visée, les vitesses de vent auxquelles nos génératrices doivent œuvrer sont très faibles : environ 1 m.s^{-1} en moyenne. Cette contrainte ainsi que les dimensions visées pour notre prototype, de l'ordre du centimètre, mènent à des nombres de Reynolds faibles d'environ 10^4 et en-dessous (contre 10^6 et plus pour les éoliennes de grande taille). Ce paramètre est caractéristique du comportement du flux d'air : ainsi, il indique que nous nous positionnons à la frontière entre un fonctionnement classique où les effets d'inertie sont prépondérants et un fonctionnement radicalement différent et assez inconnu où les effets visqueux dominent. La miniaturisation extrême nous pousse donc à développer des systèmes qui exploitent plutôt les frottements et ainsi à modifier les règles de conception utilisées à grande échelle.

Il découle de l'étude de la littérature certaines solutions à ce défi pour les profils de pales. Il apparait notamment qu'un profil très fin et cambré génère le meilleur rapport entre portance et trainée à de faibles Reynolds. Malgré cela, toutes les micro éoliennes réalisées jusqu'à maintenant présentent des rendements bien en-dessous des possibilités théoriques, avec un coefficient de puissance maximal de 25% (pour 4,2 cm de diamètre) et un rendement total du système plafonnant à 15% (pour 7,2 cm de diamètre).

Afin de dépasser ces limites, une solution augmentant l'efficacité aérodynamique des hélices de micro éoliennes est proposée : s'inspirer de la nature. Pour cela, une étude approfondie du comportement des graines d'érables, ou samares, est réalisée afin de vérifier leurs caractéristiques de vol. Cette étape est menée grâce à l'utilisation de deux caméras rapides synchronisées entre elles, enregistrant 2000 images par seconde. La calibration des caméras leur permet de connaitre leurs positions relatives et également celle de l'objet filmé en trois dimensions. Le mouvement des samares est alors entièrement déterminé et décrit par son torseur cinématique, avec le vecteur vitesse de rotation $\vec{\Omega}$ et le vecteur vitesse linéaire \vec{V}_P .

Ce montage est utilisé lors de tests en chute libre des graines : les résultats sont cohérents avec ceux mentionnés dans la littérature, avec une vitesse de rotation Ω_z selon l'axe vertical d'environ 100 rad.s⁻¹ et une vitesse de chute verticale $V_{P,z}$ de 1 m.s⁻¹. Dès lors, il apparait que les samares freinent grandement leur chute par un mouvement de rotation rapide, à des nombres de Reynolds d'environ 10³. C'est justement ce mouvement qui nous intéresse dans l'application à une hélice de micro éolienne. Afin de se rapprocher de cette situation, une deuxième batterie d'expérimentations est réalisée dans laquelle les samares sont percées au niveau de leur centre de rotation et sont placées sur un axe métallique horizontal, dans une soufflerie. Celle-ci est construite dans cet objectif, avec une vitesse de vent réglable de 0 m.s⁻¹ à 2,3 m.s⁻¹. De cette manière, un vent de 1 m.s⁻¹ est imposé et le mouvement des samares sur l'axe fixe est étudié. Il met en évidence une vitesse de rotation bien plus importante qu'en chute libre, jusqu'à 89% plus élevée, et atteignant presque les 2000 trs.min⁻¹. Ce résultat confirme notre intérêt pour les graines d'érable et leur efficacité aérodynamique.

Puis, la samare présentant la vitesse de rotation la plus rapide est numérisée grâce à une machine Altimet afin d'obtenir un nuage de points correspondant à l'une de ses faces. Cette cartographie est ensuite utilisée dans la conception d'une aile la plus fidèle possible au spécimen réel. De cela, des hélices sont conçues en assemblant un nombre N_p d'ailes sur un moyeu avec des orientations variables. Ces hélices de 44 mm de diamètre sont par la suite fabriquées par stéréolithographie, un procédé de fabrication additive fonctionnant avec un laser venant polymériser une résine plastique liquide. Sa résolution est de 140 µm dans les directions horizontales (diamètre du faisceau laser) et de 25 µm verticalement (épaisseur de couche). Les pièces ainsi réalisées sont assemblées à une génératrice fournie par une équipe du CEA, de dimensions $11 \times 14 \times 25$ mm³. Cela finalise notre micro éolienne, d'un volume extérieur d'environ 38 cm³.

Enfin, ce prototype est testé avec toutes les hélices produites, afin de sélectionner la plus efficace à de faibles vitesses de vent ($U_0 \le 2,3 \text{ m.s}^{-1}$). Ces essais sont menés dans la soufflerie décrite ci-dessus; les critères de sélection sont le coefficient de puissance C_P , le rendement total η de la micro éolienne et la vitesse de vent minimale à laquelle celle-ci fonctionne. La puissance produite par le système se décharge dans une résistance de charge variable et vaut : $P_{elec} = V_{eff}^2/R_{eq}$. Le rendement total est donc le rapport de cette puissance sur la puissance cinétique du vent incident sur les pales. Afin de remonter au coefficient de puissance (lié à la puissance mécanique de rotation disponible sur l'hélice), les pertes dues à la rotation de l'axe et les pertes par effet Joule dans la bobine sont estimées.

Ainsi, la meilleur hélice correspondant à notre besoin est choisie : elle révèle un coefficient de puissance de 24% et un rendement total de 9% à 2,3 m.s⁻¹. Par ailleurs, elle produit une puissance significative ($\sim 50 \ \mu\text{W}$) à des vents de seulement 1,2 m.s⁻¹ et s'arrête en-dessous de cette valeur. Elle est ensuite testée dans une soufflerie différente sous des vents allant jusqu'à 8 m.s⁻¹. Alors, sa puissance générée dépasse les 80 mW; le coefficient de puissance et le rendement total sont maximaux pour 4 m.s⁻¹ avec 29% et 17,5% respectivement. Ces deux grandeurs augmentent entre 1,2 m.s⁻¹ et 4 m.s⁻¹, puis plafonnent pour des vitesses supérieures.

Finalement, la micro éolienne réalisée se démarque par rapport à l'état de l'art et propose de meilleurs rendements. Pour des dimensions similaires, de précieux pourcents sont gagnés sur le coefficient de puissance de l'hélice et sur le rendement total grâce à une conception nouvelle et bioinspirée. D'après une étude de Hau sur les coefficients de puissance atteignables par les différents types d'éoliennes à grande échelle, nous nous plaçons aux mêmes ordres de grandeur que les éoliennes dites "américaines" (avec un nombre de pales important de huit ou plus).

Pour conclure, le biomimétisme apporte une grande plus-value dans ce domaine précis : en redéfinissant les règles de conception des pales des hélices de faibles dimensions, leur efficacité s'en voit accrue et leur utilisation d'autant plus justifiée. Cette solution est plus adéquate que des profils de pales classiques de type NACA. L'étude des spécimens naturels est donc réellement attrayante pour l'ingénierie et est capable notamment d'augmenter les rendements de nombreuses machines, comme le montrent différents projets bioinspirés dans de nombreux domaines.

Perspectives

Dans une perspective de continuité et d'amélioration de ces travaux, des pistes de recherches futures sont proposées ici.

En premier lieu, la méthodologie utilisée pour déterminer les vitesses de rotation des samares, menée dans le chapitre 2, est critiquable : cela est discuté en section 2.5. Une compréhension et une description plus fines du comportement des samares sur un axe de rotation fixe seraient possibles grâce à des tests plus larges avec un plus grand nombre de spécimens. La faible quantité de données ne permet pas ici une étude statistique. Ce travail permettrait surement d'expliquer les causes des différences de vitesses de rotation entre chute libre et rotation en soufflerie.

Toujours concernant les graines d'érable, il serait intéressant d'estimer la puissance développée par celles-ci sur axe fixe. La mesure du couple généré, bien que compliquée, s'avère incontournable.

Du point de vue du prototype en lui-même, il est décrit que la méthode de fabrication limite les possibilités de conception et en particulier l'épaisseur des pales. En effet, celles-ci sont épaissies afin d'être fabricables. De ce fait, des procédés autres que la stéréolithographie non mentionnés dans ce manuscrit pourraient permettre de copier plus justement la géométrie des samares. En conséquence, leurs propriétés aérodynamiques n'en seraient que plus fidèlement retranscrites.

De plus, cette contrainte de fabrication nous empêche évidemment de miniaturiser davantage les hélices et donc la micro éolienne : une réduction en dimensions et en épaisseur mènerait à des pièces non exploitables. Il parait alors important d'améliorer le procédé, afin de diminuer les dimensions et de proposer par exemple une hélice de 1 cm de diamètre. Par ailleurs, une nouvelle réduction d'échelle de l'hélice doit obligatoirement être accompagnée d'une réduction d'échelle de la génératrice. Des difficultés supplémentaires apparaissent alors : roulements suffisamment petits et efficaces, bobine avec un fil plus fin et moins de tours autour de l'armature, aimant moins gros et donc moins de génération de courant.

Cela nous mène à la question du choix de l'aimant présent dans la génératrice, qui crée le courant électrique dans la bobine. En effet, l'alliage samarium cobalt (SmCo) est intéressant du point de vue de son efficacité, mais n'est pas optimal. Un aimant en néodyme fer bore (NdFeB) présente pour sa part une meilleure induction rémanente (1,3 T contre 1,1 T pour le SmCo). Il est globalement plus magnétique et est donc capable de créer un courant électrique plus important dans la bobine à l'intérieur de laquelle il est en rotation. Cette modification permettrait d'augmenter encore le rendement interne de la génératrice.

Ensuite, des tests d'alimentation d'un capteur communicant réel seraient les bienvenus. Le CEA a déjà développé une petite plateforme avec plusieurs types de nœuds capteurs (température, accéléromètre...) qui communique par Bluetooth, avec affichage des résultats sur ordinateur. L'énergie amenée par le système de récupération est stockée dans une capacité; lorsque la tension dans celle-ci atteint une valeur seuil (environ 3 V), les données mesurées sont envoyées et tracées en temps réel.

Ce genre d'essais va être mené dans la soufflerie à grande vitesse, de sorte que la tension requise puisse être produite par la micro éolienne. Cela validera les performances du système et permettra de confirmer sa légitimité en tant que source d'alimentation pour un capteur autonome communicant.

Pour finir, des travaux connexes à cette thèse permettraient de compléter le projet. En effet, comme pour tout projet d'implantation à grande ou petite échelle, l'étude du potentiel éolien doit être réalisée. Dans notre cas, il s'agit plutôt de zones à l'intérieur de bâtiments où des courants d'air circulent. Des difficultés propres à cette situation sont à prévoir, avec des vents très fluctuants, tant pour leur direction que pour leur vitesse qui peut présenter des pics. Il apparait donc intéressant de cartographier les lieux où ces faibles vitesses de vents sont les plus exploitables et d'évaluer leur intensité, afin de choisir par la suite les emplacements adéquats pour des micro éoliennes.

Note de fin personnelle

J'ai entendu un jour lors d'une soutenance de thèse, de la part d'un industriel d'un grand groupe grenoblois : "Moi le rendement je m'en fous, tant que ça produit assez". Je trouve personnellement ce genre de remarques désolantes.

Nous vivons dans un monde dans lequel les ressources s'épuisent et dans lequel l'environnement (climat, espèces vivantes etc) s'effondre petit à petit. Malgré cela, nous continuons à piller et à surexploiter la planète, sans nous poser plus de question. Nous sommes de plus en plus dépendant de l'énergie, en particulier électrique, et nous créons toujours plus de gadgets qui nous apportent un éphémère plaisir personnel en contrepartie d'une consommation importante de ressources.

Ce genre de raisonnements montre bien l'objectif de certains : produire coute que coute sans se soucier des conséquences. Pour ma part, il m'apparait aberrant de concevoir une usine à gaz avec d'énormes pertes pour générer quelques milliwatts : le rendement est je pense une priorité afin de minimiser notre impact global. De la même manière, rouler seul dans un 4×4 Porsche consommant 15 L/100 km pour se déplacer de 5 km montre un décalage complet avec les priorités et les urgences actuelles.

Finalement, le prototype décrit dans ces travaux présente de meilleurs rendements que la littérature, ce qui est positif. Néanmoins, la solution au dérèglement climatique n'est pas dans la récupération d'énergie, si efficace soit-elle. Nous devons petit à petit nous "contraindre" avec bonheur à la sobriété énergétique : redéfinir nos vrais besoins, laisser de côté certaines pratiques énergivores et inutiles et consommer plus raisonnablement (que ce soit pour les vêtements ou pour la nourriture). Le temps presse.

Bibliographie

- [1] F. K. Shaikh and S. Zeadally. *Energy harvesting in wireless sensor networks : A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55 :1041–1054, 2016.
- [2] S. Boisseau, P. Gasnier, G. Despesse et al. *Biomechanical Energy Harvesting and Autonomous Systems*. URSI Journées scientifiques 2014 L'Homme connecté, pages 41–48, 2014.
- [3] A. Baranov, D. Spirjakin, S. Akbari and A. Somov. *Optimization of power consumption for gas* sensor nodes : A survey. Sensors and Actuators, A : Physical, 233 :279–289, 2015.
- [4] A. Moschitta and I. Neri. Power consumption Assessment in Wireless Sensor Networks. ICT -Energy - Concepts Towards Zero - Power Information and Communication Technology, pages 203–224, 2014.
- [5] J. Llosa, M. Martínez De Marigorta, J. Bécares et al. Nanomaterials make possible integrating gas sensors in wireless and ultralow power consumption motes. Procedia Engineering, 25 :1053– 1056, 2011.
- [6] D. Spirjakin, A. M. Baranov, A. Somov and V. Sleptsov. Investigation of heating profiles and optimization of power consumption of gas sensors for wireless sensor networks. Sensors and Actuators, A : Physical, 247 :247–253, 2016.
- [7] L. Xiao, J. Qian, Z. Lian et al. *RF energy powered wireless temperature sensor for monitoring electrical equipment*. Sensors and Actuators, A : Physical, 249 :276–283, 2016.
- [8] Y. S. Lin, D. Sylvester and D. Blaauw. An ultra low power 1V, 220nW temperature sensor for passive wireless applications. Proceedings of the Custom Integrated Circuits Conference, (Cicc) :507–510, 2008.
- [9] F. Huet. Développement de structures hybrides électromécaniques pour micro-sources d'énergie : générateurs piézoélectriques linéaires et non linéaires. PhD thesis, 2016.
- [10] S. Chamanian, H. Ulusan, O. Zorlu and H. Külah. Wearable battery-less wireless sensor network with electromagnetic energy harvesting system. Sensors and Actuators, A : Physical, 249 :77–84, 2016.
- [11] R. M. Ferdous, A. W. Reza and M. F. Siddiqui. *Renewable energy harvesting for wireless sensors using passive RFID tag technology : A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58 :1114–1128, 2016.
- [12] B. Safari. Modeling wind speed and wind power distributions in Rwanda. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(2):925–935, 2011.
- [13] S. Bressers, D. Avirovik, C. Vernieri et al. Small-scale modular windmill. American Ceramic Society Bulletin, 89(8):34–40, 2010.

- [14] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indraja and V. H. Krishna. A review on small scale wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56:1351–1371, 2016.
- [15] O. Alavi, K. Mohammadi and A. Mostafaeipour. Evaluating the suitability of wind speed probability distribution models : A case of study of east and southeast parts of Iran. Energy Conversion and Management, 119(April) :101–108, 2016.
- [16] O. Alavi, A. Sedaghat and A. Mostafaeipour. Sensitivity analysis of different wind speed distribution models with actual and truncated wind data : A case study for Kerman, Iran. Energy Conversion and Management, 120:51–61, 2016.
- [17] S. Mathew, C. M. Lim, M. I. Petra et al. Matching the Characteristics of Low Wind Speed Turbines with Candidate Wind Regimes. Energy Procedia, 95 :286–293, 2016.
- [18] T. F. Ishugah, Y. Li, R. Z. Wang and J. K. Kiplagat. Advances in wind energy resource exploitation in urban environment : A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37 :613–626, 2014.
- [19] G. Dragomir, A. Şerban, G. NAstase and A. I. Brezeanu. Wind energy in Romania : A review from 2009 to 2016. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64 :129–143, 2016.
- [20] B. Iglinski, A. Iglinska, G. Kozinski, M. Skrzatek and R. Buczkowski. Wind energy in Poland -History, current state, surveys, Renewable Energy Sources Act, SWOT analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64 :19–33, 2016.
- [21] A. F. Ghaith, F. M. Epplin and R. S. Frazier. Economics of household wind turbine grid-tied systems for five wind resource levels and alternative grid pricing rates. Renewable Energy, 109:155– 167, 2017.
- [22] R. Karabacak, E. Güven Acar, H. Kumsar et al. Experimental investigation of the cooling performance of a ground source heat pump system in Denizli, Turkey. International Journal of Refrigeration, 34(2):454–465, 2011.
- [23] J. K. Calautit and B. R. Hughes. *Measurement and prediction of the indoor airflow in a room ventilated with a commercial wind tower*. Energy and Buildings, 84 :367–377, 2014.
- [24] Y. Jiang, D. Alexander, H. Jenkins, R. Arthur and Q. Chen. Natural ventilation in buildings : measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large eddy simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91(3):23, 2003.
- [25] E. Moreau-Guigon, F. Alliot, J. Gaspéri et al. Seasonal fate and gas/particle partitioning of semivolatile organic compounds in indoor and outdoor air. Atmospheric Environment, 147:423–433, 2016.
- [26] Y. Shang, B. Li, A. N. Baldwin et al. Investigation of indoor air quality in shopping malls during summer in Western China using subjective survey and field measurement. Building and Environment, 108 :1–11, 2016.
- [27] L. Rong, D. Liu, E. F. Pedersen and G. Zhang. The effect of wind speed and direction and surrounding maize on hybrid ventilation in a dairy cow building in Denmark. Energy and Buildings, 86:25–34, 2015.
- [28] E. Jacobs, K. Ward and R. Pinkerton. *The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel*. National Advisory Committee for Aeronautics, pages 299–354, 1933.
- [29] R. K. Singh, M. R. Ahmed, M. A. Zullah and Y.-H. Lee. Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines. Renewable Energy, 42 :66–76, 2012.
- [30] D. S. Green. *The Terminal Velocity and Dispersal of Spinning Samaras*. American Journal of Botany, 67(8) :1218–24, 1980.
- [31] P. J. Kunz. Aerodynamics and Design for Ultra-Low Reynolds Number Flight. PhD thesis, 2003.

- [32] R. E. Sheldahl and P. C. Klimas. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines. Chemistry &, SAND80-211 :118, 1981.
- [33] M. M. Alam, Y. Zhou, H. X. Yang, H. Guo and J. Mi. *The ultra-low Reynolds number airfoil wake*. Experiments in Fluids, 48(1):81–103, 2010.
- [34] J. M. Rainbird, J. Peiró and J. M. R. Graham. Blockage-tolerant wind tunnel measurements for a NACA 0012 at high angles of attack. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 145 :209–218, 2015.
- [35] P. Devinant, T. Laverne and J. Hureau. *Experimental study of wind-turbine airfoil aerodynamics in high turbulence*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90(6):689–707, 2002.
- [36] S. Sunada, T. Yasuda, K. Yasuda and K. Kawachi. *Comparison of Wing Characteristics at an Ultralow Reynolds Number*. 39(2), 2002.
- [37] E. V. Laitone. Wind tunnel tests of wings at Reynolds numbers below 70000. Experiments in Fluids, 23 :405–409, 1997.
- [38] W. Shyy, Y. Lian, J. Tang, D. Viieru and H. Liu. *Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers*. 2013.
- [39] W. Chen and L. P. Bernal. Design and Performance of Low Reynolds Number Airfoils for Solar-Powered Flight. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 7 - 10 January 2008, (January) :1–18, 2008.
- [40] J. Morgado, R. Vizinho, M. A. R. Silvestre and J. C. Páscoa. XFOIL vs CFD performance predictions for high lift low Reynolds number airfoils. Aerospace Science and Technology, 52:207–214, 2016.
- [41] M. Bastankhah and F. Porté-Agel. *A new miniature wind turbine for wind tunnel experiments. Part I : Design and Performance*. Energies, 10(7) :908, 2017.
- [42] P. J. Schubel and R. J. Crossley. Wind turbine blade design. Energies, 5(9):3425–3449, 2012.
- [43] M. Perez. *Micro-récupération d'énergie des écoulements d'air par conversion électrostatique*. PhD thesis, 2017.
- [44] R. K. Singh and M. R. Ahmed. Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. Renewable Energy, 50:812–819, 2013.
- [45] R. A. Kishore and S. Priya. *Design and experimental verification of a high efficiency small wind energy portable turbine (SWEPT)*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 118:12–19, 2013.
- [46] R. A. Kishore, T. Coudron and S. Priya. *Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT)*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 116 :21–31, 2013.
- [47] R. A. Kishore, A. Marin and S. Priya. Efficient Direct-Drive Small-Scale Low-Speed Wind Turbine. Energy Harvesting and Systems, 1(1-2):27–43, 2014.
- [48] A. Vardar and I. Alibas. *Research on wind turbine rotor models using NACA profiles*. Renewable Energy, 33(7) :1721–1732, 2008.
- [49] M. Bastankhah and F. Porté-Agel. A new miniature wind turbine for wind tunnel experiments. Part II : Wake structure and flow dynamics. Energies, 10(7), 2017.
- [50] R. Myers, M. Vickers, H. Kim and S. Priya. *Small scale windmill*. Applied Physics Letters, 90:054106, 2007.
- [51] F. J. Xu, F. G. Yuan, J. Z. Hu and Y. P. Qiu. *Design of a miniature wind turbine for powering wireless sensors*. Proceedings of SPIE, 7647(2) :76474–1–9, 2010.

- [52] R. A. Kishore, D. Vučković and S. Priya. Ultra-Low Wind Speed Piezoelectric Windmill. Ferroelectrics, 460(1):98–107, 2014.
- [53] A. Marin, R. Kishore, D. A. Schaab, D. Vuckovic and S. Priya. *Micro Wind Turbine for Powering Wireless Sensor Nodes*. Energy Harvesting and Systems, 3(2):139–152, 2016.
- [54] D. Carli, D. Brunelli, D. Bertozzi and L. Benini. A high-efficiency wind-flow energy harvester using micro turbine. SPEEDAM 2010 - International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pages 778–783, 2010.
- [55] D. Rancourt, A. Tabesh and L. Fréchette. *Evaluation of centimeter-scale micro windmills : aerodynamics and electromagnetic power generation*. Proc. PowerMEMS, pages 93–96, 2007.
- [56] M. Perez, S. Boisseau, P. Gasnier et al. A cm scale electret-based electrostatic wind turbine for low-speed energy harvesting applications. Smart Materials and Structures, 25(4):045015, apr 2016.
- [57] A. Bansal, D. A. Howey and A. S. Holmes. *Cm-scale air turbine and generator for energy har*vesting from low-speed flows. IEEE Transducers, pages 529–532, 2009.
- [58] D. A. Howey, A. Bansal and A. S. Holmes. Design and performance of a centimetre-scale shrouded wind turbine for energy harvesting. Smart Materials and Structures, 20(8) :085021, 2011.
- [59] A. S. Holmes, G. Hong and K. R. Pullen. *Axial-flux permanent magnet machines for micropower generation*. Journal of Microelectromechanical Systems, 14(1):54–62, 2005.
- [60] E. Hau. Wind Turbines. 2006.
- [61] M. A. Karami, J. R. Farmer and D. J. Inman. Parametrically excited nonlinear piezoelectric compact wind turbine. Renewable Energy, 50:977–987, 2013.
- [62] P. Jain and A. Abhishek. Performance prediction and fundamental understanding of small scale vertical axis wind turbine with variable amplitude blade pitching. Renewable Energy, 97:97–113, 2016.
- [63] N. Korprasertsak and T. Leephakpreeda. Analysis and optimal design of wind boosters for Vertical Axis Wind Turbines at low wind speed. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 159(October) :9–18, 2016.
- [64] D. Diaz and F. Pinto. *Mechatronic Design of a Low Tsr Vertical Axis Wind Turbine With Variable Pitch Angle*. 6(Cobem) :6771–6782, 2013.
- [65] P. Dieudonné. Brevet n° FR2899286 Eolienne à voilure tournante à fort potentiel énergétique. 2007.
- [66] J. S. Al-Azzawi. US 2008/0267776 A1 : Blinking sail windmill. 1(19), 2008.
- [67] A. Y. Qasim, R. Usubamatov and Z. M. Zain. *Design of Vertical Axis Wind Turbine with Movable Vanes*. Australian Journal of Basic and applied sciences, 5(11):896–902, 2011.
- [68] A. Truitt and S. N. Mahmoodi. A review on active wind energy harvesting designs. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 14(9) :1667–1675, 2013.
- [69] M. Perez, S. Boisseau, P. Gasnier, J. Willemin and J.-L. Reboud. *An electret-based aeroelastic flutter energy harvester*. Smart Materials and Structures, 24(3):1–12, 2015.
- [70] L. Tang, M. P. Païdoussis and J. Jiang. *Cantilevered flexible plates in axial flow : Energy transfer and the concept of flutter-mill.* Journal of Sound and Vibration, 326(1-2) :263–276, 2009.
- [71] O. Doaré and S. Michelin. *Piezoelectric coupling in energy-harvesting fluttering flexible plates : linear stability analysis and conversion efficiency*. Journal of Fluids and Structures, 27 :1357–75, 2011.
- [72] J.-B. Drevet. 9879647 : Electricity generator with undulating membrane. 2018.
- [73] S. Pobering and N. Schwesinger. Power supply for wireless sensor systems. pages 685–688, 2008.

- [74] J. M. Kluger, F. C. Moon and R. H. Rand. Shape optimization of a blunt body Vibro-wind galloping oscillator. Journal of Fluids and Structures, 40 :185–200, 2013.
- [75] Humdingerwind. Introducing the microWindbelt. 2008.
- [76] R. A. Norberg. Autorotation, self stability, and structure of single winged fruits and seeds with comparative remarks on animal flight. Biology Reviews, 48:561–96, 1973.
- [77] M. D. Pirie, B. B. Klitgaard and R. T. Pennington. *Revision and Biogeography of Centrolobium* (*Leguminosae Papilionoideae*). Systematic Botany, 34(2):345–59, 2009.
- [78] R. Nathan, G. G. Katul, H. S. Horn et al. *Mechanisms of long-distance dispersal of seeds by wind*. Nature, 418(July) :409–414, 2002.
- [79] R. Nathan. Long-Distance Dispersal of Plants. Science, 313:786–788, 2006.
- [80] A. Rosen and D. Seter. Vertical Autorotation of a Single-Winged Samara. Journal of Applied Mechanics, 58 :1064–71, 1991.
- [81] D. Seter and A. Rosen. *Study of the vertical autorotation of a single-winged samara*. Biology Reviews, 67 :175–97, 1992.
- [82] K. Yasuda and A. Azuma. The Autorotation Boundary in the Flight of Samaras. Journal of Theoretical Biology, 185 :313–20, 1997.
- [83] D. Lentink, W. B. Dickson, J. L. van Leeuwen and M. H. Dickinson. Leading-Edge Vortices Elevate Lift of Autorotating Plant Seeds. Science, 324 :1438–40, 2009.
- [84] C. P. Ellington, C. van den Berg, A. P. Willmott and A. L. R. Thomas. Leading-edge vortices in insect flight. Nature, 384(6610) :626–630, 1996.
- [85] M. H. Dickinson, F.-O. Lehmann and S. P. Sane. Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight. Science, 284(5422):1954–1960, 1999.
- [86] R. B. Srygley and A. L. R. Thomas. Unconventional lift-generating mechanisms in free-flying butterflies. Nature, 420(6916) :660–664, 2002.
- [87] E. R. Ulrich, D. J. Pines and J. S. Humbert. *From falling to flying : the path to powered flight of a robotic samara nano air vehicle.* Bioinspiration & Biomimetics, 5(4), 2010.
- [88] E. R. Ulrich and D. J. Pines. Effects of Planform Geometry on Mechanical Samara Autorotation Efficiency and Rotational Dynamics. Journal of the American Helicopter Society, 57(1):1–10, 2012.
- [89] K. Varshney, S. Chang and Z. J. Wang. *The kinematics of falling maple seeds and the initial transition to a helical motion*. Nonlinearity, 25(1):C1–C8, 2012.
- [90] S. P. Sane. Neurobiology and biomechanics of flight in miniature insects. Current Opinion in Neurobiology, 41 :158–166, 2016.
- [91] D.-E. Levy and A. Seifert. *Parameter study of simplified dragonfly airfoil geometry at Reynolds number of 6000*. Journal of Theoretical Biology, 266 :691–702, 2010.
- [92] J. Xiang, J. Du, D. Li and K. Liu. *Aerodynamic Performance of the Locust Wing in Gliding Mode at Low Reynolds Number*. Journal of Bionic Engineering, 13(2):249–60, 2016.
- [93] J. R. Holden, T. M. Caley and M. G. Turner. *Maple Seed Performance as a Wind Turbine*. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, pages 1–14, 2015.
- [94] J. R. Holden. Experimental Testing and Computational Fluid Dynamics Simulation of Maple Seeds and Performance Analysis as a Wind Turbine. Technical report, 2016.
- [95] C. Seidel, S. Jayaram, L. Kunkel and A. Mackowski. Structural Analysis of Biologically Inspired Small Wind Turbine Blades. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 12(1):19, 2017.

- [96] Q. V. Nguyen, W. L. Chan and M. Debiasi. Hybrid Design and Performance Tests of a Hovering Insect-inspired Flapping-wing Micro Aerial Vehicle. Journal of Bionic Engineering, 13(2):235– 48, 2016.
- [97] Y. Y. Wang, W. R. Hu and S. D. Zhang. *Performance of the bio-inspired leading edge protuberances on a static wing and a pitching wing*. Journal of Hydrodynamics, 26(6) :912–920, 2015.
- [98] C. Rao, T. Ikeda, T. Nakata and H. Liu. Owl-inspired leading-edge serrations play a crucial role in aerodynamic force production and sound suppression. Bioinspiration and Biomimetics, 12(4), 2017.
- [99] T. Ikeda, H. Tanaka, R. Yoshimura et al. *A robust biomimetic blade design for micro wind turbines*. Renewable Energy, 125 :155–165, 2018.
- [100] W. Liu, Q. Xiao and F. Cheng. *A bio-inspired study on tidal energy extraction with flexible flapping wings*. Bioinspiration and Biomimetics, 8(3), 2013.
- [101] V. Cognet, S. Courrech du Pont, I. Dobrev, F. Massouh and B. Thiria. *Bioinspired turbine blades offer new perspectives for wind energy*. Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Science, 473(2198) :20160726, 2017.
- [102] M. T. Bouzaher and M. Hadid. Active control of the vertical axis wind turbine by the association of flapping wings to their blades. Procedia Computer Science, 52(1):714–722, 2015.
- [103] P. Vacher, A. Haddad and R. Arrieux. Determination of the Forming Limit Diagrams Using Image Analysis by the Corelation Method. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 48(1) :227–30, 1999.
- [104] A. Cuynet, D. Scida, É. Roux et al. Damage characterisation of flax fibre fabric reinforced epoxy composites during low velocity impacts using high-speed imaging and Stereo Image Correlation. Composite Structures, 202(May) :1186–1194, 2018.
- [105] P. Gasnier, E. Saoutieff, O. Soriano et al. *Cm-scale axial flow water turbines for autonomous flowmeters : An experimental study.* Smart Materials and Structures, 27, 2018.
- [106] C. E. Mungan. *Frictional torque on a rotating disc*. European Journal of Physics, 33 :1119–1123, 2012.

"Je sentais dans tout mon être un calme ravissant, auquel chaque fois que je me le rappelle je ne trouve rien de comparable dans toute l'activité des plaisirs connus." Jean-Jacques Rousseau, Les rêveries du promeneur solitaire
Miniaturisation bioinspirée d'un convertisseur aéromécanique pour l'exploitation des faibles vitesses de vent

Résumé

L'Internet des objets est en pleine croissance, et nécessite le développement de capteurs autonomes communicants. L'autonomie de tels capteurs peut passer par la récupération d'énergie ambiante afin de limiter l'utilisation de batteries. L'objectif de la thèse est d'étendre les possibilités de conversion en développant une micro éolienne aussi petite que possible pour récupérer l'énergie cinétique des vents à faibles vitesses. Une rupture au niveau de la géométrie est nécessaire et se fonde dans ces travaux sur le biomimétisme.

Dans cet objectif, une étude du comportement des samares par stéréocorrélation d'images est menée afin de reconstruire leur mouvement en trois dimensions. Dans un premier cas, les samares chutent verticalement; dans une deuxième configuration elles sont percées à l'emplacement de leur centre de rotation et sont placées sur un axe horizontal dans une soufflerie. Les samares tournent alors jusqu'à 89% plus rapidement qu'en chute libre avec presque 2000 trs.min⁻¹ : elles sont donc un bon modèle pour des pales de micro éolienne efficace.

Puis, plusieurs hélices bioinspirées sont conçues et fabriquées par stéréolithographie. Les hélices sont ensuite assemblées avec une génératrice électromagnétique miniature réalisée au CEA de Grenoble. La meilleure d'entre elles est identifiée après une batterie de tests. Par la suite, l'efficacité de la micro éolienne optimale est vérifiée en mesurant les puissances développées pour une large gamme de vents (jusqu'à 8 m.s⁻¹). La puissance maximale s'étale de 50 μ W pour 1,2 m.s⁻¹ à plus de 80 mW à 8 m.s⁻¹; le coefficient de puissance et le rendement total optimaux apparaissent à 4 m.s⁻¹ et sont respectivement de 29% et 17,5%. Cela nous place au-dessus des meilleurs prototypes de la littérature. Par conséquent, la validité du choix initial du biomimétisme et de son apport pour les petites dimensions est confirmée.

Mots-clés : Biomimétisme, Miniaturisation, Récupération d'énergie, Faibles vents.

Abstract

The Internet of Things is growing rapidly, and requires the development of autonomous communicating sensors. The autonomy of such sensors can be achieved by harvesting ambient energy in order to limit the use of batteries. The objective of the thesis is to extend the conversion possibilities by developing a micro wind turbine as small as possible to recover the kinetic energy of low wind speeds. A break in geometry is necessary and is based in this work on biomimetics.

To this end, a study of samaras behaviour by stereo image correlation is being carried out to reconstruct their movement in three dimensions. In a first case, the samaras fall vertically; in a second configuration they are drilled at the location of their center of rotation and placed on a horizontal axis inside a wind tunnel. The samaras rotate up to 89% faster than in free fall with almost 2000 rev.min⁻¹ : thus they are a good model for efficient micro wind turbine blades.

Then, several bioinspired propellers are designed and manufactured by stereolithography. The propellers are then assembled with a miniature electromagnetic generator made at the CEA Grenoble. The best of them is identified after a battery of tests. Thereafter, the efficiency of the optimal micro wind turbine is verified by measuring the powers developed for a wide range of winds (up to 8 m.s⁻¹). The maximum power ranges from 50 μ W for 1.2 m.s⁻¹ to more than 80 mW at 8 m.s⁻¹; the optimal power coefficient and total efficiency appear at 4 m.s⁻¹ and are respectively 29% and 17.5%. This places us above the best prototypes in literature. Therefore, the validity of the initial choice of biomimicry and its contribution to small dimensions is confirmed.

Keywords : Biomimetics, Miniaturization, Energy harvesting, Low wind speeds.

