

GUILLAUME LALANDE

# **CONCEPTION D'UN PROTOTYPE EXPÉRIMENTAL D'HYDROGÉNÉRATEUR À AILES OSCILLANTES**

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en génie mécanique  
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2010

# Résumé

L'objectif principal de ce mémoire est de présenter le processus de conception qui a mené à la réalisation d'un prototype expérimental d'hydrogénérateur à ailes oscillantes de 1 kW. Ce dernier a été réalisé de manière à démontrer le potentiel d'extraction d'énergie d'un hydrogénérateur à ailes oscillantes et pour valider certaines prédictions numériques effectuées par le Laboratoire de Mécanique des Fluides Numériques (LMFN) de l'Université Laval.

Une revue de littérature présentant tous les hydrogénérateurs à aile(s) oscillante(s) répertoriés dans la littérature et leur principe de fonctionnement est d'abord présentée. Ensuite, la conception et l'expérimentation d'un premier prototype de petite taille est montrée. Des observations pertinentes quant à la conception du prototype de 1 kW sont aussi incluses. Suit alors la description explicite de la conception de l'embarcation motorisée permettant de faire fonctionner le prototype de 1 kW, la présentation du choix de la topologie de mécanisme et son processus d'optimisation et une description détaillée du prototype de 1 kW lui-même.

Les résultats expérimentaux obtenus avec le prototype de 1 kW sont présentés de façon sommaire. Une analyse approfondie de ces derniers sera effectuée par Kinsey ([1]).

# Abstract

The main objective of this thesis is to present the design process that led to the realization of an experimental prototype of a 1 kW hydrokinetic oscillating wing generator. The latter has been built to demonstrate the power extracting capability of the oscillating wing technology and to validate parts of the numerical modeling that has been performed at Laboratoire de Mécanique des Fluides Numériques (LMFN) of the Laval University for this type of system.

A review of the state-of-the-art of oscillating wing generators found in the literature is first presented, bringing details on when, where, why and how these systems were built. The design and experimentation of a first-generation small-scale prototype is shown. Observations made from the experimentation of the latter that are relevant to the design of the 1 kW prototype are presented next, which is followed by an explicit description of the design of the motorized boat on which the 1 kW turbine is mounted to perform experimentations, the choice of mechanism topology and its optimization process and a detailed description of the 1 kW prototype itself.

The experimental results obtained with the 1 kW prototype are summarized in this Master's thesis. A deeper analysis will be presented by Kinsey ([1]).

# Avant-propos

Je tiens d'abord à remercier les principaux acteurs qui m'ont permis de réaliser un projet d'une aussi grande ampleur en un laps de temps aussi court. Premièrement, mon directeur de recherche, Jean Ruel, pour m'avoir fourni un support exceptionnel depuis le début de notre collaboration, il y a maintenant plus de 4 ans. Merci Jean pour tous ces conseils judicieux, pour toutes les fois où tu m'as fourni les ressources nécessaires à l'accomplissement du prototype et pour l'enseignement de ta façon d'aborder un problème d'ingénierie. Comme tu me l'avais dit lors de notre première rencontre, mon passage au bureau de design a été définitivement plus qu'académique. Deuxièmement, mon co-directeur de recherche, Guy Dumas, pour m'avoir introduit au merveilleux projet de turbine à ailes oscillantes et pour toutes les discussions que nous avons eues afin de rendre le prototype de 1 kW meilleur. Troisièmement, mon collègue Thomas Kinsey, étudiant au doctorat en génie mécanique, pour tous les moments que nous avons passés ensemble pendant les deux dernières années. J'ai toujours cru, Thomas, que nous avons des personnalités très complémentaires et je ne crois pas que la réalisation de la campagne d'essai de l'été 2009 aurait été possible si n'importe qui d'autre avait été à ta place.

Je veux également souligner le support que m'ont fourni tous les membres du bureau de design au cours des dernières années, autant lors de réflexions autour de problèmes de design que comme camarades. Merci à Guillaume, André, Véronique, Catherine, Geneviève, Mathieu, Éric, Louis-Philippe, Rosalie, Martin et Danick. Vous êtes tous bien plus que des collègues de travail à mes yeux.

Merci aussi à tous les employés du département de génie mécanique qui ont fait de la réalisation du prototype de 1 kW un succès. Tout d'abord, merci à Jonathan Talbot, pour toutes les heures d'usinage mais aussi pour tout ton intérêt et ton implication personnelle envers le projet. Ensuite, merci à Pierre Carrier, Jean-Claude Gariépy, Frédéric Morin et Michel Tremblay pour toutes les fois où vous vous êtes impliqués personnellement pour mener ce projet à terme, notamment lors des sorties au Lac Beauport. Merci également à Yves Jean pour le support exceptionnel quant aux aspects électriques du prototype de 1 kW.

Je tiens à remercier les autres chercheurs associés au projet, soient Jean Lemay et Philippe Viarouge et les étudiants gradués qui ont travaillé sur ce projet, soient Arnaud Méhut et Louis-Alexis Allen Demers. J'insiste également pour souligner le travail remarquable réalisé par Marc-André Plourde Campagna comme étudiant de 1<sup>er</sup> cycle lors de la campagne d'essai de l'été 2009.

Finalement, je désire porter un remerciement à ma compagne Fabienne, qui m'a supporté aux cours des dernières années. Merci pour tous tes encouragements, les bons moments que vous avons passés ensemble et pour m'avoir compris lors des situations difficiles. Je tiens aussi à remercier ma famille, pour m'avoir fourni un cadre aussi exceptionnel me permettant de réaliser des études universitaires : Gilles, Johanne, Amélie, Patrick et Juliette, merci pour tout.

Je dédie ce mémoire à mon père Gilles,  
qui m'a donné le meilleur de tous les conseils

*Fais confiance à la vie.*

# Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Avant-propos .....	iii
Table des matières .....	vi
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux.....	xi
<b>1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problématique .....	1
1.2 Principe d'extraction d'énergie par aile oscillante .....	2
1.3 Définition du mandat .....	4
1.4 Structure du mémoire.....	6
<b>2. Revue de littérature .....</b>	<b>8</b>
2.1 Mise en contexte .....	8
2.2 Littérature scientifique.....	9
2.3 Systèmes de type commercial.....	14
2.4 Brevets .....	18
<b>3. Prototype de table .....</b>	<b>31</b>
3.1 Mise en contexte .....	31
3.3 Analyse du fonctionnement du prototype de table .....	37
3.4 Modifications apportées au prototype de table .....	41
3.5 Évaluation des performances des deux versions du prototype de table.....	43

3.6 Observations sur le prototype de table.....	47
<b>4. Conception de l'embarcation.....</b>	<b>49</b>
4.1 Problématique .....	49
4.2 Description de l'embarcation.....	51
<b>5. Conception cinématique des mécanismes.....</b>	<b>61</b>
5.1 Problématique .....	61
5.2 Recherche de concepts de solution .....	61
5.3 Dimensionnement des mécanismes à 4 barres.....	69
<b>6. Conception de l'hydrolienne.....</b>	<b>80</b>
6.1 Problématique .....	80
6.2 Description du montage .....	82
6.3 Mise en service de l'hydrolienne .....	103
6.4 Résultats expérimentaux .....	106
<b>7. Conclusion .....</b>	<b>110</b>
Bibliographie .....	112

# Liste des figures

Figure 1 - Mouvement typique d'une aile oscillante, tiré de Kinsey & Dumas (2005) [3]. ....	2
Figure 2 – Trajectoire apparente d'une aile oscillante en mode d'extraction d'énergie ( $\chi > 1$ ), tiré de Kinsey & Dumas (2005) [3]. .....	4
Figure 3- Schéma du système de turbine à ailes tandem à concevoir.....	5
Figure 4 – Éolienne "Wingmill", tiré de [2]. .....	9
Figure 5 - Montage hydraulique au Naval Postgraduate School, tiré de [5]. .....	11
Figure 6 - Système MAO dans le canal hydraulique du LMF, tiré de [6]. .....	13
Figure 7 - Système Stingray de EB Ltd., tiré de [8]. .....	14
Figure 8 - Système Pulse Generation, tiré de [11]. .....	16
Figure 9 – Modèle réduit 1/20 du système bioSTREAM dans un canal artificiel, tiré de [12]. .....	17
Figure 10 – Schéma d'aile oscillante d'Éolo, tiré de [14]. .....	19
Figure 11 - Système de Pulse Generation Limited présenté dans la demande PCT, tiré de [16]. .....	20
Figure 12 - Système éolien de Solartech Energy and Research Corporation, tiré de [18]. ..	22
Figure 13 - Système oscillant de EB ltd., tiré de [20]. .....	23
Figure 14 - Système d'Arnold Energy Systems, tiré de [22]. .....	24
Figure 15 - Schéma du système de Price, tiré de [25]. .....	25
Figure 16 - Système à aile oscillante de Tidal Energy Business Limited, tiré de [26]. .....	26
Figure 17 - Système de Kallenberg, tiré de [27]. .....	28
Figure 18 - Système éolien de Smith, tiré de [28]. .....	29

Figure 19 – Prototype de table d’aérogénérateur à ailes oscillantes.....	32
Figure 20 – Aile amont. ....	33
Figure 21 – Mécanismes de transmission. ....	35
Figure 22 – Système de conversion électrique. ....	36
Figure 23 – Structure de support.....	37
Figure 24 - Trajectoire de pilonnement - Prototype de table. ....	38
Figure 25 - Trajectoire de tangage - Prototype de table. ....	38
Figure 26 - Modifications apportées au prototype de table. ....	42
Figure 27 - Puissance dissipée - Systèmes complets. ....	45
Figure 28 - Puissance dissipée - Moteurs seulement. ....	45
Figure 29 - Prototype de table dans la soufflerie. ....	46
Figure 30 - Vue générale de l'embarcation. ....	52
Figure 31 - Flotteur de l’embarcation motorisée. ....	53
Figure 32 - Section avant - Vue de dessus.....	55
Figure 33 - Section avant - Vue du dessous.....	55
Figure 34 - Section arrière – Vue du dessous. ....	56
Figure 35 - Design de la manette des gaz et de l'embrayage. ....	57
Figure 36 - Extension de flotteur. ....	58
Figure 37 - Déflecteur avant. ....	59
Figure 38 - Embarcation motorisée - Plaque de traînée installée. ....	60
Figure 39 - Principe d'entraînement par courroies, tiré d’Allen-Demers [15].....	63
Figure 40 - Principe de pilonnement à l'aide de vérins hydrauliques. ....	64
Figure 41 - Fonctionnement d'un mécanisme "Scotch-Yoke".....	65
Figure 42 - Mécanisme à 4 barres quelconque .....	70
Figure 43 - Mécanisme de pilonnement. ....	72
Figure 44 - Mécanisme de tangage. ....	74
Figure 46 - Comparaison entre la sortie du mécanisme de pilonnement et la trajectoire désirée. ....	76
Figure 45 – Mécanisme à 4 barres de pilonnement optimisé .....	76
Figure 47 - Comparaison entre la sortie du mécanisme de tangage et la trajectoire désirée. .....	77

Figure 45 – Mécanisme à 4 barres de tangage optimisé .....	77
Figure 48 - Comparaison entre l'angle d'attaque effectif obtenu avec les mécanismes et avec les fonctions harmoniques visées.....	78
Figure 49 - Comparaison des courbes de puissance obtenues avec les mécanismes à 4 barres et avec les fonctions harmoniques pour le cas avec 1 aile 2d et dans un écoulement laminaire.....	79
Figure 50 – Hydrolienne en position abaissée.....	83
Figure 51 - Hydrolienne installée sur l'embarcation motorisée.....	84
Figure 52 - Base en "H".....	85
Figure 53 - Monte-charge.....	86
Figure 54 – Châssis.....	88
Figure 55 - Roulements utilisés pour le vilebrequin.....	90
Figure 56 - Localisation des cages supérieures et inférieures.....	91
Figure 57 - Détails de la cage supérieure.....	92
Figure 58 - Détails de la cage inférieure.....	93
Figure 59 - Composantes du montage oscillant.....	95
Figure 60 - Détails de l'aile.....	96
Figure 61 - Détails du lien vilebrequin - montage oscillant.....	97
Figure 62 - Vue générale du vilebrequin.....	98
Figure 63 – Détails de la conception du vilebrequin.....	99
Figure 64 - Vue générale de l'ensemble de conversion électromécanique.....	100
Figure 65 - Boîte de fixation moteur.....	102
Figure 66 - Table de fixation pour l'ensemble de conversion électromécanique.....	103
Figure 67 - Cycle moyenné de vitesse et de couple mesurés pour une commande de vitesse de $2.4\pi$ rad/s à l'hydrolienne.....	105
Figure 68 - Performance en extraction d'énergie pour le système à 2 ailes.....	107
Figure 69 - Performance en extraction d'énergie pour le système à 1 aile.....	108
Figure 70 - Performance en extraction d'énergie pour le système sans aile.....	109

# Liste des tableaux

Tableau 1 - Paramètres techniques du système de turbine à ailes tandem à concevoir. ....	5
Tableau 2 - Essais en soufflerie - Prototype de table.....	47

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Problématique

On retrouve de nombreux exemples de surfaces portantes oscillantes dans la nature, tel le battement d'une queue de baleine ou encore le mouvement des ailes d'une libellule en vol. En ingénierie, plusieurs systèmes récents tentent d'imiter cette cinématique, notamment dans la conception de mécanismes de propulsion. Toutefois, le champ d'application d'un mécanisme à surface portante oscillante, ou aile oscillante, ne se limite pas seulement à la propulsion puisque celle-ci présente également un grand intérêt dans le domaine de l'extraction d'énergie, notamment dans l'eau (hydrolien).

Le premier système d'aile oscillante destiné à l'extraction d'énergie répertorié dans la littérature est attribué à McKinney et DeLaurier (1981) [2]. Depuis, plusieurs systèmes à ailes oscillantes, autant pour la propulsion que l'extraction d'énergie, ont émergé dans la littérature.

Conjointement, des travaux de recherche récents, dont ceux effectués au Laboratoire de Mécanique des Fluides Numérique (LMFN) de l'Université Laval, démontrent le potentiel d'application des ailes oscillantes comme éoliennes ou turbine marémotrice (Kinsey et

Dumas, 2005) [3] et qu'un système regroupant plusieurs ailes oscillantes pourrait conduire à une efficacité d'extraction d'énergie supérieure aux turbines existantes à pales rotatives.

Dans cette perspective, l'objectif principal de ce projet de maîtrise consistait à contribuer à cette technologie par la réalisation d'un prototype d'hydrolienne à ailes oscillantes de 1 kW. S'inscrivant dans un vaste projet de recherche multidisciplinaire entrepris en 2005 sur ce type de turbine, le prototype devait permettre de démontrer le potentiel de cette technologie pour l'extraction d'énergie et de valider certains résultats numériques obtenus par l'équipe du professeur Dumas au Laboratoire de Mécanique des Fluides Numérique de (LMFN) de l'Université Laval.

## 1.2 Principe d'extraction d'énergie par aile oscillante

On définit une aile oscillante comme une aile qui effectue simultanément un mouvement de pilonnement  $h(t)$  et de tangage  $\theta(t)$ , tel que présenté dans la Figure 1. Le tangage est la rotation de l'aile autour de son axe alors que le pilonnement est le déplacement vertical de l'aile.

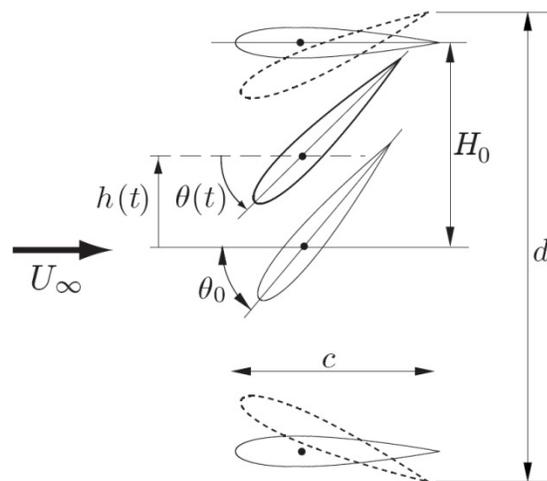


Figure 1 - Mouvement typique d'une aile oscillante, tiré de Kinsey & Dumas (2005) [3].

En localisant la position de l'axe de tangage  $x_p$  sur la ligne de corde de l'aile, les équations cinématiques s'expriment comme :

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\gamma t) \rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \theta_0 \gamma \cos(\gamma t) = \omega(t) \quad (\text{éq. 1})$$

$$h(t) = H_0 \sin(\gamma t + \varphi) \rightarrow \frac{dh}{dt} = H_0 \gamma \cos(\gamma t + \varphi) = V_y(t) \quad (\text{éq. 2})$$

où  $\theta_0$  et  $H_0$  représentent respectivement les amplitudes de tangage et de pilonnement,  $\omega(t)$  la vitesse angulaire en tangage et  $V_y(t)$  la vitesse en pilonnement,  $\gamma$  la fréquence angulaire ( $=2\pi f$ ) et  $\varphi$  la phase entre les deux mouvements (*a priori*  $90^\circ$ ).

Toutefois, la cinématique décrite ci-dessus est valide pour tous les modes d'opération. Ainsi, un paramètre additionnel, appelé paramètre de mise en incidence  $\chi$ , est utilisé afin de définir le mode d'opération de l'aile oscillante, soit le mode extraction d'énergie ( $\chi > 1$ ), le mode propulsion ( $\chi < 1$ ) et le mode de glisse (*feathering*,  $\chi = 1$ ). Ce paramètre sert à comparer l'orientation angulaire du profil par rapport à l'angle de l'écoulement effectif:

$$\chi = \frac{\theta_0}{\tan^{-1}(H_0 \gamma / U_\infty)} \quad (\text{éq. 3})$$

Pour le mode d'extraction d'énergie, en faisant l'hypothèse quasi-stationnaire, la position de tangage  $\theta$  du profil est supérieure à l'angle de l'écoulement effectif (voir Figure 2). Le profil se retrouve alors à incidence  $\alpha$  positive et génère une force aérodynamique  $Y$  orientée dans le même sens que le pilonnement et conséquemment, produit un travail positif d'où une puissance positive, tel qu'on peut le voir dans la Figure 2, où  $X$  et  $Y$  représentent respectivement les forces aérodynamiques instantanées parallèles et perpendiculaires à l'écoulement amont,  $L$  la portance générée par l'aile,  $D$  sa traînée,  $R$  la force résultante instantanée et  $V_y$  le vecteur de vitesse résultant du pilonnement de l'aile.

Le mode de fonctionnement décrit ci-dessus est à la base du fonctionnement de la turbine à aile oscillante. La cadre de ce mémoire était donc d'intégrer cette cinématique à un système mécanique permettant la récupération de cette puissance et d'en réaliser un prototype.

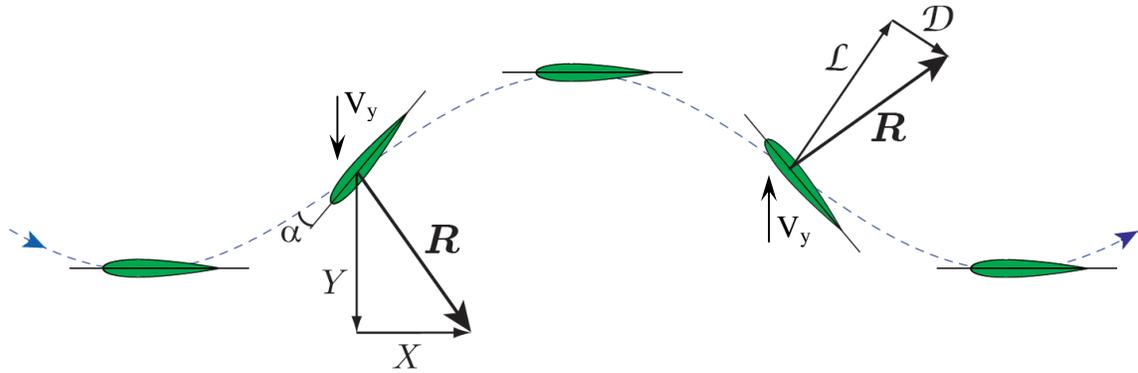


Figure 2 – Trajectoire apparente d'une aile oscillante en mode d'extraction d'énergie ( $\chi > 1$ ), tiré de Kinsey & Dumas (2005) [3].

### 1.3 Définition du mandat

Ainsi, tel que mentionné précédemment, le mandat de ce projet de maîtrise consistait à réaliser un prototype de turbine à ailes oscillantes d'environ 1 kW de manière à démontrer le potentiel d'extraction d'énergie de la technologie. Ce dernier comprenait la conception complète de l'hydrolienne, incluant les éléments de captures d'énergie (les ailes), la chaîne de transmission, les éléments de conversion de la puissance en électricité et l'embarcation motorisée permettant de générer l'écoulement autour de la turbine.

L'imposante campagne de simulation numérique menée au LMFN a permis d'identifier une plage paramétrique permettant d'optimiser l'efficacité d'extraction d'énergie. Cette dernière a donc été utilisée pour le prototype afin de générer un système ayant la plus grande efficacité d'extraction hydrodynamique possible. Ces paramètres comprennent la fréquence de débattement, les fonctions de pilonnement et de tangage, le nombre d'ailes et leur arrangement spatial, etc. Les paramètres techniques mis en évidence par cette étape sont présentés dans la Figure 3 et le Tableau 1.

De plus, il a été convenu qu'il ne serait pas possible de mesurer directement les efforts perçus par les ailes. Conséquemment, la mesure de puissance a été effectuée à la sortie des mécanismes de transmission, en amont de la chaîne de conversion électromécanique. Considérant ceci, il était primordial que le système conçu soit le plus efficace possible au

niveau mécanique, compte tenu que la mesure du rendement obtenue allait y être directement reliée.

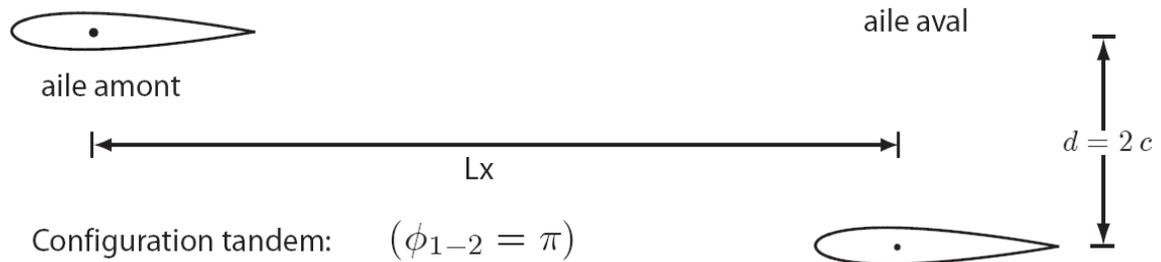


Figure 3- Schéma du système de turbine à ailes tandem à concevoir.

Tableau 1 - Paramètres techniques du système de turbine à ailes tandem à concevoir.

Paramètre	Symbole	Valeur
Profilé d'aile		NACA 0015
Longueur de corde	c	24 cm
Envergure	b	168 cm
Trajectoire de pilonnement		Sinusoïdale
Amplitude de pilonnement	$H_0$	1 corde
Trajectoire de tangage		Sinusoïdale
Amplitude de tangage	$\theta_0$	$75^\circ$
Phase entre le pilonnement et le tangage	$\phi$	$90^\circ$
Distance inter-ailes	$L_x$	129,6 cm (5,4 x corde)
Phase entre les deux ailes		$180^\circ$
Position du pivot	$x_p$	7,2 cm (0,3 x corde)
Vitesse d'écoulement nominale	$U_\infty$	2 m/s
Fréquence d'opération nominale	f	1,17 hz
Puissance nominale disponible	$P_a$	4,35 kW

Finalement, pour des raisons d'entretien et pour permettre d'effectuer des opérations à quai, il a été déterminé que l'hydrolienne devait être installée sur un dispositif permettant à cette dernière d'être mise à l'eau et d'en être ressortie de l'eau lorsque désiré.

## **1.4 Structure du mémoire**

Il existe, dans la littérature, quelques références qui présentent des systèmes à ailes oscillantes pour l'extraction d'énergie. Ces systèmes ont été réalisés pour des essais expérimentaux ou comme première phase de déploiements commerciaux. Certains de ces systèmes présentent des éléments intéressants pour la conception du prototype et ont été étudiés en amont de la conception du prototype envisagé. L'essentiel de cette revue de littérature est compris dans le chapitre 2.

Dans un deuxième temps, un prototype de petite taille d'éolienne à ailes oscillantes a été conçu et testé, de manière à se familiariser avec les défis associés à la réalisation d'une telle turbine. Le processus de conception ainsi que les résultats expérimentaux sont donc présentés au chapitre 3.

Puisque le prototype devait servir à valider des études numériques, il était nécessaire de pouvoir l'opérer à plusieurs régimes d'opérations. Ainsi, tel que mentionné précédemment, il a été convenu qu'il était préférable d'installer la turbine sur une plate-forme motorisée et de créer l'écoulement autour de cette dernière plutôt que d'utiliser un site naturel en raison de la flexibilité offerte en termes de modulation des conditions d'opérations et de la difficulté qu'aurait représenté l'installation du système sur un site naturel. Tous les éléments relatifs à la conception et à la réalisation de l'embarcation motorisée se retrouvent dans le chapitre 4.

De plus, tel que vu dans la section précédente, le principe d'extraction d'énergie par aile oscillante consiste à faire simultanément pilonner et tanguer une aile de manière à ce que sur l'ensemble d'un cycle, le travail total effectué par la force de portance et par le moment de tangage soit positif. Conséquemment, le système conçu devait être à la fois en mesure de transiger la puissance extraite et de contrôler la cinématique des ailes. Toutefois, sur ce type

de turbine, il est beaucoup plus complexe de ramener la puissance soutirée à une génératrice rotative par rapport à une hydrolienne rotative conventionnelle. Ainsi, la conception du mécanisme de transmission représentait un des plus grands défis du projet et le chapitre 5 est dédié à cet aspect.

Un chapitre est également consacré à la conception du prototype de 1 kW. Ce dernier consiste à présenter les éléments de design qui ont permis d'intégrer la topologie de mécanisme décrite au chapitre 5 dans une hydrolienne complète adaptable à l'embarcation décrite au chapitre 4. Un sommaire des résultats obtenus avant et pendant la campagne d'essais de l'été 2009 est inclus.

Ce mémoire comprend donc 5 chapitres englobant le design du prototype HAO (Hydrolienne à Ailes Oscillantes), soit un chapitre portant sur la revue des systèmes existants, un chapitre présentant l'ensemble de la conception du prototype de table et des essais expérimentaux qui ont été réalisés, un chapitre traitant de la conception de la plateforme motorisée, un chapitre expliquant le processus de design des mécanismes cinématiques et un chapitre décrivant la conception du prototype lui-même et les résultats obtenus lors de la campagne d'essais.

# Chapitre 2

## Revue de littérature

### 2.1 Mise en contexte

On retrouve, dans la littérature, plusieurs références traitant de systèmes d'extraction d'énergie fonctionnant suivant le principe d'aile oscillante. Ces références proviennent de publications scientifiques, de documents traitant de systèmes ayant comme objectif un déploiement commercial ou encore de brevets. La revue de littérature est donc divisée selon ces trois catégories.

L'objectif de cette démarche est de mettre en perspective le principe de fonctionnement au niveau mécanique de chacun des systèmes. Ainsi, en faisant ressortir les points forts et les points faibles de chaque système, cette revue de littérature constitue la première étape pour la conception du prototype de 1 kW.

La revue de chaque système sera faite en 3 étapes : 1- une mise en contexte, qui permet de situer géographiquement et historiquement le système, 2- une description du fonctionnement, qui détaille comment le système est capable d'extraire de l'énergie et 3- une analyse des aspects intéressants à souligner.

## 2.2 Littérature scientifique

### 2.2.1 Wingmill [2] - 1981

Le plus vieux prototype de turbine à aile oscillante répertorié dans la littérature, surnommé « wingmill », a été développé dans un contexte expérimental à l'Université de Toronto par McKinney et DeLaurier en 1981. Le but de ce montage était de valider le modèle analytique élaboré pour prédire les performances de ce type de turbine.

Ce système était conçu pour fonctionner dans l'air. Une photo du système en question est présentée à la Figure 4.

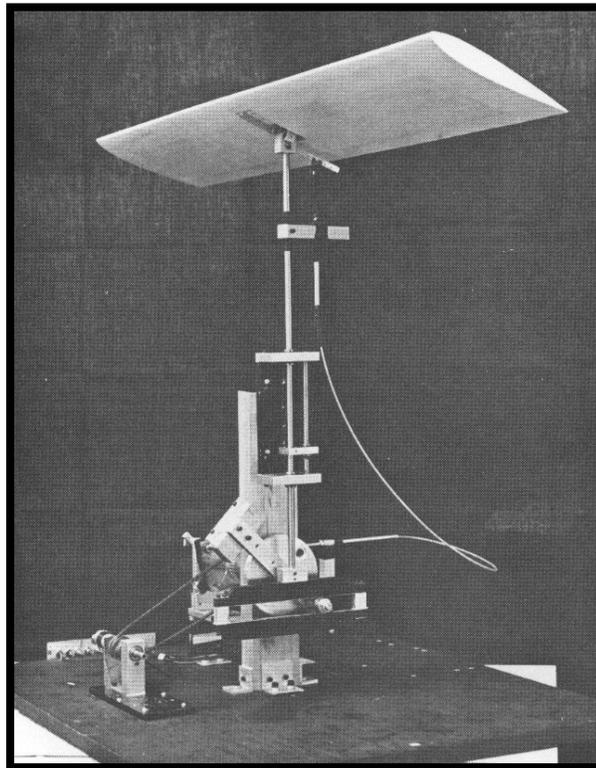


Figure 4 – Éolienne "Wingmill", tiré de [2].

#### Fonctionnement

Ce système possède 1 degré de liberté. Le tangage est contrôlé via un câble bidirectionnel qui agit sur un levier fixé rigidement à l'aile. Pour le pilonnement, un mécanisme « scotch-

yoke »<sup>1</sup> permettant de transmettre le mouvement vertical de l'aile en rotation à l'arbre de sortie a été utilisé. L'aile effectue donc des trajectoires de pilonnement et de tangage qui sont sinusoïdales, c'est-à-dire selon la cinématique décrite dans le chapitre 1. La phase entre les deux mouvements est ajustable lorsque le montage fonctionne.

Spécifiquement, l'aile utilisée possède un profil NACA 0012, une corde de 20 cm et une envergure de 105 cm, pour un rapport d'allongement de 5,25. Le point de pivot pour le tangage est situé à la mi-corde.

La puissance était évaluée en mesurant le couple généré sur un frein ainsi que la vitesse de rotation du système.

### Observations

Parmi les points à noter de ce système, on note l'utilisation du mécanisme « scotch-yoke ». Ce mécanisme simple est similaire à une combinaison vilebrequin-bielle-piston dont la connexion entre le vilebrequin et la bielle est une glissière. Ce mécanisme possède entre autres la caractéristique qu'un mouvement sinusoïdal est produit lorsque le vilebrequin tourne à vitesse constante.

De plus, le système possède seulement 1 degré de liberté, ce qui signifie que toute la cinématique de l'aile oscillante est acheminée vers un arbre unique pour la génération de puissance. Dans un système visant à produire de l'électricité, cela permet de réduire au maximum la complexité de la chaîne de conversion électromécanique.

### **2.2.2 Travaux au Naval Postgraduate School [4], [5] - 1999**

En 1999, Jones, Lindsey et Platzer ont publié des travaux portant sur les turbines à ailes oscillantes au Naval Postgraduate School à Monterey aux États-Unis. Deux systèmes ont été analysés : l'un avec une aile [4] et l'autre possédant deux ailes en tandem [5]. Le montage à deux ailes représente une évolution du montage à une aile, de telle sorte que l'analyse ne sera présentée que pour le cas tandem.

---

<sup>1</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Scotch\\_yoke](http://en.wikipedia.org/wiki/Scotch_yoke)

Ces deux montages avaient été conçus pour fonctionner dans l'eau. Le montage à deux ailes décrit dans [5] est montré à la Figure 5.

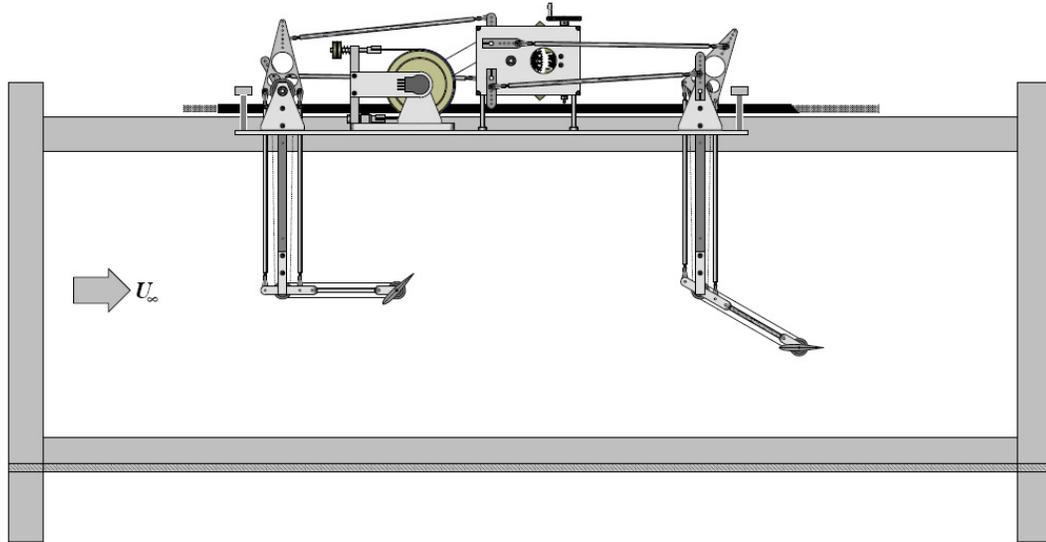


Figure 5 - Montage hydraulique au Naval Postgraduate School, tiré de [5].

### Fonctionnement

Pour ce montage, deux ailes en configuration sérielle séparées de  $9,6 \times$  corde et une phase relative de  $90^\circ$  ont été utilisées. La phase entre le pilonnement et le tangage est ajustable lorsque le montage est en marche.

Le pilonnement est contrôlé avec des bielles qui sont reliés directement à un moteur électrique qui change constamment de sens de rotation. Des amplitudes de pilonnement allant jusqu'à  $1,4$  corde sont possibles. Pour le tangage, un système de bielles et de courroies crantées assurent le mouvement. Des amplitudes de tangage allant jusqu'à  $90^\circ$  sont possibles. La puissance extraite est dissipée dans un frein par frottement.

Les ailes utilisées présentent un profil NACA 0014, une longueur de corde de  $6,35$  cm et une demi-envergure de  $17$  cm. Chaque aile est donc composée de deux demi-ailes séparées d'environ  $2,5$  cm au centre et d'un dégagement de  $6,35$  mm de chaque côté du canal.

L'efficacité totale mesurée a été de 8% versus 30% comme efficacité aérodynamique prévue. Les effets 3D, le frottement mécanique et l'infiltration d'eau dans le bois des ailes font partie des causes mentionnées.

### Observations

Dans ce système, le moteur doit constamment changer de sens de rotation pour conférer la cinématique aux ailes, ce qui est moins intéressant d'un point de vue d'extraction d'énergie comparativement au système développé par McKinney & DeLaurier [2]. Toutefois, le système possède également 1 seul degré de liberté, ce qui est intéressant du point de vue du contrôle.

Les pertes d'efficacité mentionnées, c'est-à-dire les effets 3D, le frottement mécanique et l'infiltration d'eau dans le bois des ailes sont aussi des aspects dont il a été important de tenir compte dans le design du prototype de 1 kW.

### **2.2.3 MAO – Montage à Ailes Oscillantes [6], [7] (2007)**

Ce montage a été réalisé par le bureau de design du département de génie mécanique de l'Université Laval, en collaboration avec les laboratoires de mécanique des fluides numérique et expérimentale. L'objectif de ce système était de pouvoir mesurer les efforts perçus sur une aile oscillante afin de valider certaines prédictions numériques. Ce système fonctionne dans le canal hydraulique du LAMH de l'Université Laval (Prof. Claire Deschênes). La Figure 6 montre le système MAO ainsi qu'une partie de la modélisation ayant servi à valider l'expérimentation.

### Fonctionnement

Étant donné l'objectif visé, le système récupère la puissance mais la dissipe dans une résistance sans la quantifier. Le système est cependant suffisamment instrumenté pour connaître les efforts ressentis par l'aile à tout moment. Le mécanisme servant à guider le pilonnement comprend un servomoteur et une courroie crantée montée dans un guide linéaire (Figure 6). L'exactitude du sinus demandé est assurée par un entraînement électronique. Pour le tangage, un servomoteur est couplé à un câble bidirectionnel « push-

pull ». Comme pour le pilonnement, la forme sinusoïdale est contrôlée par un entraînement électronique.

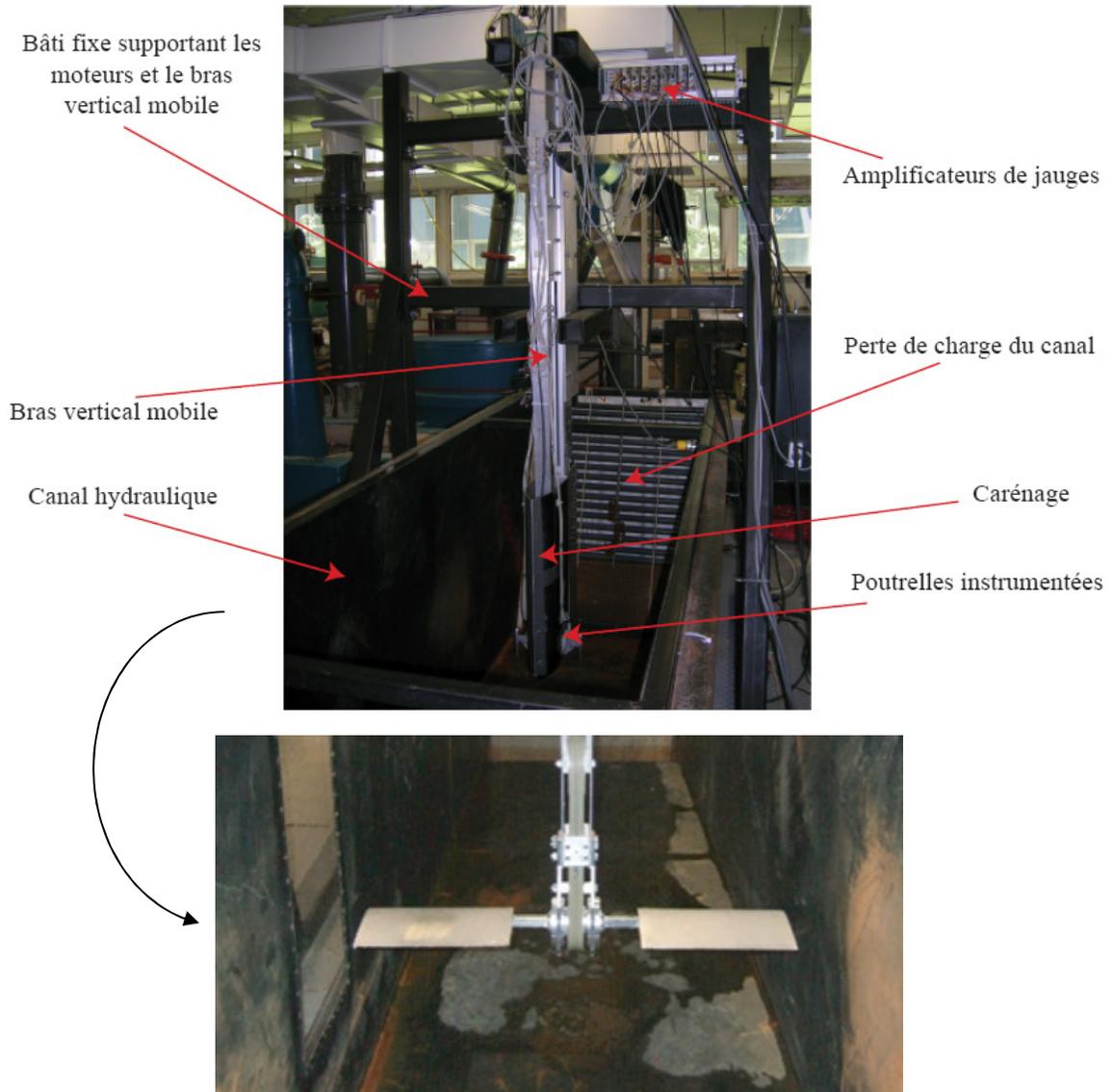


Figure 6 - Système MAO dans le canal hydraulique du LMF, tiré de [6].

### Observations

Quoique très intéressant compte tenu de la multitude de trajectoires qu'il est possible de réaliser, l'utilisation de mécanismes similaires à ceux de MAO dans un système de génération de puissance est moins attirante étant donnée la difficulté à redresser le signal obtenu. Ceci s'explique par le fait que les moteurs doivent constamment changer de sens de

rotation pour imposer le bon mouvement à l'aile. Aussi, la mise en route de ce montage a montré qu'il peut être difficile d'asservir précisément les moteurs en position, ce qui se répercute directement sur la trajectoire de l'aile.

## 2.3 Systèmes de type commercial

### 2.3.1 Stingray [8], [9], [10] - 2002

L'hydrolienne Stingray a été construite par la compagnie Engineering Business Ltd. Le système a fait l'objet d'expérimentation en Écosse en 2002. Le système réalisé comportait une seule aile et visait à soutirer 150 kW de l'écoulement d'eau. L'aile utilisée possédait des dimensions imposantes, soit une corde de 3m, une envergure totale de 15,4 m, et pouvait effectuer un mouvement de pilonnement sur une hauteur totale de 12 m. La Figure 7 montre le système réalisé. Au terme du projet, EB a abandonné le projet pour cause de non-viabilité économique.



Figure 7 - Système Stingray de EB Ltd., tiré de [8].

### Fonctionnement

Le mouvement induit à l'aile par l'écoulement entraîne 4 vérins hydrauliques, 2 pour le pilonnement et 2 pour le tangage, agissant par paire, qui pompent de l'huile dans un moteur hydraulique. Au fil du mouvement, l'huile est pompée dans un sens puis dans l'autre, ce qui entraîne le moteur hydraulique dans un sens puis dans l'autre. Le moteur hydraulique est directement couplé à la génératrice électromécanique. Un accumulateur hydraulique permet d'emmagasiner l'énergie de manière à la réinjecter dans le système lors de moments où un travail doit être fourni au système (ex. aile en fin de course inférieure).

### Observations

Un des problèmes rencontrés sur le Stingray était que l'aile prenait moins de temps à descendre qu'à remonter à cause de la gravité. Ainsi, la production d'énergie était plus grande dans cette demi-portion du cycle. De plus, l'amplitude de tangage se limitait à 15 degré effectif, ce qui s'avère nettement insuffisant et explique la modeste efficacité mesurée par le prototype Stingray.

D'un autre côté, l'utilisation d'actuateurs hydrauliques comme éléments de transmission de puissance est intéressante. L'utilisation d'éléments hydrauliques permet la transmission sans créer de frottement hydrodynamique supplémentaire, comme dans le cas de bielles par exemple. D'ailleurs, même si un système hydraulique typique entraîne des pertes loin d'être négligeables, une efficacité de transmission de l'hydrodynamique jusqu'au générateur de 75% a été rapportée.

### **2.3.2 Pulse Generation [11] - 2007**

La compagnie Pulse Generation a développé une turbine à ailes oscillantes composée de deux ailes en tandem déphasées de 90 degrés. Au moment de la rédaction de ce mémoire, une hydrolienne de 100 kW est en cours d'essai dans l'estuaire de la rivière Humber. La Figure 8 montre un schéma du système.

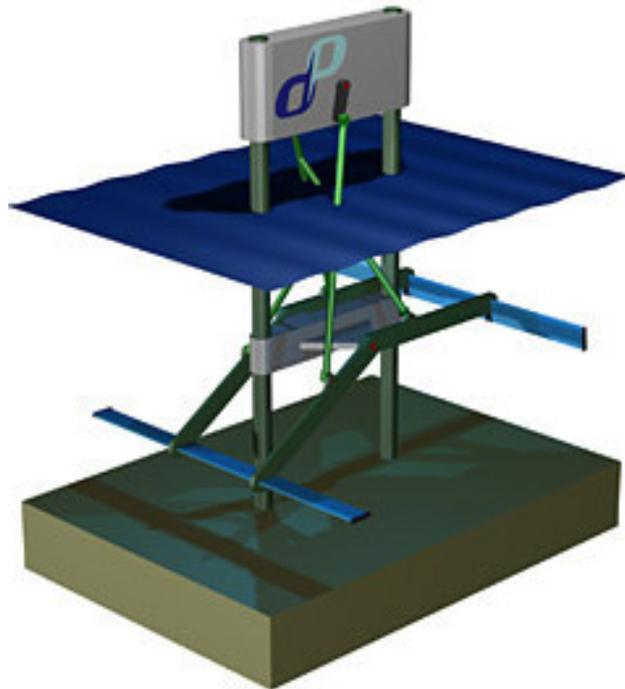
### Fonctionnement

Parmi les caractéristiques du système, on note l'emploi de mécanismes à 4 barres pour le contrôle du pilonnement, similaires à ceux qu'on retrouve sur le prototype de table (chapitre 3), mécanismes également envisagés pour le prototype de 1 kW. Aucun détail n'est cependant donné sur le contrôle du tangage. L'utilisation de ces mécanismes permet de situer la machine électrique hors de l'eau, tel que montré à la Figure 8. De plus, ce système possède la particularité de pouvoir remonter les ailes hors de l'eau, ce qui facilite les travaux d'entretien.

### Observations

L'utilisation de mécanismes à 4 barres pour le contrôle du pilonnement est intéressante compte tenu que cela permet de concentrer le contrôle du pilonnement des deux ailes à 1 seul degré de liberté et facilite ainsi la conversion de la puissance en électricité.

De plus, on note que toute la partie électrique de ce système se situe hors de l'eau. Cet aspect est intéressant étant donné qu'il facilite l'accès et enlève la complexité due à l'étanchéisation du boîtier de ces composantes.



**Figure 8 - Système Pulse Generation, tiré de [11].**

Finalement, on note que ce système possède deux ailes disposées en cascade dans l'écoulement et déphasées de 90°. Cette configuration permet d'éliminer les points morts dans le cycle d'oscillation.

### 2.3.3 bioSTREAM [12] - 2008

La compagnie australienne BioPower Systems a développé une turbine à aile oscillante en se basant sur le mode de propulsion de certains poissons dont le thon et le requin. Un projet pilote de 250 kW est en cours de développement (2009) à l'île Flinders en Tasmanie. L'unité bioSTREAM de 20 m sera connectée au réseau de distribution. Une image du système est présentée à la Figure 9.

#### Fonctionnement

Le système comporte une aile qui oscille à l'horizontale. Le pilonnement est assuré par une membrure profilée en composite. D'un autre côté, le tangage est réalisé par un actuateur situé entre la bielle de pilonnement et l'aile.

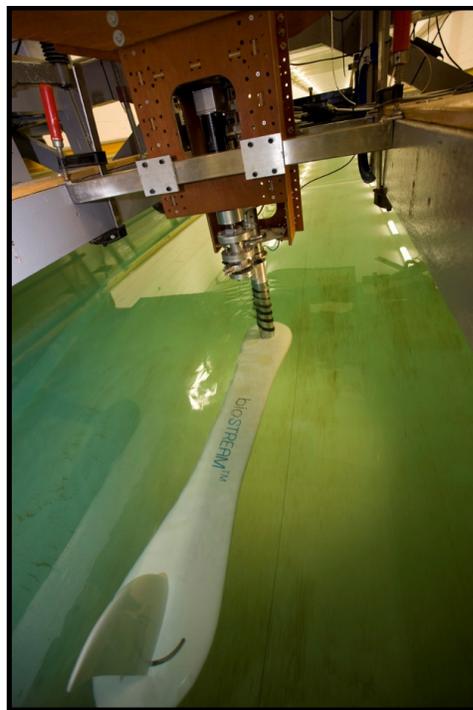


Figure 9 – Modèle réduit 1/20 du système bioSTREAM dans un canal artificiel, tiré de [12].

Comme on peut remarquer sur la Figure 9, l'aile possède une forme qui ressemble à une queue de poisson. De plus, la configuration utilisée permet à la machine de fonctionner dans un écoulement dont la direction varie. L'ensemble de la structure est réalisé en composite.

### Observations

On remarque, sur la Figure 9, que l'aile balaie un plan horizontal. Conséquemment, même si le système n'est pas équilibré statiquement, aucun problème de dissymétrie dû à la gravité ne devrait être présent.

De plus, la configuration du système permet aussi de s'adapter à la direction de l'écoulement incident. Ainsi, dans une application marémotrice où la direction de l'écoulement peut varier considérablement, le système sera toujours en position pour extraire de la puissance.

On remarque le design épuré du système qui suggère que les actuateurs responsables du pilonnement et du tangage de l'aile doivent constamment changer de sens de rotation pour conférer la cinématique oscillante à l'aile.

## **2.4 Brevets**

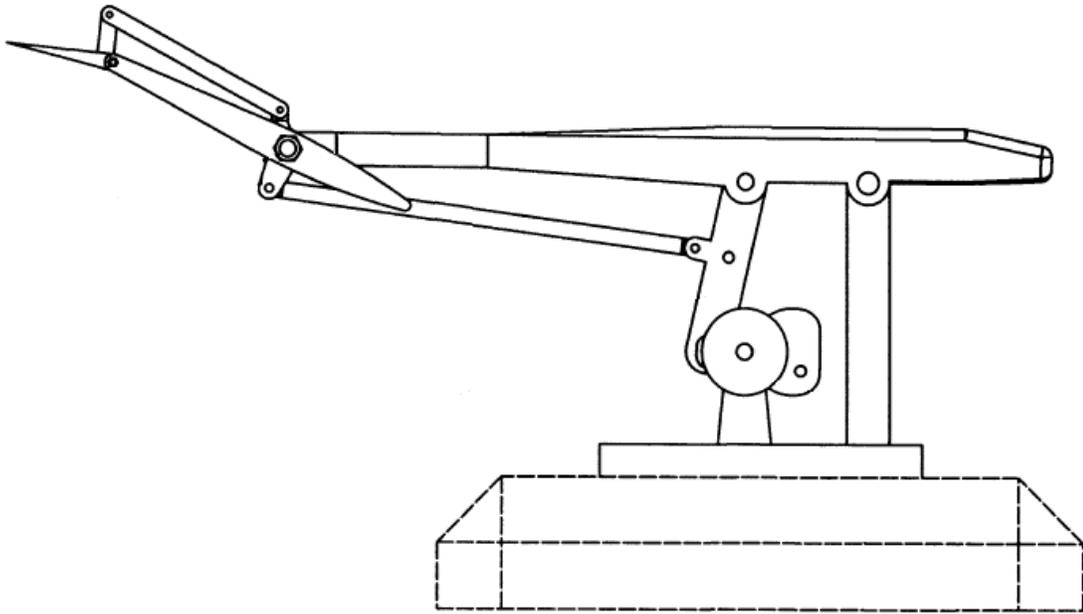
### **2.4.1 Éolo [13] – 2003, [14] - 2004**

La compagnie québécoise Éolo possède un brevet américain (2003) et un dépôt PCT (2004) pour son système d'aile oscillante à auto-compensation. La Figure 10 est tirée de la demande PCT de ce système.

### Fonctionnement

Comme on peut le voir sur la Figure 10, le pilonnement de l'aile est assuré par un mécanisme vilebrequin-bielle. Étant donné son arrangement géométrique, si le vilebrequin tourne à vitesse constante, l'aile ne pourra exécuter une trajectoire de pilonnement parfaitement sinusoïdale.

Pour le tangage, on actualise la position de l'aile à l'aide de membrures reliées aux composantes du mécanisme de pilonnement. L'angle de tangage effectif est augmenté par l'utilisation d'un volet au bord de fuite. La cinématique de ce mécanisme de tangage a été revue par Demers [15] et une lacune observée est le faible angle de tangage qu'il est possible de conférer à l'aile.



**Figure 10 – Schéma d'aile oscillante d'Éolo, tiré de [14].**

Il est à noter que les deux documents font mention d'une base pivotante permettant d'aligner le système dans la direction du vent.

### Observations

Le premier point à noter de ce système est que l'arrangement géométrique des membrures permet d'avoir un système à 1 degré de liberté. Comme il a été mentionné précédemment, ceci est intéressant au niveau de la production d'électricité et du contrôle. De plus, on note la présence d'un volet au bord de fuite, ce qui permet d'augmenter l'angle d'attaque effectif de l'aile. La position angulaire de ce dernier est actualisée par le même degré de liberté que le pilonnement et le tangage.

### 2.4.2 Pulse Generation Limited [16] - 2005, [17] - 2006

L'entreprise britannique Pulse Generation Limited, dont l'un des systèmes a été présenté dans la section systèmes commerciaux, possède un brevet britannique [17] et un dépôt PCT [16] sur un mécanisme pour produire / extraire de la puissance dans un fluide. Le mécanisme protégé par ces brevets ressemble à ce qui a été utilisé pour le système décrit dans la section 2.3.2.

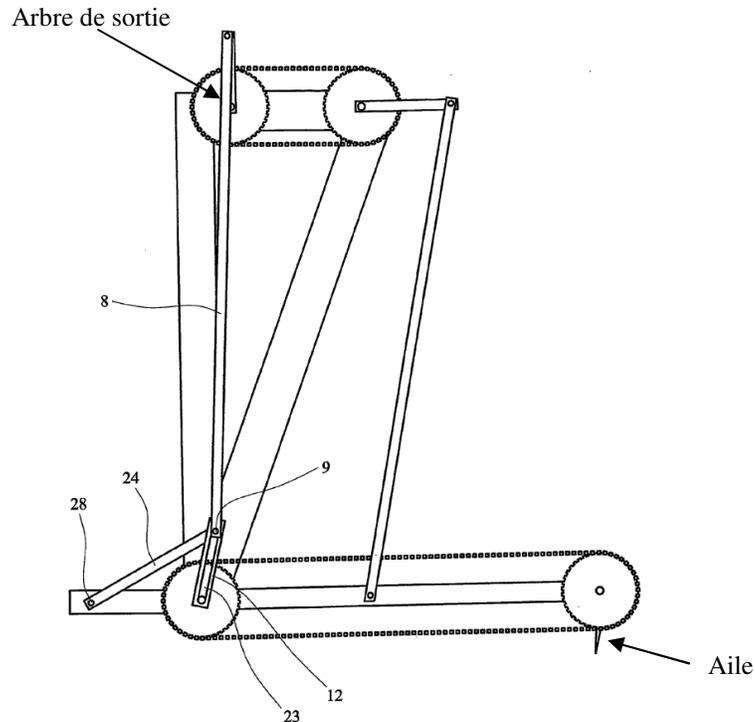


Figure 11 - Système de Pulse Generation Limited présenté dans la demande PCT, tiré de [16].

#### Fonctionnement

Comme on peut le constater sur la Figure 11, le pilonnement de l'aile est possible grâce à un mécanisme à 4 barres. Un deuxième mécanisme à 4 barres, accompagné de deux courroies et d'une glissière, permet le tangage de l'aile. L'ensemble de la cinématique est ramené à 1 degré de liberté.

Il est à noter que les deux brevets incluent aussi d'autres topologies de mécanismes à 1 degré de liberté utilisant des glissières.

### Observations

Comme il a été mentionné pour plusieurs autres systèmes, ce mécanisme possède un seul degré de liberté. De plus, l'utilisation de mécanismes à 4 barres, s'ils sont bien dimensionnés, permet de conférer à l'aile la cinématique décrite dans le chapitre 1 pour une vitesse constante sur le degré de liberté, ce qui est encore plus intéressant au niveau du contrôle et de la production d'électricité.

On remarque aussi l'utilisation d'une glissière au niveau de la chaîne cinématique de tangage. Le degré de liberté supplémentaire introduit par cette dernière dans le mécanisme à 4 barres est repris par une membrure supplémentaire.

### **2.4.3 Solartech Energy and Research Corporation [18] – 1984 ,[19] - 1985**

La compagnie Solartech Energy and Research Corporation possède deux brevets ([18] – 1984 et [19] – 1986) portant sur un dispositif éolien s'apparentant à une turbine à aile oscillante, comme on peut le voir sur la Figure 12.

### Fonctionnement

Malgré les ressemblances, les ailes ne réalisent pas la cinématique décrite dans le chapitre 1 et ces dernières sont plutôt libres de mouvement. Lorsqu'arrivées en fin de course de pilonnement, une butée renverse l'angle d'attaque, ce qui a pour effet de générer une portance dans le sens inverse et ainsi induire un déplacement dans le sens contraire. L'énergie extraite est acheminée vers des vérins hydrauliques qui utilisent l'énergie pour pomper un fluide. L'énergie stockée peut ensuite être utilisée directement ou être transformée en électricité à l'aide d'un générateur.

Il est à noter que des volets aux bords de fuite sont également utilisés pour maximiser les performances. De plus, l'ensemble de l'éolienne est montée sur pivot de telle sorte qu'elle s'aligne automatiquement avec le vent incident.

### Observations

Le premier point à noter est l'utilisation de deux ailes partageant la même membrure de pilonnement et pivotant en son centre. Ainsi, la phase entre le pilonnement des deux ailes est de  $180^\circ$  et assurément symétrique. De plus, on obtient une configuration similaire à celle envisagée pour le prototype de 1 kW, puisque les deux ailes partagent une configuration en cascades dans l'écoulement incident, de telle sorte que l'aile aval agit dans le sillage de l'aile amont.

De plus, comme ce sont des butées qui permettent de varier l'angle d'attaque et que ce dernier suit une fonction discontinue, le système ne présente aucun point mort, même aux positions extrêmes de pilonnement. Toutefois, ce mécanisme ne permet pas de profiter des gains dû aux phénomènes aérodynamiques non-stationnaires associés à la cinématique décrite dans le chapitre 1.

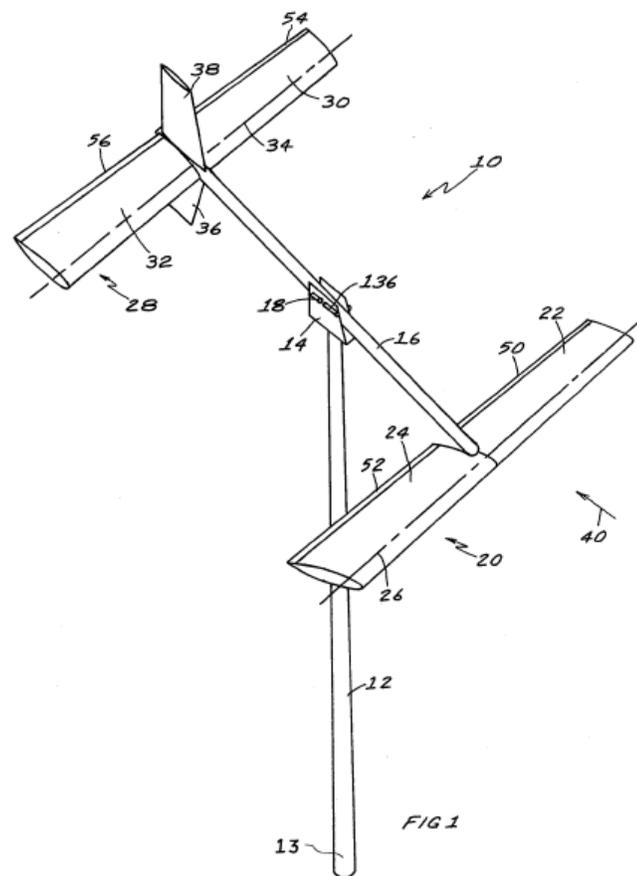


Figure 12 - Système éolien de Solartech Energy and Research Corporation, tiré de [18].

#### 2.4.4 The Engineering Business Limited [20] - 2004, [21] - 2005

La compagnie The Engineering Business Limited, auteur du prototype Stingray présenté précédemment, possède aussi deux brevets ([20] – 2004 et [21] – 2005) sur un autre système oscillant d'extraction d'énergie. Ce système est montré à la Figure 13.

##### Fonctionnement

Lorsqu'un écoulement incident frappe les éléments de captures d'énergie, un mouvement vertical du système est engendré. Les ailes changent d'angle d'attaque en début et en fin de course à l'aide de butées. À l'aide du mouvement engendré, on récupère l'énergie extraite en comprimant un fluide à l'intérieur du système.

Le tout est monté sur un mât autour duquel le système peut pivoter pour s'orienter dans l'écoulement.

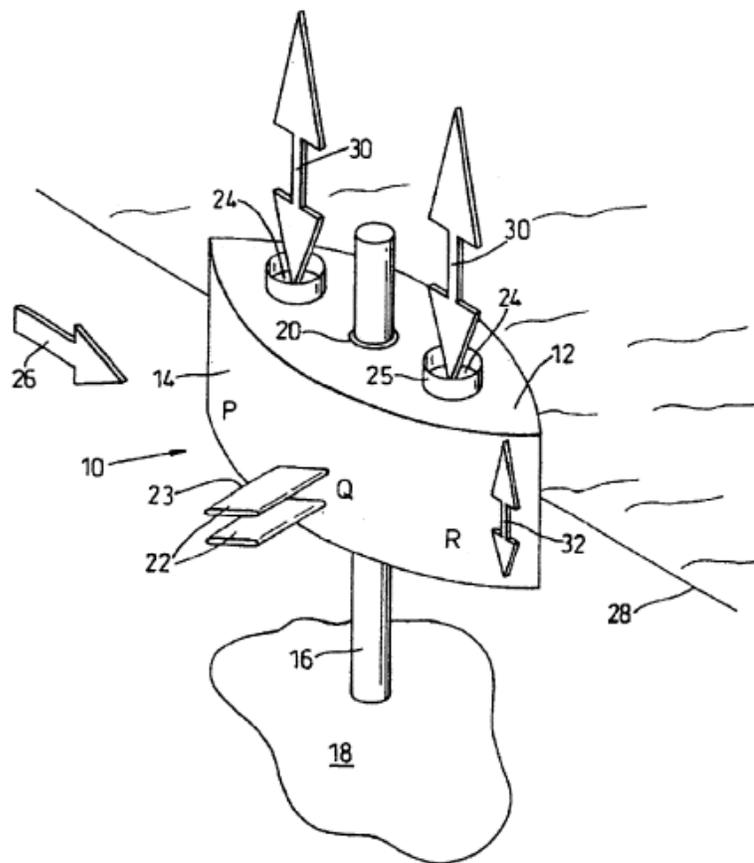


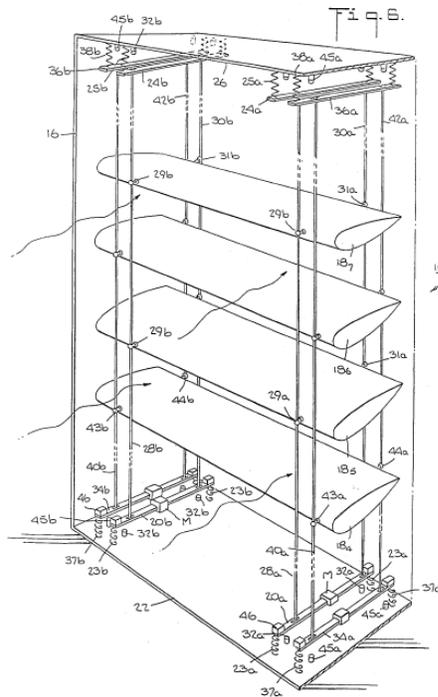
Figure 13 - Système oscillant de EB Ltd., tiré de [20].

## Observations

On remarque qu'avec ses butées de fin de course et son système de pompage de fluide, ce système ressemble beaucoup à celui de Solartech ([18]) présenté dans la section 2.4.3. Toutefois, ce système est conçu pour fonctionner dans l'eau.

### **2.4.5 Arnold Energy systems [22] - 1982, [23] - 1980, [24] - 2001**

La compagnie Arnold Energy Systems possède 3 brevets ([22], [23] et [24]) sur des systèmes permettant d'extraire l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement. Un de ces systèmes est présenté à la Figure 14.



**Figure 14 - Système d'Arnold Energy Systems, tiré de [22].**

## Fonctionnement

Ce système permet d'extraire l'énergie cinétique et de la transformer en énergie utile à l'aide d'une série de plusieurs ailes minces disposées dans l'écoulement. Dans chaque unité, les ailes ont deux degrés de liberté et chaque unité est en phase avec les autres unités. Des câbles, installés au bord d'attaque et au bord de fuite, permettent de faire pilonner et tanguer les ailes.

Les ailes sont montées sur un système de ressorts de telle sorte qu'elles sont susceptibles au phénomène de flottement aérodynamique, ce qui fait osciller ces dernières. Le mouvement d'oscillation entraîne des alternateurs qui permettent de générer de l'électricité.

### Observations

Les systèmes présentés par Arnold sont les seuls répertoriés dans la littérature prétendant tirer profit du phénomène de flottement aérodynamique pour extraire de l'énergie cinétique d'un fluide.

De plus, de par ses configurations géométriques, on remarque qu'il est très facile de disposer de nombreuses ailes en parallèles, de manière à augmenter la taille de la fenêtre d'écoulement et conséquemment, la puissance extraite.

### **2.4.6 Price [25] - 1996**

Daniel Price est le titulaire d'un brevet pour un système à câble permettant de contrôler le mouvement d'une aile oscillante et adapté à l'extraction de l'énergie cinétique d'un fluide, de manière à générer de l'électricité. Un schéma de ce système est présenté à la Figure 15.

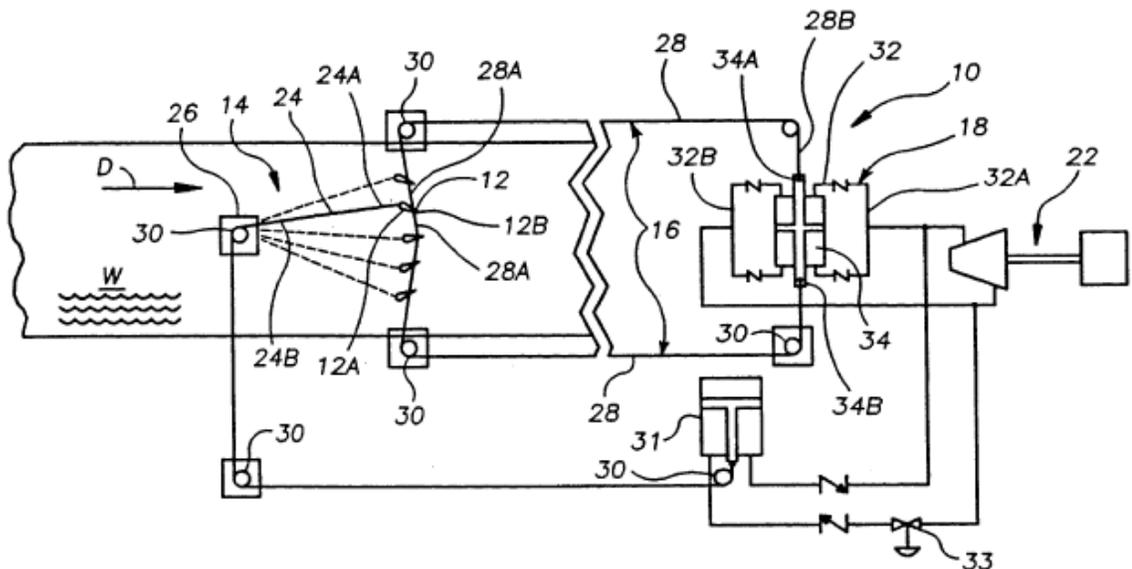


Figure 15 - Schéma du système de Price, tiré de [25].

### Fonctionnement

Comme on peut le constater, le pilonnement et le tangage de l'aile sont assurés par la longueur relative des deux câbles qui retiennent l'aile. Ainsi, en imposant la longueur des deux câbles (donc deux degrés de liberté) et en supposant un écoulement de la gauche vers la droite, l'aile n'a qu'une seule position possible.

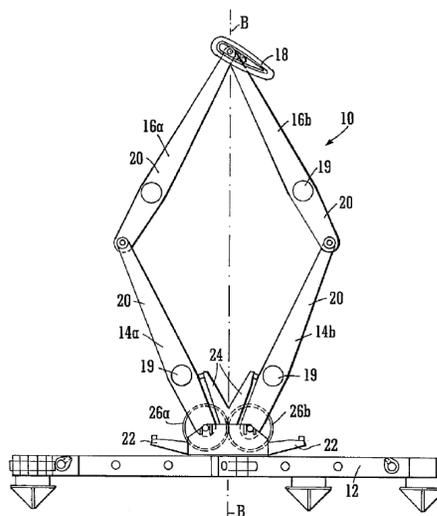
La puissance extraire par l'aile est ainsi acheminée vers deux vérins hydrauliques qui utilisent l'énergie disponible pour pomper un fluide. L'énergie ainsi récupérée est ensuite acheminée, via un réseau de valves anti-retour, vers un générateur électrique.

### Observations

Le principal point intéressant de ce système réside dans l'utilisation de câbles pour le contrôle de la cinématique de l'aile. Toutefois, le système présenté possède deux degrés de liberté et est conséquemment plus complexe au niveau du contrôle d'autant plus qu'il faut effectuer le contrôle sur les actionneurs hydrauliques.

#### **2.4.7 Tidal Energy Business Limited [26] - 2004**

La compagnie britannique Tidal Energy Business Limited détient un brevet portant sur un système d'extraction d'énergie par aile oscillante muni d'un mécanisme à membrures, tel que présenté à la Figure 16, tirée du brevet.



**Figure 16 - Système à aile oscillante de Tidal Energy Business Limited, tiré de [26].**

### Fonctionnement

Comme on peut le voir sur la Figure 16, l'aile est connectée à des membrures qui lui donnent sa position et son orientation spatiale. En faisant pivoter ces membrures à leur base, on peut causer un mouvement d'oscillation de l'aile, à la fois en pilonnement et en tangage, ce qui permet d'extraire de l'énergie. Conséquemment, ce système possède deux degrés de liberté.

On remarque toutefois que pour obtenir les trajectoires définies dans le chapitre 1, chaque degré de liberté doit suivre une trajectoire bien précise l'un par rapport à l'autre, ce qui fait en sorte que les deux degrés de liberté sont couplés.

### Observations

Il est intéressant de voir l'utilisation de mécanismes à bielles pour le contrôle de l'aile. Toutefois, ce système possède deux degrés de libertés couplés, ce qui est moins intéressant par rapport au contrôle.

De plus, pour obtenir les trajectoires décrites dans le chapitre 1, les deux degrés de liberté devront suivre des trajectoires de vitesses qui changent constamment de sens de rotation, ce qui est également peu intéressant au niveau de la génération d'électricité.

### **2.4.8 Kallenberg [27] - 2001**

Robert Kallenberg possède un brevet américain sur un système à aile oscillante. Le schéma de l'ensemble présenté dans son brevet est montré à la Figure 17.

### Fonctionnement

Dans ce système, le pilonnement de l'aile est rendu possible par un système de membrures, comprenant une bielle de pilonnement qui, lorsqu'elle pivote, induit un mouvement de pilonnement à l'aile ainsi qu'une tige qui, par un mouvement de va-et-vient, permet de faire pivoter la bielle de pilonnement.

Pour le tangage, un actuateur est installé sur le volet au bord de fuite, ce qui permet à l'aile de changer d'angle d'attaque effectif. Toutefois, cet actuateur agit comme des butées de fin de course et seulement deux positions de volet sont utilisées dans le cycle.

L'ensemble de conversion électromécanique est opéré à partir de la berge. De plus, un câble permet de reprendre la traînée du système dans l'eau.

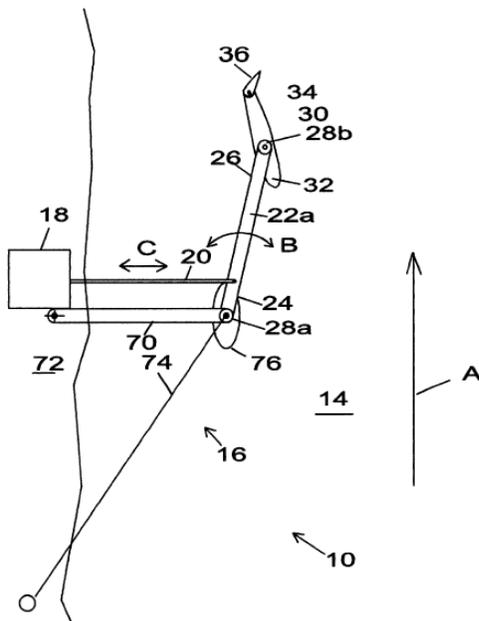


Figure 17 - Système de Kallenberg, tiré de [27].

### Observations

Le système permettant la conversion électromécanique est disposé sur la berge, ce qui est intéressant étant donné que cela implique de ne pas avoir à installer de composantes à haute tension dans des caissons submergés.

De plus, l'utilisation d'un câble pour reprendre la traînée est intéressante puisque cela permet de réduire considérablement la taille des autres membrures qui n'ont plus à reprendre cet effort. Aussi, l'utilisation d'un câble facilite son installation à partir de la berge puisque ce dernier est flexible.

### 2.4.9 Smith [28] - 1991

Le californien Raoul D. Smith est titulaire d'un brevet américain portant sur un système éolien pour l'extraction d'énergie à partir de vents de faibles vitesses. Ce système est présenté à la Figure 18.

#### Fonctionnement

Dans ce système, l'élément de capture d'énergie est une plaque plane. Le pilonnement et le tangage de cette plaque sont assurés par deux mécanismes à 4 barres, lesquels sont ramenés à 1 degré de liberté par l'entremise d'un volant d'inertie qui correspond à 1 barre de chacun des mécanismes. Ainsi, la trajectoire résultante de la plaque plane dépend de la longueur relative de chacune des bielles des deux mécanismes à 4 barres.

De plus, le tangage de la plaque est acheminé de la sortie du mécanisme à 4 barres à la plaque par deux câbles bidirectionnels.

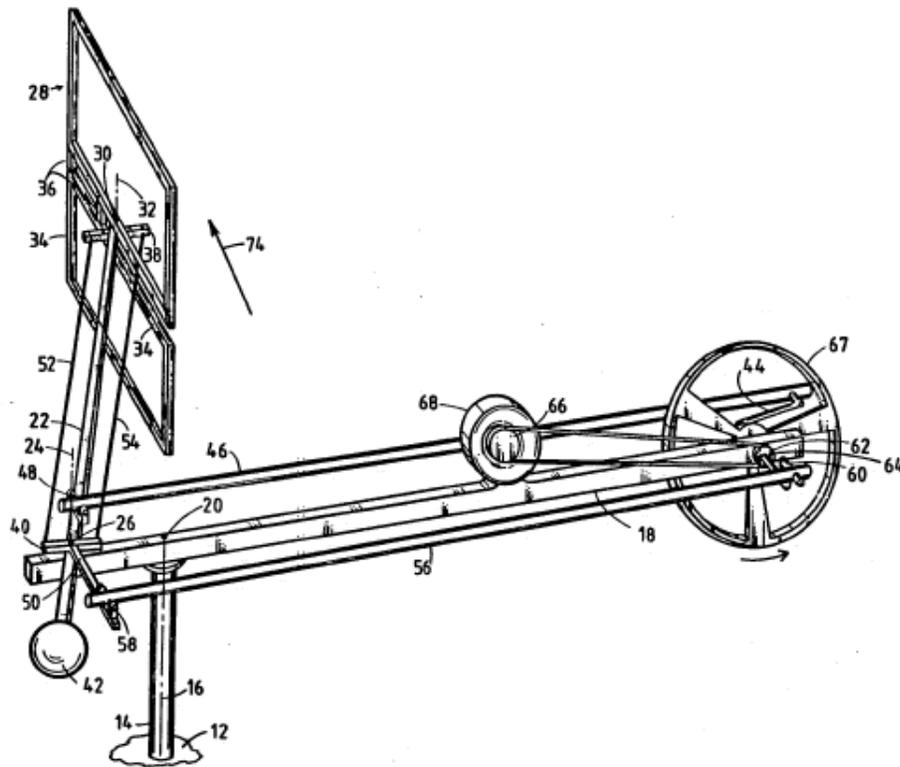


Figure 18 - Système éolien de Smith, tiré de [28].

### Observations

Le premier point à souligner sur ce système est l'utilisation d'une plaque plane comme élément de capture d'énergie. Malgré les coûts associés qui sont probablement faibles, on sait que du côté aérodynamique, l'utilisation d'une plaque plane n'est pas des plus intéressantes compte tenu de la faible plage d'angle d'attaque qu'il est possible d'atteindre sans décrochage.

D'un autre côté, il est intéressant d'utiliser un volant d'inertie de manière à conserver une fréquence d'oscillation constante au fil des cycles. Dans ce système, cette dernière intervient directement dans la trajectoire de la plaque. Or, pour être encore plus efficace, il pourrait être intéressant de faire tourner cette dernière plus rapidement que le système, de manière à obtenir une inertie rapportée encore plus grande.

# Chapitre 3

## Prototype de table

### 3.1 Mise en contexte

Le prototype de table a été réalisé à l'été 2007. Le cadre de ce système était de réaliser un prototype fonctionnel pour expliquer le principe au public lors d'expositions et se familiariser avec la conception d'un système complexe à ailes oscillantes de manière à éviter des erreurs sur le prototype de 1 kW. Cette turbine fonctionne donc dans l'air, à l'aide d'un ventilateur de table.

### 3.2 Description du système

Le système complet du montage de table d'aérogénérateur à ailes oscillantes est présenté à la Figure 19. L'ensemble peut être décomposé en 4 sous-ensembles, soient les ailes (1), les mécanismes de transmission (2), la structure de support (3) et le système de conversion électrique (4).

Les ailes, lorsqu'elles sont en mouvement, ont pour fonction d'extraire l'énergie cinétique de l'écoulement et de la convertir en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est acheminée vers le système de conversion électrique par l'entremise des mécanismes de

transmission. L'ensemble des composantes est assemblé de façon rigide via la structure de support.

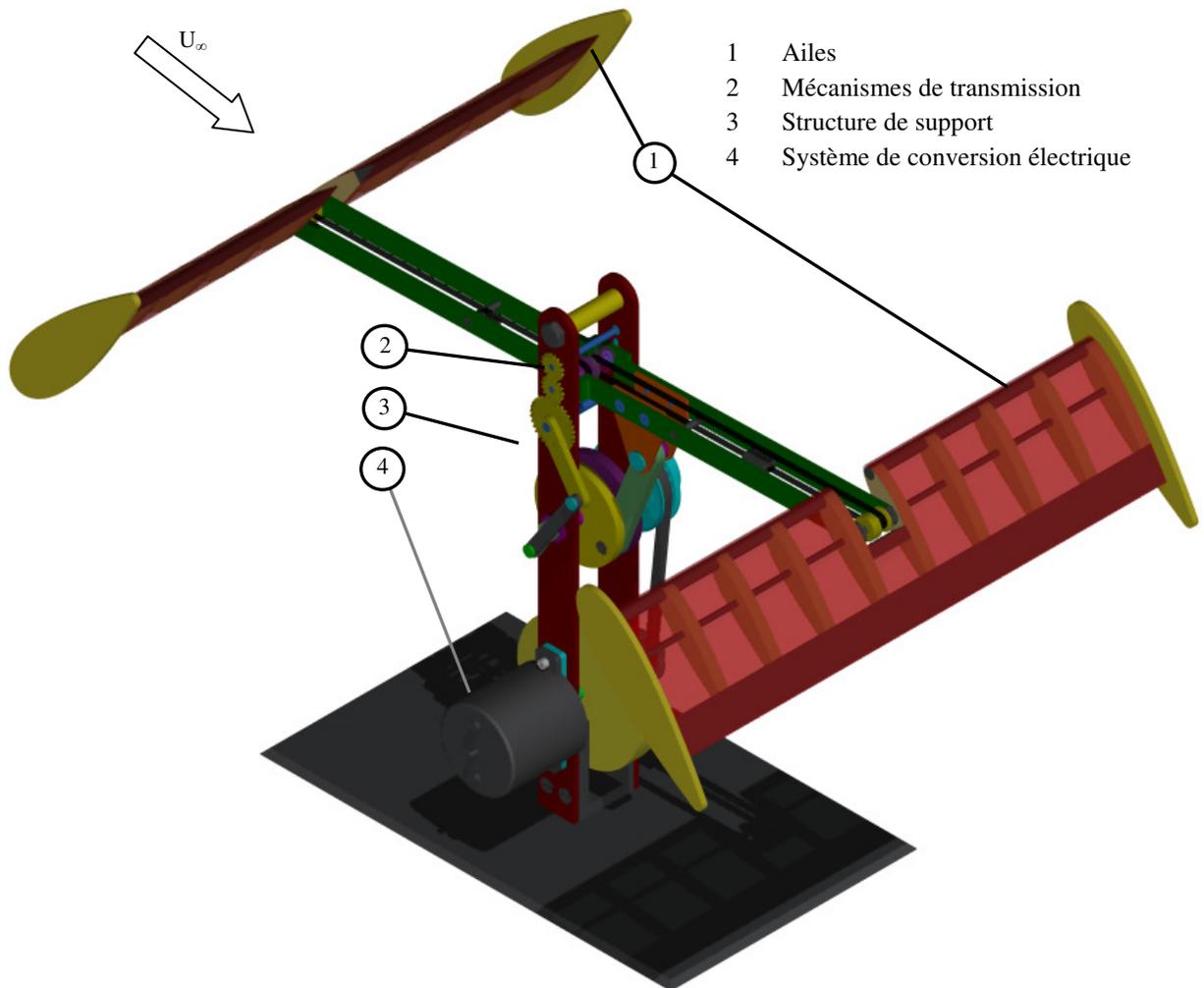


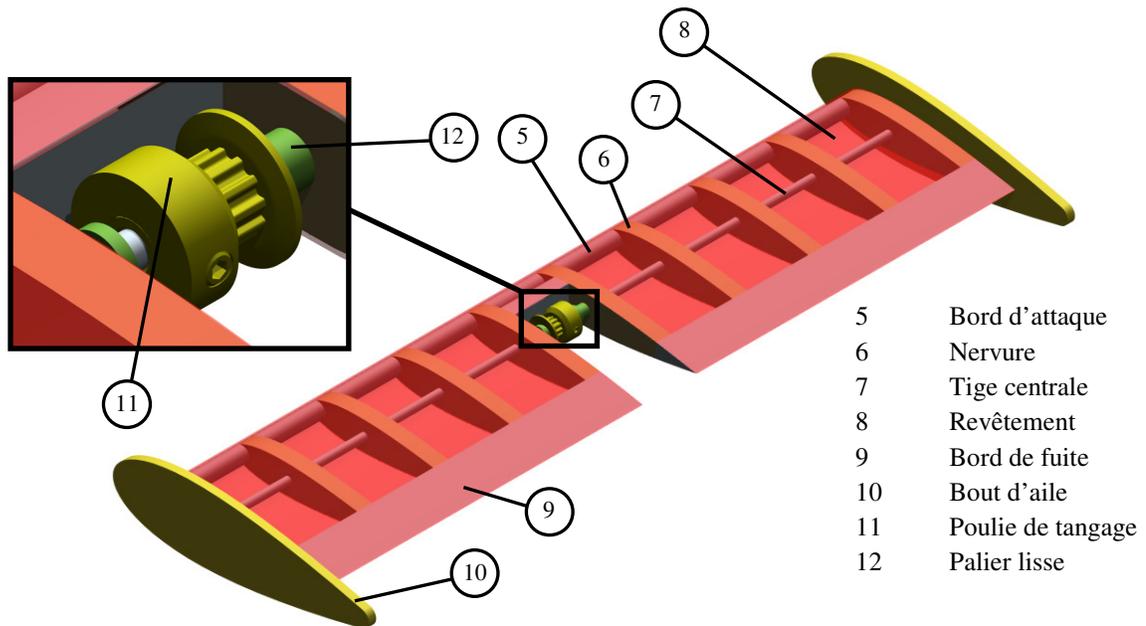
Figure 19 – Prototype de table d'aérogénérateur à ailes oscillantes.

### 3.1.1 Ailes

L'aile amont est représentée à la Figure 20. Au niveau structural, l'aile est composée de 10 nervures (6) en balsa assemblées avec de la colle sur le bord d'attaque (5) et sur le bord de fuite (9), également en balsa. La tige centrale (7), en aluminium, traverse les nervures (6) au tiers de corde. C'est par cette dernière que passe la puissance mécanique soutirée de l'écoulement. Cette structure est recouverte du revêtement (8), qui permet de générer les forces aérodynamiques. Celui-ci est fait d'un film polymère thermo rétractable typiquement utilisé pour les modèles réduits. Les forces aérodynamiques sont donc captées par le

revêtement (8) et sont acheminées à la tige centrale (7) par les éléments structuraux en balsa. À partir de la tige centrale, la puissance est acheminée vers les mécanismes de pilonnement et de tangage.

Au centre de la tige centrale (7), on trouve deux paliers lisses (12) et une poulie (11). Le rôle des paliers lisses (12) est de transmettre le mouvement de pilonnement à l'aile et de stabiliser l'aile transversalement. La poulie (11), quant à elle, transmet le mouvement de tangage. Les paliers lisses (12) sont faits en téflon et la poulie (11) est en aluminium. Finalement, on retrouve à chaque extrémité une plaque de bout d'aile (10), en aluminium, qui atténue les effets des tourbillons de bout d'aile sur la performance aérodynamique.



**Figure 20 – Aile amont.**

La différence entre l'aile amont et l'aile aval se situe au niveau du dégagement central. Pour permettre la transmission du mouvement, l'aile amont possède un dégagement du côté du bord de fuite (9), alors que ce dernier est du côté du bord d'attaque (5) pour l'aile aval.

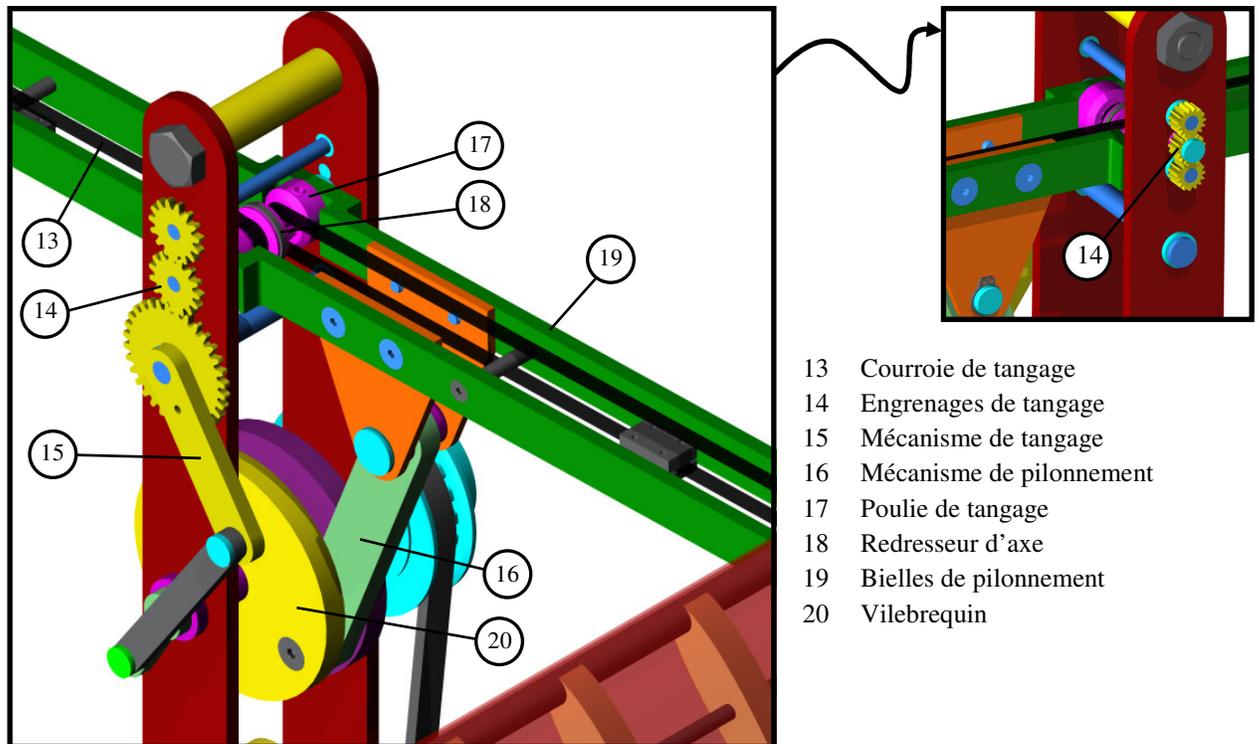
### 3.1.2 Mécanismes de transmission

Les mécanismes de transmission sont montrés sur la Figure 21. Ces derniers sont responsables de la transmission du travail aérodynamique jusqu'au système de conversion électrique. La cinématique est décomposée en 2 mouvements : le tangage et le pilonnement. Pour le pilonnement, la tige centrale (7) transmet les forces de portance aux bielles de pilonnement (19), ce qui confère un mouvement vertical aux ailes. Pour le tangage, le couple aérodynamique est transmis entre la tige centrale (7) et la poulie de tangage (11) vers la chaîne cinématique de tangage. Les deux mouvements ont la même fréquence et une phase de 90°. Ceci est assuré par la position relative entre les mécanismes lorsqu'ils sont installés sur le vilebrequin. L'ensemble de bielles utilisées dans ces mécanismes est en aluminium. Du téflon a été utilisé pour fabriquer les paliers lisses.

Pour le pilonnement, le mouvement est assuré par un mécanisme à 4 barres (16). Une des bielles de ce mécanisme à 4 barres coïncide avec les bielles de pilonnement (19), de telle sorte que lorsque ces dernières sont mises en mouvement par la force de portance, le mécanisme de pilonnement (16) l'est également. Le mécanisme est dimensionné de manière à ce que pour un mouvement de pilonnement sinusoïdal des ailes, le mécanisme fera tourner le vilebrequin à vitesse presque constante et vice et versa.

Le mouvement de tangage est assuré par un mécanisme à 4 barres (15) identique à celui utilisé en pilonnement, mais réduit à l'échelle afin d'accommoder les dimensions des engrenages. Cependant, le mécanisme de tangage possède une bielle dont la longueur est variable, ce qui permet d'atteindre des amplitudes de tangage maximales de 36°, 49° et 61°. Le mouvement de tangage est transmis des ailes vers le système via des courroies crantées (13) et des engrenages droits (14). Étant donné que les 2 poulies (17) tournent en sens opposé mais que leur axe est confondu, un redresseur d'axe (18) en bronze autolubrifiant a été utilisé.

La puissance récupérée par les mouvements de pilonnement et de tangage est ensuite acheminée à un arbre situé à la sortie du vilebrequin (20) afin d'alimenter le système de conversion électrique.



- 13 Courroie de tangage
- 14 Engrenages de tangage
- 15 Mécanisme de tangage
- 16 Mécanisme de pilonnement
- 17 Poulie de tangage
- 18 Redresseur d'axe
- 19 Bielles de pilonnement
- 20 Vilebrequin

Figure 21 – Mécanismes de transmission.

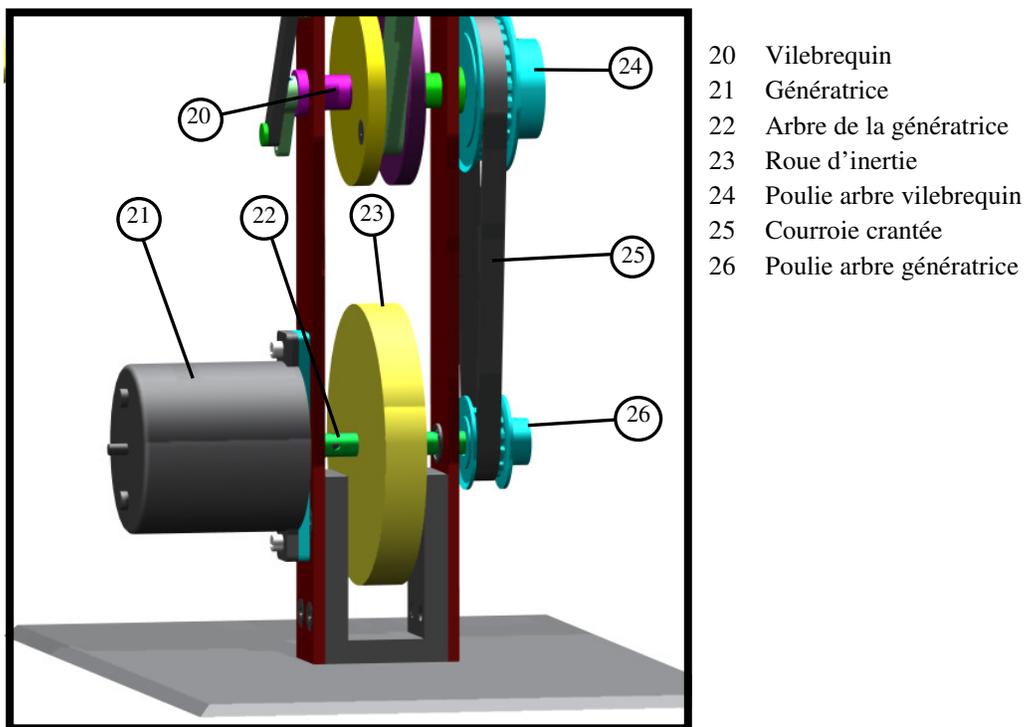
### 3.1.3 Système de conversion électrique

La puissance transmise par les mécanismes est acheminée vers le système de conversion électrique de manière à produire de l'électricité. L'ensemble des composants de ce sous-système est montré à la Figure 22.

La puissance est donc transmise du vilebrequin (20) vers l'arbre de la génératrice (22) par l'entremise d'une courroie crantée (25) et de poulies (24, 26). Le rapport de transmission est tel que l'arbre de la génératrice (22) tourne deux fois plus rapidement que l'arbre du vilebrequin (20). Les poulies ainsi que les arbres sont en aluminium. La courroie crantée (25) a un pas de 0.200 po (XL).

La génératrice (21) utilisée est un moteur DC couplé à une transmission de manière à ce que la vitesse de rotation soit de 115 RPM pour une tension de 12 V. Sa puissance nominale se situe autour de 20 mW.

Le système, tel que décrit précédemment, possède une inertie rapportée à l'arbre de sortie variable. Cette caractéristique est causée par le fait que les mécanismes à 4 barres utilisés génèrent un rapport de transmission fluctuant entre l'arbre de sortie et certaines composantes, ce qui fait également fluctuer l'inertie mesurée à l'arbre de sortie. Les efforts aérodynamiques agissant sur l'aile sont également variables. Considérant ces deux aspects, il est possible que le système s'arrête au point mort et ne soit pas capable de redémarrer. Afin d'atténuer cette caractéristique, un volant d'inertie (23) a été ajouté au système pour amortir les variations de vitesses dues à l'inertie et aux forces aérodynamiques variables.



**Figure 22 – Système de conversion électrique.**

La roue d'inertie sert donc à amoindrir les fluctuations de vitesse pendant le mouvement. Cette dernière a été dimensionnée de manière à ce que son inertie soit environ de la même grandeur que celle du système lorsque ce dernier est dans sa position d'inertie maximale. La roue d'inertie est fabriquée en acier inoxydable.

### **3.1.4 Structure de support**

Au niveau de la structure de support, 4 pièces servent à rigidifier le système, soit le socle (27), les deux montants latéraux (28) et la pièce en « U » (29). Cet ensemble est montré à la Figure 23.

Comme son nom l'indique, le socle (27) sert de base au montage mais empêche également le système d'osciller lorsque les ailes sont en mouvement. La pièce en « U » (29) fait une liaison rigide entre le socle (27) et les montants latéraux (28). Finalement, les montants latéraux (28) servent à supporter l'ensemble des mécanismes à leur hauteur respective. Les quatre pièces énumérées précédemment sont faites en aluminium.

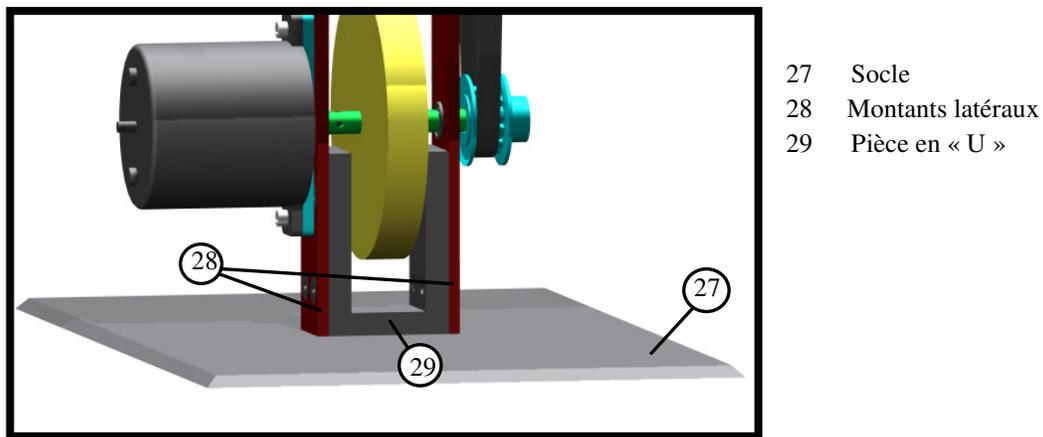


Figure 23 – Structure de support.

### 3.3 Analyse du fonctionnement du prototype de table

Suite à la réalisation du prototype de table, quelques détails influençant la performance du montage sont ressortis. L'analyse de ces détails visait à établir une liste de modifications à apporter à la version initiale (v1) du prototype de table de manière à obtenir de meilleures performances avec une version modifiée (v2) et à ne pas répéter ces erreurs sur le prototype de 1 kW.

1. Problème: Il était difficile d'ajuster la phase des ailes avec celle du mécanisme à 4 barres de tangage. Ceci se faisait en dévissant les poulies sur les ailes et en tournant les ailes pour les mettre à la bonne position à un point clé. Étant donné l'asymétrie du mécanisme, l'ajustement était souvent un compromis fait à l'œil.

Solution: Ajouter des repères au montage pour que cet ajustement soit précis même s'il est fait à l'œil. Ceci ne pouvait pas être fait sur le prototype de table pour des raisons de dimensions géométriques, mais l'a été sur le prototype de 1 kW.

2. Problème: Le mouvement des ailes n'était pas celui désiré. En effet, les mécanismes initialement proposés par Allen-Demers [15] ne rendaient pas les trajectoires sinusoïdales auxquelles on s'attendait, et ce autant pour le pilonnement que pour le tangage. La Figure 24 et la Figure 25 montrent une comparaison entre une trajectoire sinusoïdale et le mouvement du prototype de table.

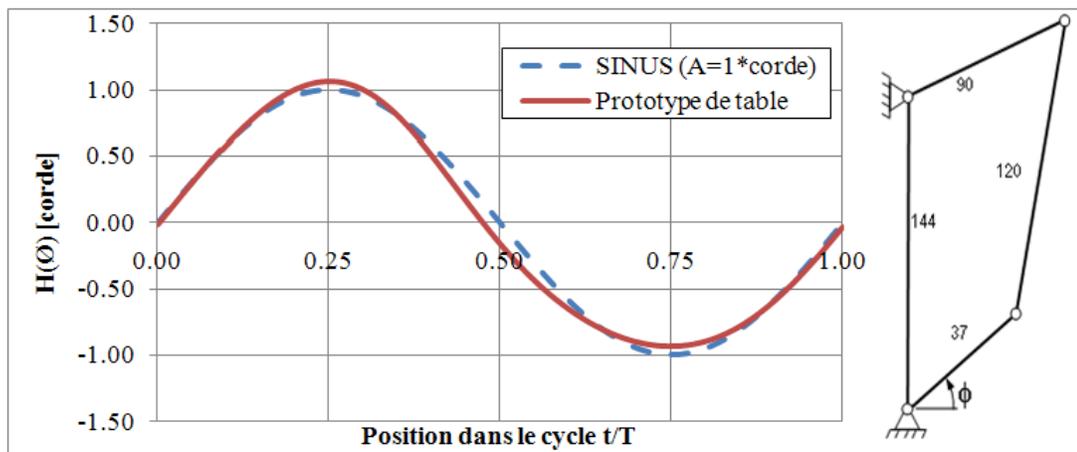


Figure 24 - Trajectoire de pilonnement - Prototype de table.

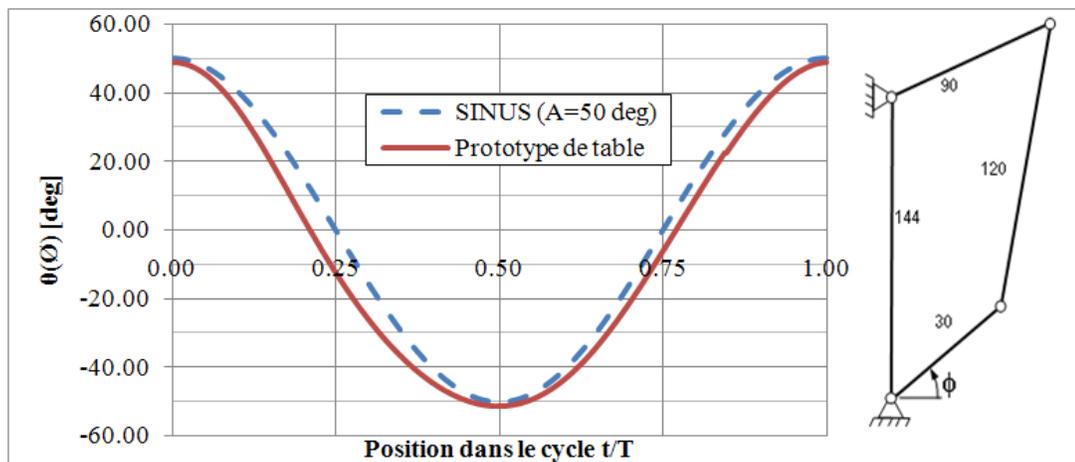


Figure 25 - Trajectoire de tangage - Prototype de table.

Solution: Le prototype de table a dû conserver sa configuration de mécanismes initiale. Par contre, une optimisation numérique par la méthode des gradients conjugués a été effectuée pour le prototype de 1 kW, dans le but de rendre plus fidèles les trajectoires du système. Les résultats de cette optimisation seront présentés dans une section ultérieure.

3. Problème: La transmission de la puissance entre l'arbre d'entrée des mécanismes et le mécanisme de tangage se faisait avec une vis de pression. Initialement, il n'y avait pas de plat sur l'arbre, ce qui entraînait un glissement et une difficulté pour l'ajustement de la phase entre le pilonnement et le tangage (90°) qui devait se faire à l'œil. Un plat a été réalisé sur l'arbre pour empêcher le glissement, mais ce dernier a été fait approximativement et la phase de 90° est demeurée peu précise.

Solution: Pour le prototype de table, le plat a été refait avec une meilleure précision. Pour le prototype de 1 kW, un meilleur moyen de transmission qu'une vis de pression a été utilisé (clavette).

4. Problème: Les paliers en téflon se sont avérés peu fiables. Ils se sont usés et n'étaient pas assez rigides pour le montage. Un des paliers problématiques était celui tenant la roue dentée du centre pour l'aile arrière. Ce dernier fléchissait et entraînait un jeu important sur le tangage de l'aile arrière. Un autre palier problématique était celui qui assurait la liaison entre le vilebrequin et la première bielle du mécanisme de pilonnement.

Solution: Pour le prototype de table, les paliers les plus problématiques ont été remplacés par des roulements à billes (là où c'était possible), ou des paliers lisses en laiton imprégné d'huile. Le laiton imprégné d'huile est moins susceptible de s'user et offre une plus grande rigidité que le téflon. Pour le prototype de 1 kW, des roulements à billes ont été prévus de manière à rendre le montage le plus efficace possible. Une attention particulière a nécessairement du être portée à l'utilisation des roulements dans un environnement sous-marin.

5. Problème: Les ailes présentaient un rapport d'allongement relativement petit et la partie centrale (l'endroit le plus performant aérodynamiquement) était utilisée pour la fixation des ailes. La mécanique interférait aussi dans l'écoulement, ce qui nuisait ainsi à l'aile arrière.

Solution: Pour le prototype de 1 kW, les ailes furent tenues par les bouts et présentaient un rapport d'allongement plus grand (7). On s'est ainsi assuré de minimiser les perturbations sur l'écoulement amont de manière à permettre aux ailes de soutirer le plus d'énergie possible.

6. Problème : Les jeux dans les engrenages occasionnaient une imprécision sur la position de tangage, surtout au niveau de l'aile arrière. La somme de plusieurs jeux dans les petits engrenages entraînait un jeu total important sur la position des ailes.

Solution: Pour le prototype de 1 kW, la chaîne cinématique a été simplifiée en diminuant le nombre de composantes de transmission. Le fait d'utiliser des engrenages plus grands a permis une meilleure précision sur l'entraxe. Il a aussi fallu s'assurer que les courroies soient suffisamment rigides pour ne pas entraîner un nouveau jeu étant donné que la puissance instantanée en tangage peut être importante.

7. Problème : La courroie crantée située entre le vilebrequin et l'arbre de la génératrice manquait de tension et oscillait durant le cycle, ce qui se traduisait directement sur la vitesse de rotation du montage. Ceci s'explique par le fait que dans un cycle typique, une partie du cycle permet l'extraction d'énergie (système entraîne le volant d'inertie et la génératrice) et sur l'autre partie du cycle, de l'énergie doit être fournie pour entraîner le système (volant d'inertie entraîne le montage). La tension dans la courroie changeait ainsi de sens, ce qui amène la courroie à constamment reprendre le jeu.

Solution: Pour le prototype de table, un tendeur de courroie a été installé. Pour le prototype de 1 kW, chaque utilisation de courroie crantée ou de chaîne a été accompagné d'un dispositif de mise en tension pour ne pas entraîner des jeux indésirables.

8. Problème : Les courroies reliant l'axe central aux poulies sur les ailes étaient difficiles à boucler avec l'attache servant à cette fin. Dans une position la courroie était serrée, ce qui surchargeait les paliers et causait du frottement et dans l'autre position la courroie était distendue, ce qui entraînait un jeu sur la position de tangage des ailes.

Solution: Si la courroie crantée était conservée sur le prototype de 1 kW, il fallait nécessairement mettre un tendeur de courroie de manière à ne pas entraîner une imprécision sur la position en tangage de l'aile ou à entraîner une surcharge dans les paliers.

9. Problème : le système ne tournait pas à vitesse constante même avec la roue d'inertie.

Solution: Sur le prototype de table, des tests ont été faits en faisant tourner la roue d'inertie plus rapidement de manière à savoir si une inertie plus grande atténue le problème.

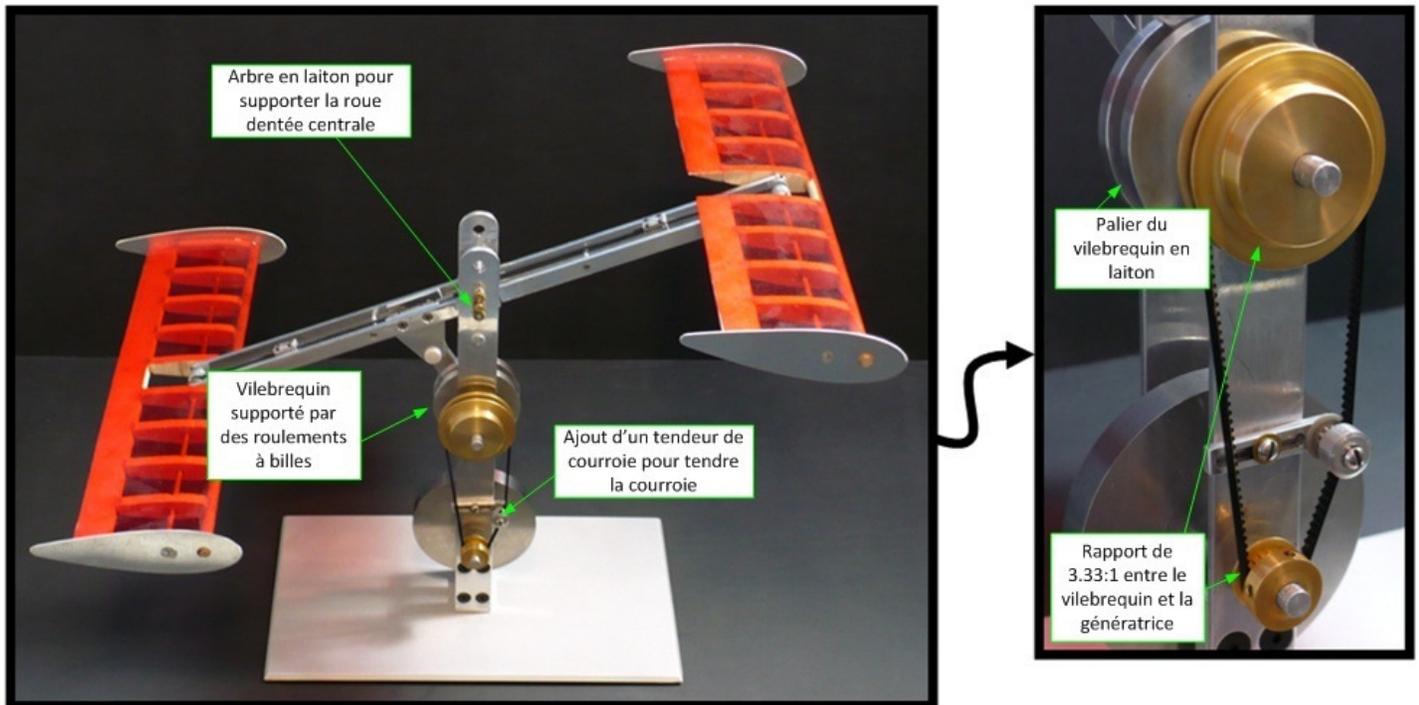
### **3.4 Modifications apportées au prototype de table**

Suite à l'analyse faite à la section précédente, une série de modifications ont été apportées au prototype de table de manière à améliorer ses performances et sa fiabilité. Les modifications qui ont été apportées sont illustrées dans la Figure 26.

Elles ont donc permis de corriger certaines difficultés trouvées sur la version 1, notamment :

- la trajectoire de l'aile arrière est nettement plus fidèle à la trajectoire décrite dans le chapitre 1 que sur la version 1 grâce au remplacement de l'arbre de téflon de la roue dentée centrale par un arbre en laiton. La chaîne cinématique de tangage de l'aile arrière s'en est vue grandement améliorée du fait que l'arbre en laiton ne fléchissait

pas comme le faisait l'ancien. Des gains au niveau de l'extraction d'énergie ont également été réalisés à ce niveau. Ils seront présentés à la section 3.5;



**Figure 26 - Modifications apportées au prototype de table.**

- l'ajout d'un tendeur de courroie sur la courroie entre le vilebrequin et l'arbre de la génératrice a permis à la roue d'inertie de mieux intervenir dans la vitesse du système sans que le jeu dans la courroie ne soit repris deux fois par cycle. Cet ajout a donc permis de limiter les secousses dans le cycle et ont permis au montage de rendre un mouvement plus fluide. Le tendeur de courroie fabriqué comprend une bielle, un pivot et une poulie. La tension dans la courroie peut être ajustée par l'entremise du trou oblong situé sur la bielle. Le pivot a été fabriqué en laiton imprégné d'huile et la poulie crantée est en aluminium. De cette manière, le tendeur, tel que montré dans la Figure 26, applique la tension par l'intérieur de la courroie;
- le remplacement du palier du vilebrequin initialement en téflon par un palier en laiton a permis de pouvoir assembler le vilebrequin de façon beaucoup plus rigide qu'auparavant. De cette manière, la vis qui rigidifie le vilebrequin ne se desserre

plus en cours d'utilisation. Ceci permet au système de fonctionner pendant de plus longues périodes de temps sans avoir à être arrêté;

- le vilebrequin est maintenant supporté par des roulements à billes, ce qui permet de réduire le frottement autour de ce dernier. Étant donné que toute la puissance du système passe par le vilebrequin, il va de soi que localement, les pertes par frottement ont été diminuées;
- l'utilisation d'un rapport de transmission plus grand (3,33 :1) qu'auparavant (2 :1) a permis de donner à la roue d'inertie une pondération plus importante dans l'inertie totale du système. Cette modification, jumelée à l'utilisation d'un tendeur de courroie, a permis au système de fonctionner avec moins de fluctuations de vitesse durant un cycle. La nouvelle courroie est de dimension MXL alors que l'ancienne présentait des dimensions XL. Il faut cependant rappeler que la génératrice utilisée est limitée à 12 V, ce qui signifie une vitesse de 500 rpm. Ainsi, l'utilisation d'un rapport de transmission de 3,33 :1 limite la vitesse de battement des ailes à 167 rpm ou 2,8 Hz. Pour des vitesses d'oscillations supérieures, l'ancien rapport de 2 :1 doit être utilisé. L'utilisation de ce dernier permet d'atteindre des vitesses de battement de 250 rpm, ou 4,17 Hz. Étant donné que les deux courroies n'ont pas la même taille, une poulie lisse en laiton a été fabriquée et l'utilisation de cette dernière permet d'appliquer une tension par l'extérieur de la courroie, peu importe si cette dernière est de taille MXL ou XL;

### **3.5 Évaluation des performances des deux versions du prototype de table**

Afin de mesurer l'amélioration des performances suite aux modifications apportées au prototype de table, une série d'expérimentations a été réalisée. Ces dernières ont permis de quantifier la puissance extraite en soufflerie ainsi que les frottements présents dans les mécanismes du prototype et dans la génératrice. L'incertitude associée à ces essais est grande mais ces derniers permettent néanmoins de qualifier certaines tendances.

### Évaluation du frottement

Le but de ces essais était de quantifier les pertes par frottement dans les deux versions du prototype de table. Pour chacune des versions, deux expérimentations ont été réalisées, c'est-à-dire une évaluation des pertes pour les systèmes complets et pour les moteurs seulement.

Pour arriver à quantifier le frottement, la machine électrique était alimentée et la puissance requise pour faire tourner soit le système ou soit le moteur à une certaine vitesse était mesurée. Pour chaque version du prototype et pour chaque moteur, 50 essais couvrant toute la plage de vitesse de rotation admissible ont été réalisés.

Les graphiques qui suivent montrent les grandeurs des pertes pour les systèmes complets (Figure 27) et les moteurs (Figure 28) ainsi que des corrélations pour l'ensemble des essais réalisés.

Sur le graphique de la Figure 27, on remarque que la courbe du prototype v1 se situe au-dessus de la courbe du prototype v2, ce qui signifie que dans l'ensemble, les modifications apportées à la version 2 ont permis de réduire les pertes du prototype. On remarque aussi que la différence entre les deux courbes croît avec la fréquence. Pour une fréquence de 1 Hz, les deux systèmes ont des pertes qui se chiffrent à environ 0,2 W. À 3,5 Hz, la version 1 dissipe environ 1,15 W contre 0,9 W pour la version 2, ce qui représente une diminution de plus de 20% pour cette fréquence. Dans les deux cas, des régressions quadratiques ont été effectuées. Étant donné le coefficient de détermination qui est élevé (> 99%), on peut dire que dans la plage de fréquence considérée, la grandeur des pertes augmente avec la fréquence au carré.

En ce qui concerne les moteurs (Figure 28), on note que le moteur v2 engendre beaucoup moins de pertes que le moteur v1. À une vitesse de moteur de 7 Hz, le moteur utilisé sur la version 1 dissipe environ 0,185 W alors que celui de la version 2 dissipe 0,025 W. À cette fréquence, le moteur v2 dissipait ainsi environ 7 fois moins de puissance pour tourner, ce qui met en évidence que la génératrice utilisée sur la version 1 n'était pas efficace.

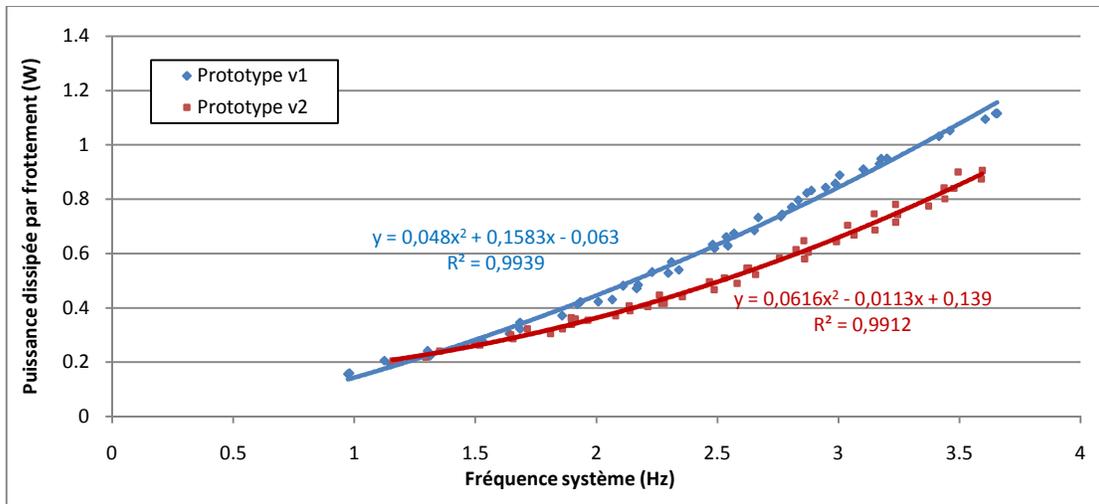


Figure 27 - Puissance dissipée - Systèmes complets.

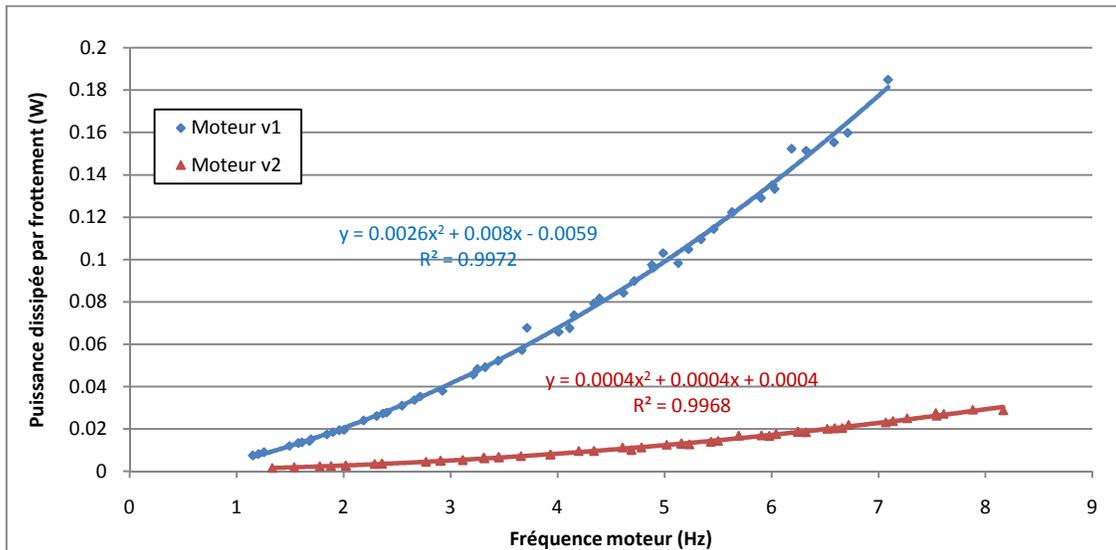


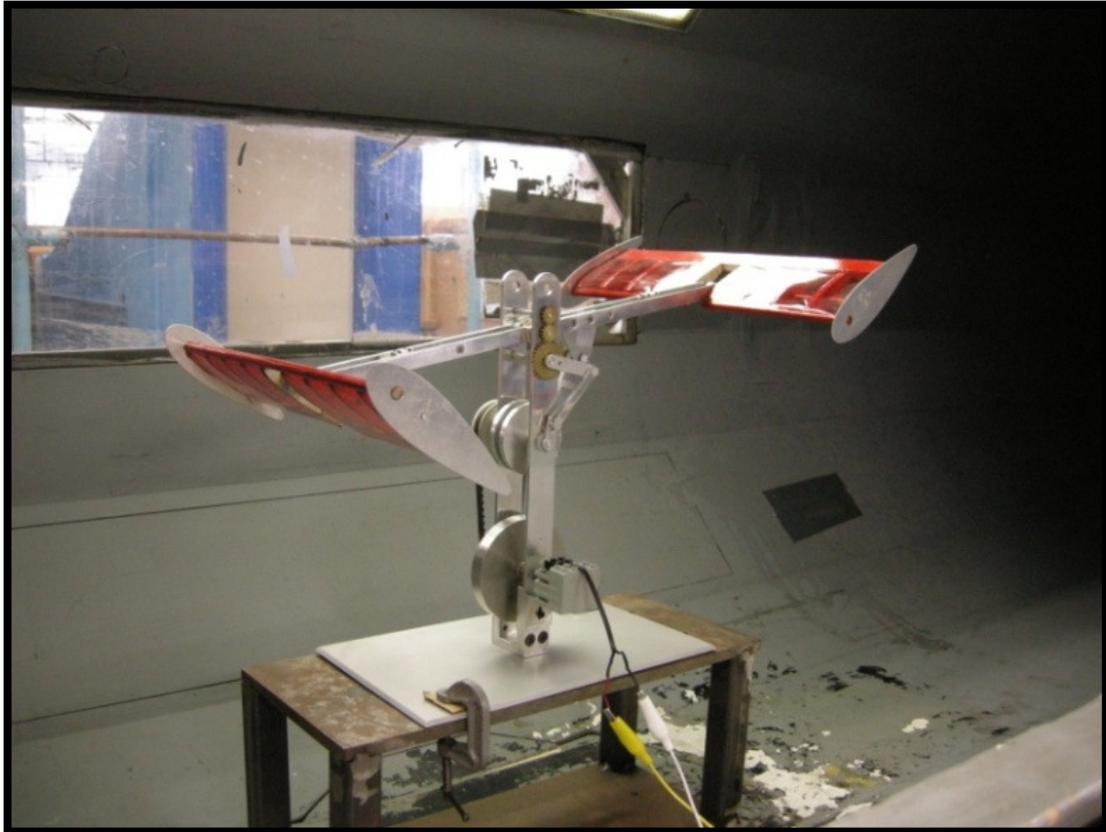
Figure 28 - Puissance dissipée - Moteurs seulement.

### Essais en soufflerie

Afin d'évaluer les performances d'extraction d'énergie du prototype de table, des essais en soufflerie ont été réalisés. La Figure 29 montre le prototype v1 installé dans la soufflerie.

Pour les deux versions, des essais ont été réalisées avec un vent de 7 m/s (Puissance disponible dans la fenêtre d'écoulement  $P_a = \frac{1}{2}\rho V^3 A = 8,8$  W) et 8 m/s ( $P_a = 13,2$  W). Pour chacune de ces vitesses, différentes résistances électriques ont été installées en série avec la

génératrice. De plus, il est à noter que la version 2 a été utilisée sans tendeur de courroie. Le Tableau 2 montre un sommaire des résultats obtenus pour la comparaison des versions 1 et 2.



**Figure 29 - Prototype de table dans la soufflerie.**

Dans le Tableau 2, on note que pour une vitesse de vent et une charge donnée, la version 2 a tourné plus rapidement que la version 1 dans tous les cas. Cette augmentation de vitesse se quantifie à environ 45% pour pratiquement tous les cas, sauf ceux où la charge était de 1 k $\Omega$  où on trouve un gain de vitesse qui se situe plutôt autour de 20%.

De la même manière, on remarque que la version 2 a produit entre 2 et 3 fois plus de puissance que la version 1 pour les mêmes conditions de vent et de résistance, sauf pour les cas à 1 k $\Omega$  où le gain est de 78% à 7 m/s et 47% à 8 m/s.

**Tableau 2 - Essais en soufflerie - Prototype de table**

Version	Vitesse vent (m/s)	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8
	Résistance (ohm)	4700	3200	2700	1710	988	4700	3200	2700	1710	988
v1	Vitesse rotation (Hz)	2,35	2,30	2,30	2,25	1,75	2,80	2,75	2,75	2,60	2,55
v2	Vitesse rotation (Hz)	3,35	3,34	3,14	3,35	2,15	4,20	4,14	4,03	3,64	2,92
	v2 versus v1 (%)	43%	45%	36%	49%	23%	50%	50%	47%	40%	15%
v1	Puissance extraite (mW)	8,9	12,3	14,9	21,7	22,0	12,9	17,9	21,2	30,0	49,1
v2	Puissance extraite (mW)	19,9	28,9	30,2	62,1	39,1	31,2	44,4	50,0	73,4	72,0
	v2 versus v1 (%)	123%	134%	104%	187%	78%	142%	148%	136%	145%	47%

### 3.6 Observations sur le prototype de table

On remarque que dans l'ensemble, les puissances extraites par le prototype de table sont faibles comparativement à la fenêtre d'écoulement. Deux aspects contribuent à produire cette faible performance, soit l'efficacité aérodynamique et l'efficacité du système.

Dans un premier temps, on note que les pertes produites dans le système sont grandes comparativement à la puissance à la sortie. Ceci permet de constater que le prototype de table est un système peu performant au niveau de l'efficacité de transmission. Les facteurs les plus dominants sont la petite taille des mécanismes (roues dentées, courroies) qui sont peu efficaces et difficile à installer précisément compte tenu de leur petite taille. Le grand nombre de paliers lisses nuit également à l'efficacité du système.

Au niveau de l'efficacité aérodynamique, on trouve une efficacité d'extraction aérodynamique très faible (Puissance maximale extraite de 73 mW pour une fenêtre d'écoulement de 13,2 W, ce qui représente une efficacité d'environ 0,5%). Ceci s'explique par la plage paramétrique de fonctionnement du prototype. Pour avoir l'efficacité la plus élevée possible, pour un angle de tangage de 50°, la fréquence adimensionnelle  $f^*$  (fréquence adimensionnelle = fréquence d'oscillation \* corde / écoulement amont) doit être près de 0,10 (Kinsey & Dumas, [3]). Or, dans les essais qui ont été réalisés, la fréquence la plus élevée qui a été atteinte est de 4,2 Hz, ce qui représente une fréquence adimensionnelle de 0,042 et donc loin de la plage de fréquences optimales.

Dans l'ensemble, le prototype de table a très bien rempli sa fonction première, c'est-à-dire illustrer le concept de turbine à ailes oscillantes. Toutefois, les essais réalisés en soufflerie ont permis de démontrer que le prototype de table n'était pas une machine efficace. La plage paramétrique de fonctionnement (dans l'air, où  $U_\infty \approx 10$  m/s, seuls les prototypes de grande dimensions pourraient opérer dans la bonne plage paramétrique, c'est-à-dire autour de  $f^* = 0.14$  et  $\theta_0 = 75^\circ$  pour  $H_0/c = 1$ .) ainsi que la faible efficacité des mécanismes de transmission sont en cause. En conclusion, la réalisation, l'amélioration et la caractérisation de ce système ont permis d'obtenir une grande quantité d'information pertinente pour la conception du prototype de 1 kW.

# Chapitre 4

## Conception de l'embarcation

### 4.1 Problématique

Un des défis intéressants associés à l'expérimentation du prototype de 1 kW était de trouver un emplacement d'essai convenant à la turbine et offrant des conditions d'opération adaptées au contexte expérimental. Après avoir considéré plusieurs sites dans des rivières dans la région de Québec, l'équipe en est venue à la conclusion qu'il était préférable d'installer l'hydrolienne sur une embarcation motorisée et de générer l'écoulement sur la turbine en déplaçant l'embarcation sur un plan d'eau. Les principales raisons qui ont motivé ce choix étaient :

- le fait de déplacer la turbine dans un plan d'eau au repos produit une meilleure qualité d'écoulement autour de la turbine comparativement à une rivière. En effet, il est difficile de trouver un site naturel offrant un profil de vitesse intéressant sur toute la fenêtre hydraulique balayée, à moins d'installer l'hydrolienne dans une rivière de grande dimension. En installant la turbine sur une embarcation et en prenant soin de faire fonctionner la turbine à une distance adéquate du fond et de la surface libre, l'hydrolienne opérera dans un écoulement caractérisé par un profil de vitesse essentiellement uniforme;

- l'installation sur une embarcation motorisée permet de moduler facilement les conditions d'essais puisque c'est le moteur de cette dernière qui propulse l'embarcation et génère donc l'écoulement autour de la turbine alors que pour un site naturel, la vitesse d'écoulement est reliée au débit de la rivière et aux intempéries;
- le niveau d'effort relié au déploiement est beaucoup moins important dans le cas d'une embarcation que pour une installation en rivière. En rivière, l'ancrage du système alors que l'eau coule entraîne des efforts et des coûts reliés à la logistique et aux infrastructures subséquentes importants. Dans le cas de l'embarcation, elle est simple à mettre à l'eau (similaire à la mise à l'eau d'un bateau) et ne nécessite pas d'infrastructures de maintien;
- en ce qui concerne la question du déploiement et de la manipulation pour maintenance, l'installation de l'hydrolienne dans un site naturel est coûteuse. Au contraire, l'utilisation d'une embarcation est plus simple à concrétiser et il est beaucoup plus facile d'accéder à la turbine pour maintenance puisque l'écoulement est généré seulement lorsque désiré.

Toutefois, l'utilisation d'une embarcation n'est pas sans inconvénients. Les principaux désavantages de ce type d'installation sont :

- il a fallu trouver un moyen de propulser cette dernière de manière à générer l'écoulement autour de la turbine. Puisque l'embarcation devait opérer sur un plan d'eau au repos, elle devait être suffisamment motorisée pour permettre de se déplacer dans la plage 0-2 m/s avec la turbine en mode d'extraction d'énergie;
- puisque les efforts autour de l'hydrolienne sont variables dans le temps, ils ont tendance à exciter et à faire osciller l'embarcation, autant dans le sens du mouvement qu'en tangage. L'embarcation devait donc être suffisamment inertielle de manière à répondre le moins possible à ces excitations.

Ainsi, comme il a été mentionné précédemment, l'équipe a jugé que ces aspects étaient des problèmes d'ingénierie contrôlables. En plus de ces défis, l'embarcation devait aussi être en mesure de :

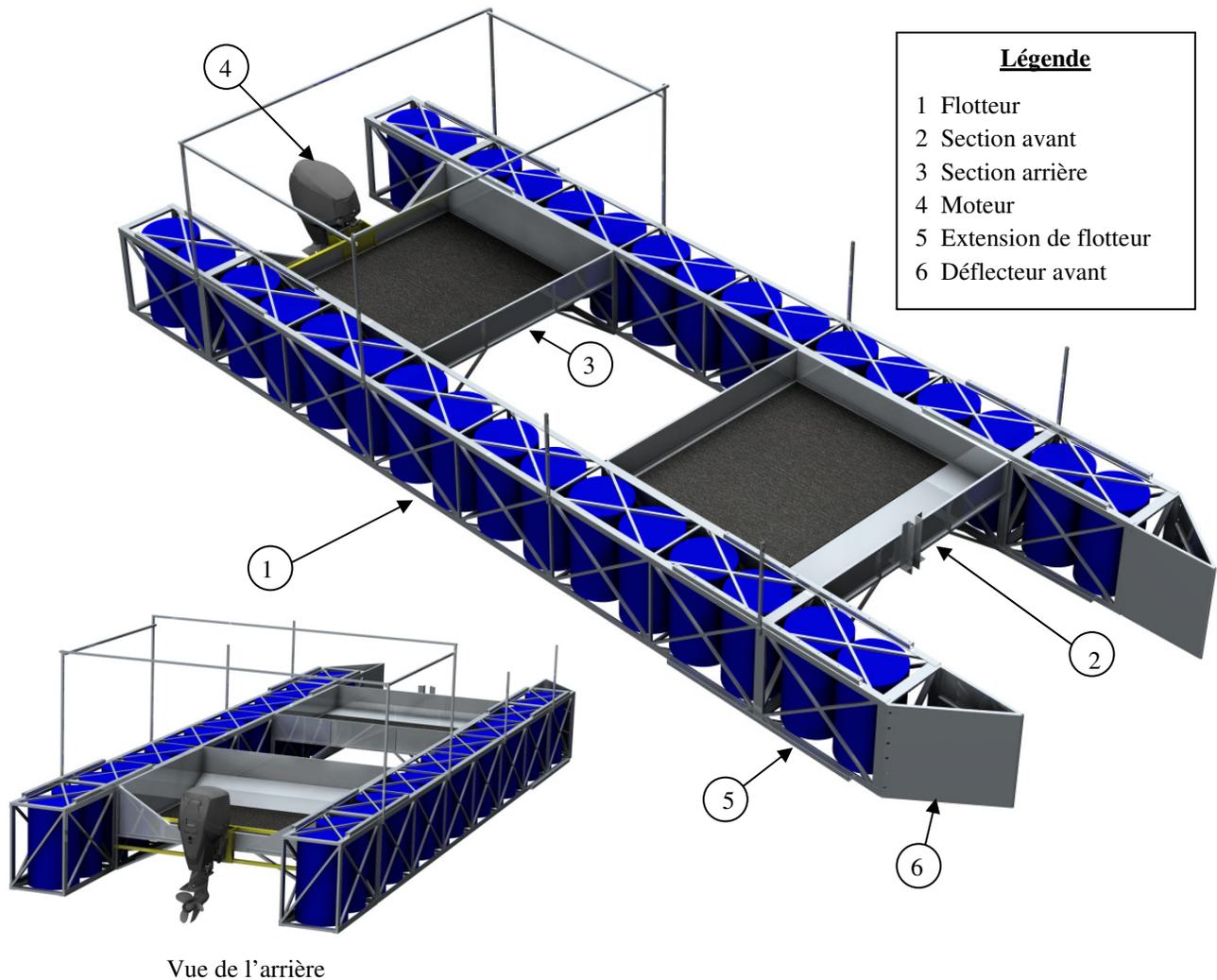
- fournir à l'hydrolienne un support rigide et être spécialement adaptée à l'installation de cette dernière;
- permettre un accès facile à la turbine pour des questions d'ajustement ou de maintenance. Compte tenu de la nature expérimentale, il devait être possible de pouvoir sortir aisément la turbine de l'eau de manière à faire des ajustements ou des manœuvres en eau peu profonde;
- offrir suffisamment d'espace à bord pour contenir l'équipage (3 personnes ou plus) et le matériel relié à l'expérimentation (électronique de puissance, instrumentation, etc.);
- être manœuvrable en ligne droite et en virage. De plus, une bonne capacité de maintien de cap et de contrôle de la vitesse était relativement importante puisque ces facteurs influencent directement la puissance disponible à l'hydrolienne.

Ces critères ont permis de réaliser une embarcation permettant de faire fonctionner adéquatement la turbine à ailes oscillantes. Il est à noter que tout au long du processus de conception, le dimensionnement de toutes les composantes a été rigoureusement validé à l'aide d'outils d'analyse mécanique tel que l'analyse de structure par éléments finis, l'analyse modale et le calcul de contraintes par la théorie de la résistance des matériaux.

## **4.2 Description de l'embarcation**

L'embarcation est présentée à la Figure 30. Pour des motifs de mobilité, ce montage peut se désassembler en parties moins imposantes pouvant être déplacées par 2 personnes ou plus. Ces composantes sont les flotteurs (1), la section avant (2), la section arrière (3), le moteur(4), les extensions de flotteurs (5) et les déflecteurs avant (6).

L'embarcation mesure environ 7,2 m de long, 3,6 m de large et 0,9 m de haut (sans la plaque de traînée ni le courantomètre). Le poids de la structure composée des 2 flotteurs (sans baril), de la section avant et de la section est d'environ 475 kg.



**Figure 30 - Vue générale de l'embarcation.**

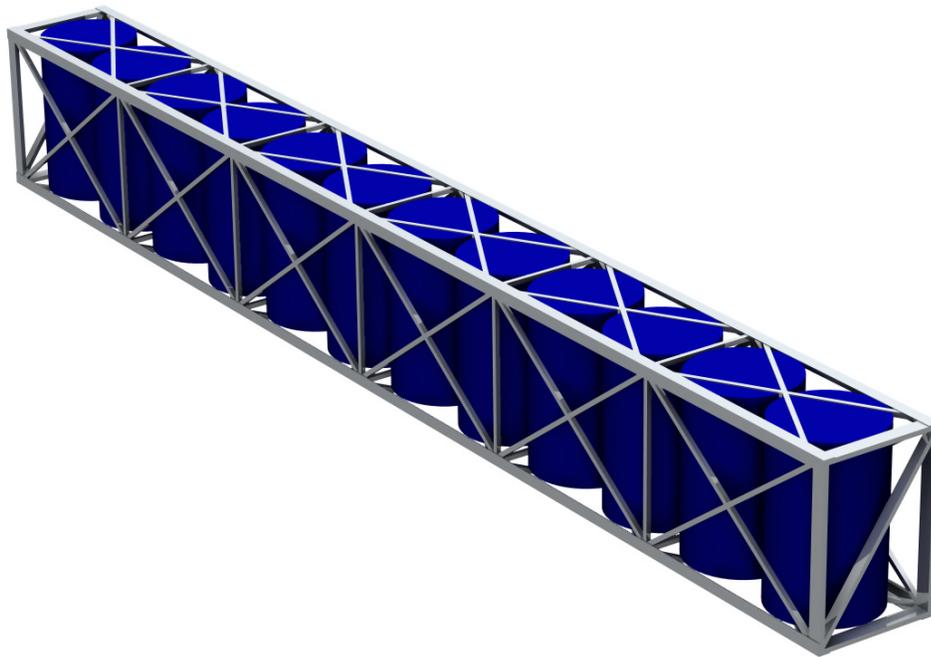
Comme on peut le remarquer sur la Figure 30, l'embarcation possède une architecture similaire à celle d'un ponton (2 flotteurs longitudinaux). Cette configuration permet d'avoir une bonne stabilité en navigation à basse vitesse. Entre les deux flotteurs, on retrouve la partie avant, la partie arrière et un dégagement, occupant environ chacun 1/3 de la longueur

totale de l'embarcation. Le dégagement central, mesurant ainsi 2,4 m x 2,4 m, sert à installer la turbine sous l'eau ou la remonter au-dessus de l'embarcation pour entretien.

L'embarcation est démontable pour faciliter sa manutention. Pour l'assemblage, un total de 80 boulons permet de relier les sections avant et arrière aux flotteurs. Le moteur s'installe sur la section arrière. Cette dernière a donc été dimensionnée de manière à recevoir les efforts reliés à la propulsion de l'embarcation.

#### **4.2.1 Flotteur**

L'embarcation motorisée comprend 2 flotteurs assurant la flottaison de l'ensemble. Chacun des flotteurs possède des dimensions hors-tout de 7,2 m de long, 0,6 m de large et 0,9 m de haut. La Figure 31 montre un flotteur.



**Figure 31 - Flotteur de l'embarcation motorisée.**

Les flotteurs sont composés d'un treillis en aluminium qui assure la rigidité du flotteur. L'intérieur de ce treillis est libre, de telle sorte qu'on peut y insérer des barils pour donner de la flottaison à l'ensemble.

Le treillis a été assemblé par soudage. À chaque extrémité, on retrouve une porte boulonnée au treillis, dont la fonction est de permettre l'insertion des barils dans le flotteur. Sans les barils, cette structure pèse 120 kg.

Chaque flotteur compte 12 barils possédant chacun un volume de 200 L. Ainsi, au total, les 24 barils permettent un déplacement d'eau de 4800 L, ce qui procure à l'embarcation 4,8 tonnes de flottaison si on néglige le volume d'eau déplacé par les autres pièces submergées. De plus, étant donné que l'embarcation devait être la plus inertielle possible pour ne pas réagir aux excitations générées par la dynamique instationnaire de la turbine, il a été nécessaire de remplir certains barils d'eau de manière à augmenter la masse et l'inertie de l'embarcation. Cette opération a été réalisée en puisant l'eau du lac avec une pompe (modèle de piscine) et en remplissant les barils par un bouchon situé sur le dessus.

#### **4.2.1 Section avant**

À l'avant du bateau, entre les deux flotteurs, on retrouve une section munie d'un plancher plat. Cette dernière, la section avant, a comme fonction d'unir rigidement les deux flotteurs et de permettre l'installation du matériel et de l'instrumentation. La Figure 32 et la Figure 33 montrent cette composante. Cette structure possède des dimensions hors-tout de 2,40 m x 2,40 m x 0,9 m de hauteur et une masse de 104 kg.

La section avant est composée d'une structure faite de tubes assemblés par soudage sur laquelle on a installé des tôles. Toutes les tôles ont été fixées sur la structure par soudage par point. On retrouve aussi, à l'avant de cette partie, une fixation pour le courantomètre.

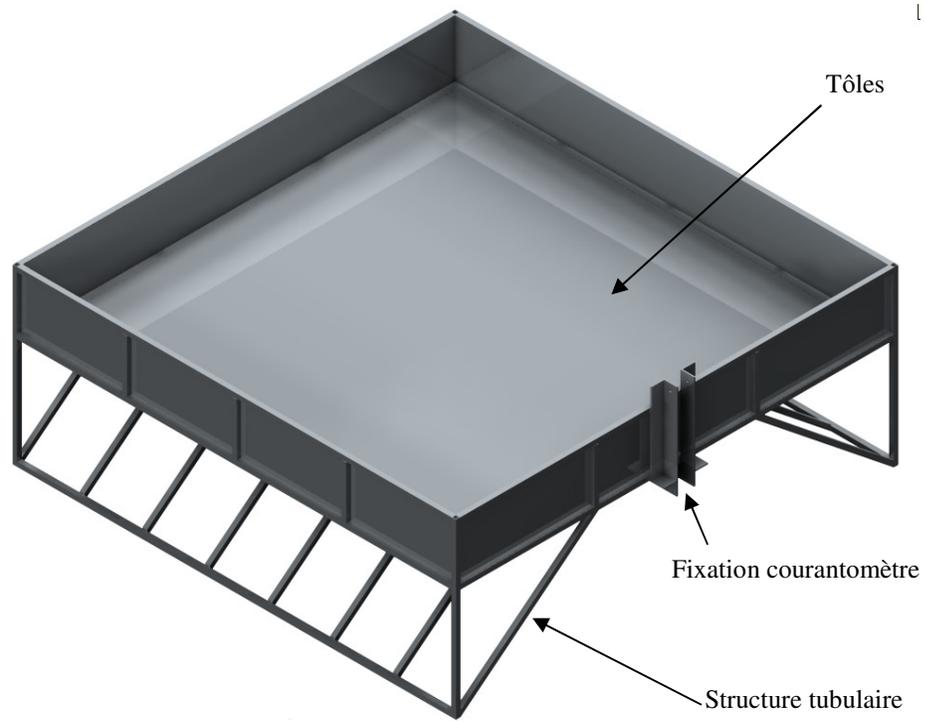


Figure 32 - Section avant - Vue de dessus.

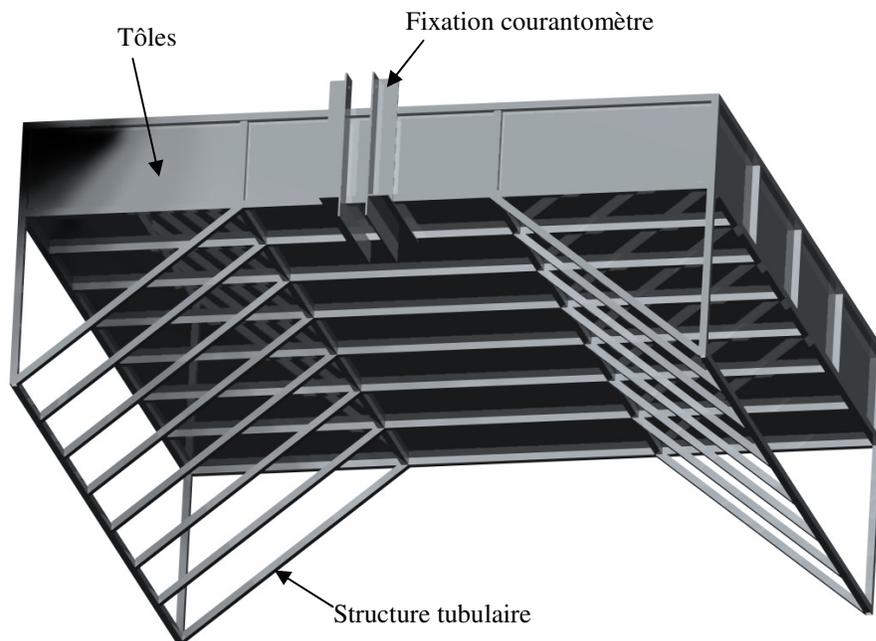


Figure 33 - Section avant - Vue du dessous.

### 4.2.3 Section arrière

À l'arrière de l'embarcation, entre les deux flotteurs, on retrouve une autre section habitable, la section arrière (Figure 34). Cette section permet de fixer le moteur, transmettre la poussée au reste de l'embarcation et loger le conducteur. Cette structure présente elle aussi des dimensions hors-tout de 2,40 m x 2,40 m x 0,9 m de hauteur et une masse de 104 kg.

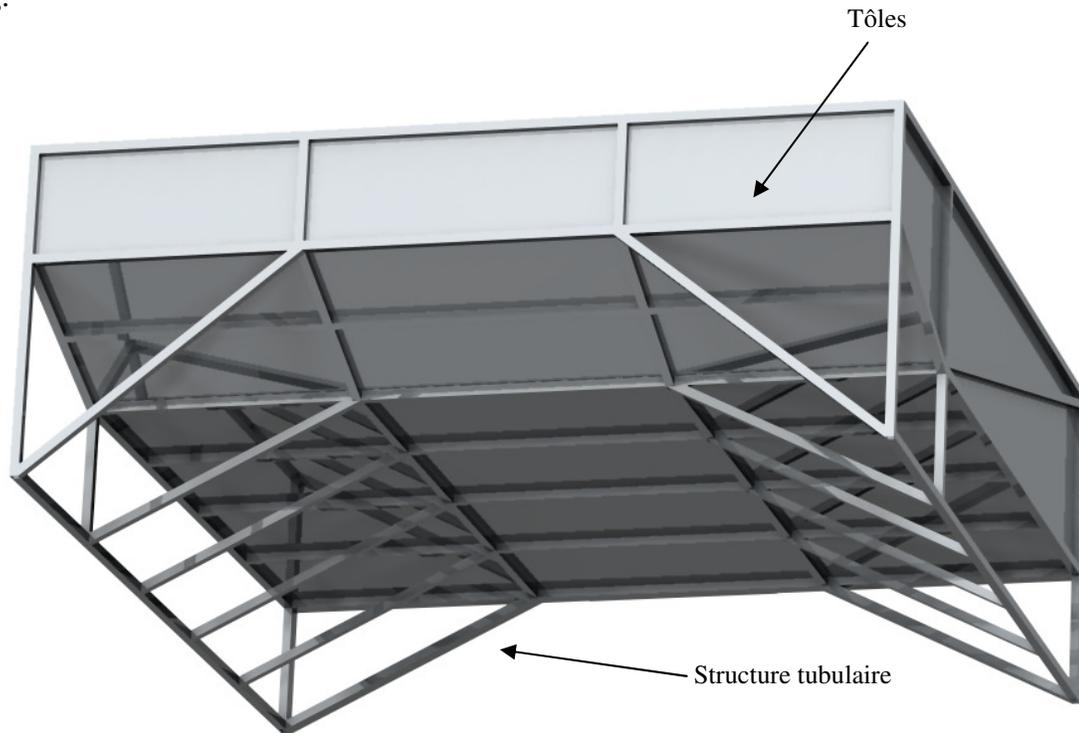


Figure 34 - Section arrière – Vue du dessous.

Comme on peut le voir sur la Figure 34, la section arrière est composée d'une section dont le plancher est plat et une section dont le plancher est incliné de 41%. Ce profil permet au conducteur d'être à l'aise pour conduire le moteur et le plancher incliné permet de réduire la traînée comparativement au cas où une simple tôle verticale aurait été utilisée.

### 4.2.4 Moteur

Pour propulser l'embarcation, il a été déterminé qu'un moteur hors-bord représentait le meilleur compromis par rapport à la performance et à la simplicité de mise en œuvre. Ainsi, afin de posséder suffisamment de poussée, un moteur hors-bord Johnson Ocean Runner de 150 HP a été acheté. Étant donné sa taille, sa puissance et son poids,

l'installation de ce moteur a nécessité l'ajout d'un renfort sur l'embarcation. Ce dernier a été conçu pour s'installer sur la section arrière tout en redistribuant les forces sur toute la largeur de la section arrière et sur les flotteurs.

Le moteur a nécessité l'emploi de câbles bidirectionnels pour le contrôle du gaz et de l'embrayage. Compte tenu du prix trop élevé de la manette de contrôle, il a été jugé préférable d'en fabriquer une. La Figure 35 montre un schéma de la manette des gaz qui a été fabriquée.

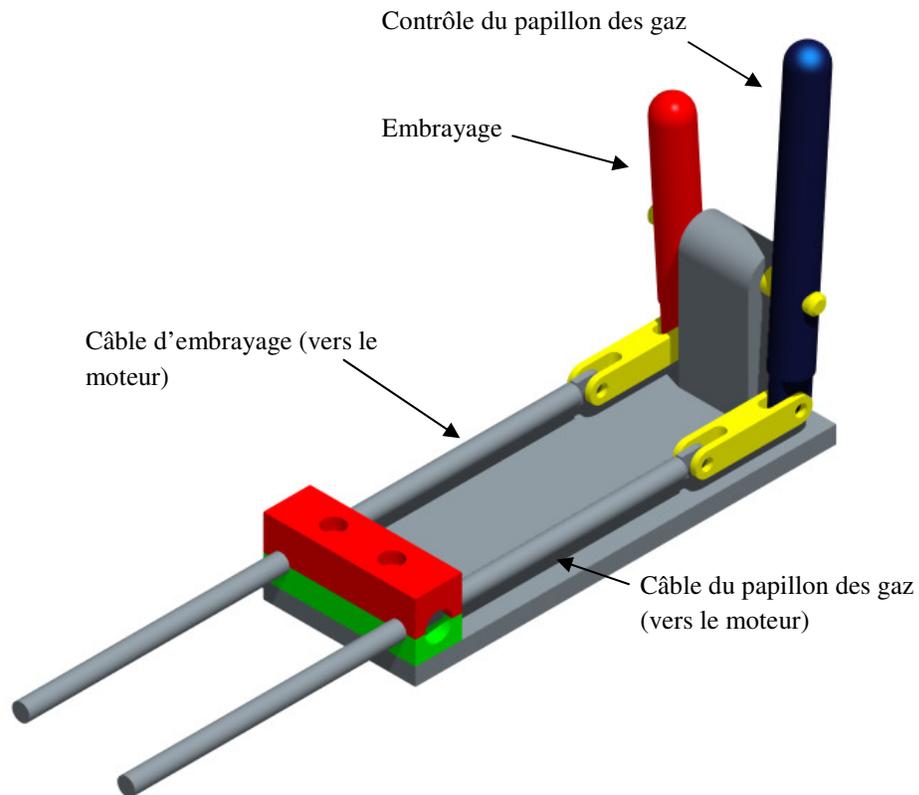
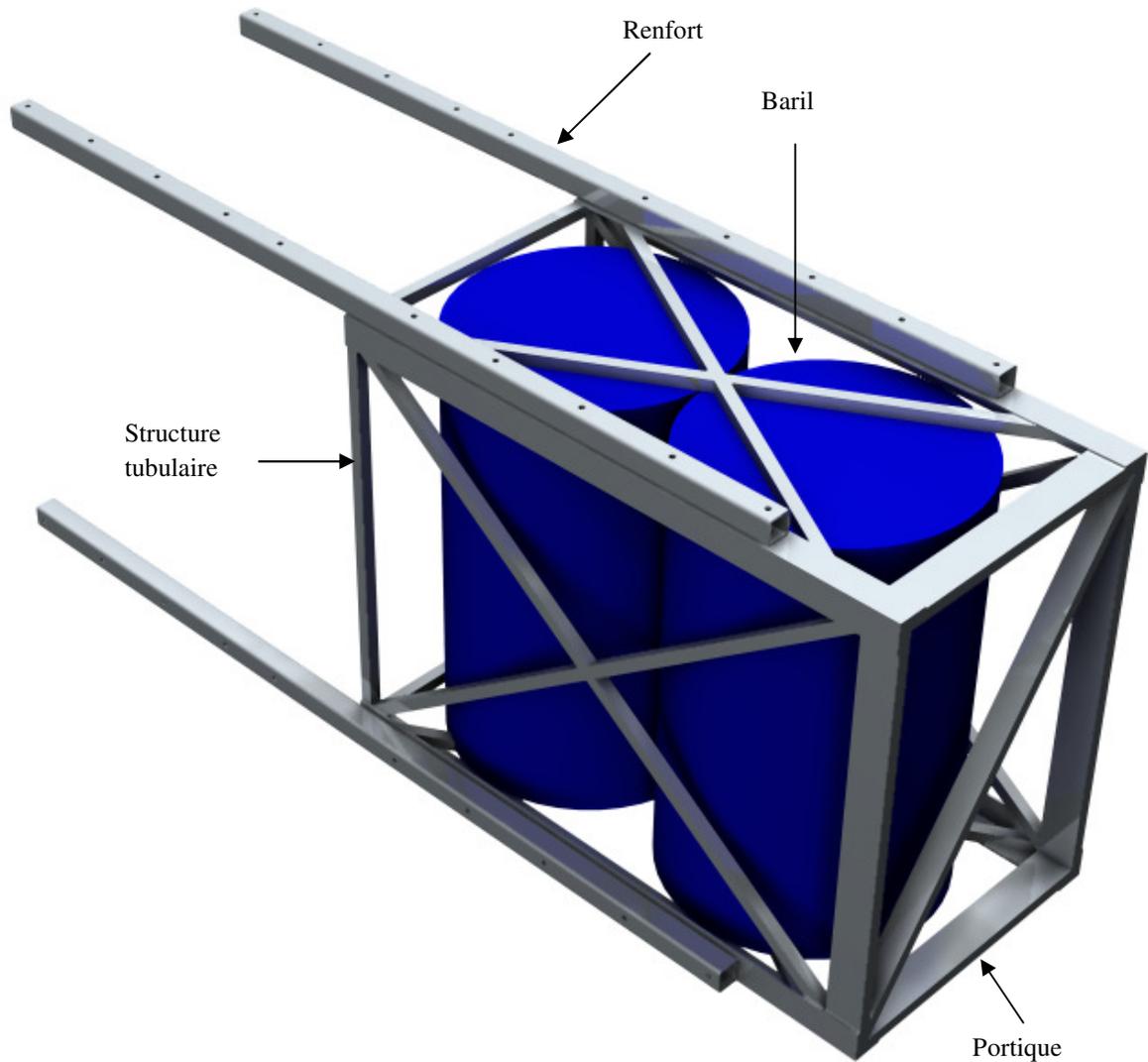


Figure 35 - Design de la manette des gaz et de l'embrayage.

#### 4.2.5 Extension de flotteur

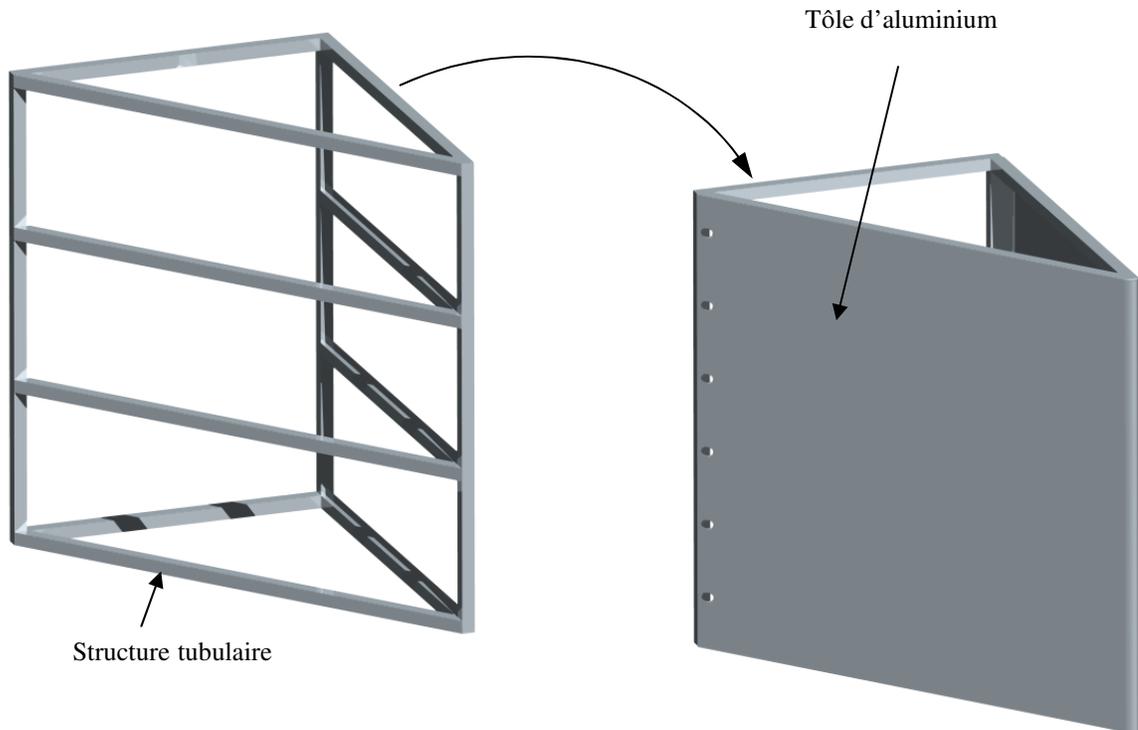
Au bout de chaque flotteur, on retrouve une extension, ce qui permet de faire passer le nombre de barils de 12 à 16 de chaque côté et d'augmenter la flottaison totale de l'embarcation. La Figure 36 montre cette composante.



**Figure 36 - Extension de flotteur.**

#### **4.2.6 Déflecteur avant**

À l'avant de l'embarcation, on retrouve de chaque côté un déflecteur permettant de rediriger l'écoulement vers l'extérieur de l'embarcation, ce qui a comme conséquence de réduire la traînée d'ensemble de l'embarcation. Cette composante est présentée à la Figure 37.

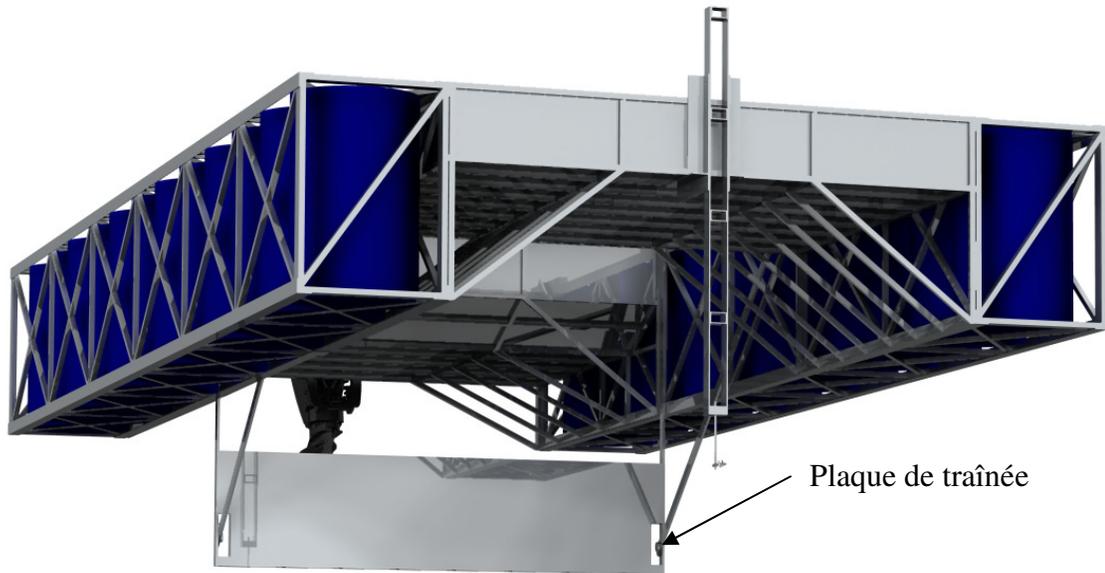


**Figure 37 - Déflecteur avant.**

Cette composante a été conçue pour s'installer sur le portique de l'extension de flotteur décrit précédemment. Le déflecteur avant possède une forme triangulaire dont l'angle d'incidence avec l'écoulement est de  $30^\circ$ .

#### **4.2.7 Plaque de traînée**

La plaque de traînée a comme fonction de simuler la traînée de la turbine sous l'embarcation et permettre des tests de propulsion avant l'installation définitive de la turbine. La Figure 38 montre la plaque de traînée lorsqu'installée sous l'embarcation.



**Figure 38 - Embarcation motorisée - Plaque de traînée installée.**

Avec un coefficient de traînée de 1,5, la traînée engendrée par la plaque à 2 m/s est  $D = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A C_d \cong 4500 \text{ N}$ . Puisque la plaque de traînée se loge sous l'embarcation, on ne peut l'installer directement sur la berge. Ainsi, cette dernière s'installe et se désinstalle au large lorsque l'embarcation est arrêtée. L'installation se fait manuellement par le dégagement central prévu pour la turbine. Lorsqu'installée, la plaque de traînée se loge tout juste devant la section arrière. Cette dernière est un assemblage soudé de pièce en aluminium.

# Chapitre 5

## Conception cinématique des mécanismes

### 5.1 Problématique

Tel que décrit dans le chapitre 1, étant donné que le concept choisi pour la turbine possède deux ailes en série dans l'écoulement et que toute la cinématique des ailes (pilonnement et tangage de chacune des ailes) doit être ramenée à une seule génératrice conventionnelle, la conception des mécanismes permettant le contrôle cinématique des ailes et la transmission de la puissance extraite s'est avéré être un des principaux défis de la conception du prototype.

Ce chapitre montre d'abord la recherche de concepts qui a été réalisée pour déterminer la topologie de mécanismes la plus adaptée, puis l'optimisation qui a permis de dimensionner la topologie choisie est décrite en détails.

### 5.2 Recherche de concepts de solution

Afin de trouver la solution optimale au problème que pose la conception des mécanismes cinématiques, une recherche de solution formelle a été effectuée et a permis d'élaborer cinq concepts remplissant les fonctions désirées. Ces derniers sont un amalgame d'éléments nouveaux et d'éléments utilisés dans le passé pour ce type de système. Parmi ces derniers,

certains éléments sont tirés de systèmes existants détaillés au chapitre 2 alors que d'autres éléments n'ont jamais été utilisés dans des mécanismes à ailes oscillantes. Les cinq concepts générés sont :

- système d'entraînement par courroies;
- système de conversion hydromécanique;
- système « Scotch-Yoke » compact;
- système « MAO » de rivière;
- système de conversion à mécanismes parallèles.

### **5.2.1 Système d'entraînement par courroies**

Le premier concept à être envisagé est le système d'entraînement par courroies, initialement proposé par Allen-Demers [15]. Un système de ce type n'a encore jamais été installé dans une application de turbines à ailes oscillantes. L'utilisation de courroies servant à la fois à soutenir l'aile et à lui conférer sa cinématique donne l'aspect original au concept.

Une illustration de ce principe est présentée à la Figure 39.

#### Fonctionnement

Le mouvement des ailes est entièrement assuré par le mouvement relatif des courroies de pilonnement et de tangage. En plus de contrôler la cinématique, les courroies servent d'éléments de transmission de puissance entre les ailes et les génératrices. Étant donné que la distance entre les courroies change en fonction de l'angle de tangage de l'aile, des tendeurs sont utilisés pour maintenir une tension constante dans les courroies. Il est à noter que le couplage direct entre les courroies et les génératrices entraîne une vitesse de rotation suivant une fonction sinusoïdale au niveau des génératrices. Finalement, il serait possible de ramener le mouvement des deux ailes à des machines communes de manière à obtenir une machine à 2 degrés de libertés mais un système à un seul degré de liberté n'est pas réalisable avec cette topologie.

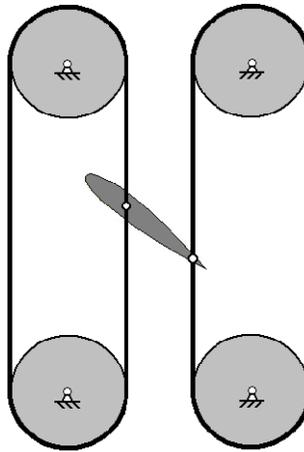


Figure 39 - Principe d'entraînement par courroies, tiré d'Allen-Demers [15].

#### Avantages et inconvénients

- + simplicité du montage – Peu de pièces requises;
- + possibilité de réaliser un montage qui perturbe peu l'écoulement près des ailes;
- peu de rigidité autour des ailes;
- machines électriques changent constamment de sens de rotation;
- impossibilité de ramener le système à 1 degré de liberté;
- dispositif de contrôle de la cinématique très complexe;
- élasticité des courroies de transmission est un problème potentiel important;

#### **5.2.2 Système de conversion hydromécanique**

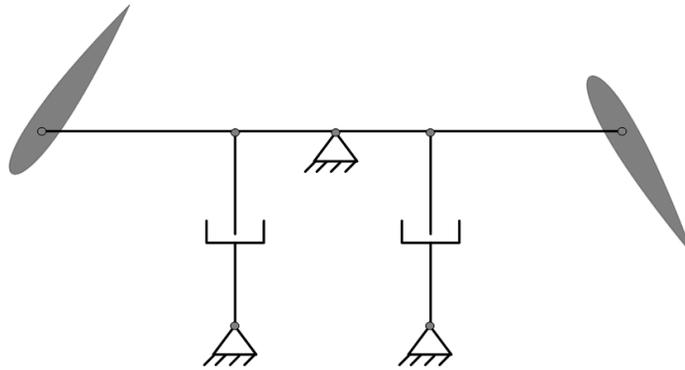
Le second concept considéré est le système de conversion hydromécanique. Ce dernier tient son nom de l'utilisation de vérins hydrauliques comme éléments de transmission de puissance. Un dispositif de ce type a d'ailleurs été utilisé pour le système Stingray ([8], [9] et [10]), tel que revu dans le chapitre 2.

#### Fonctionnement

Les mouvements de pilonnement et de tangage des ailes actionnent deux paires de vérins qui pompent l'huile dans un moteur hydraulique lui-même couplé à une génératrice.

Pour le pilonnement, une paire de vérin fait pivoter une bielle en son centre, ce qui fait pilonner les ailes fixées à chaque extrémité de cette dernière. Ce concept est présenté à la

Figure 40. Un principe similaire est utilisé pour le tangage alors que deux vérins, installés au-dessus et en-dessous de l'aile, permettent de faire tanguer chacune des ailes.



**Figure 40 - Principe de pilotage à l'aide de vérins hydrauliques.**

L'utilisation de vérins par paires, d'un réservoir d'huile et de valves unidirectionnelles permettent au moteur hydraulique de tourner à débit non-uniforme mais toujours dans le même sens. Deux dispositifs de contrôle (1 pour le pilotage, 1 pour le tangage) doivent être installés sur le système hydraulique. La complexité de ces systèmes est augmentée du fait qu'il faut fournir de la puissance au système sur une partie du cycle.

#### Avantages et inconvénients

- + facilité à installer les composantes électriques hors de l'eau en raison de l'utilisation de boyaux hydrauliques;
- + génératrices tournent toujours dans le même sens;
- rendement hydraulique moyen;
- dispositifs de contrôle très complexes;
- impossibilité de coupler les mouvements de pilotage et de tangage à un seul degré de liberté pour une configuration à 180° de déphasage.

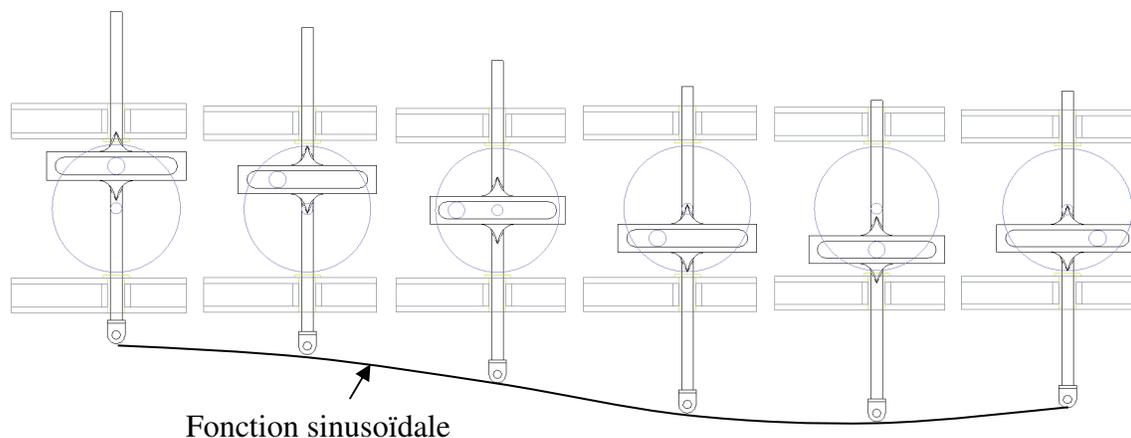
#### **5.2.3 Système « Scotch-Yoke » compact**

Le troisième concept considéré est le système « Scotch-Yoke » compact. Ce système utilise un mécanisme de type « Scotch-Yoke » pour le pilotage à la manière de McKinney et

DeLaurier avec leur *Wingmill* [2]. L'appellation « compact » provient de la chaîne cinématique de tangage minimaliste utilisant des servomoteurs tout près des ailes.

### Fonctionnement

La puissance de pilonnement est transmise des ailes à la génératrice via un mécanisme de type « scotch-yoke ». Le fonctionnement de ce type de mécanisme est illustré dans la Figure 41. Étant donné la sortie sinusoïdale obtenue avec ce mécanisme, la génératrice reliée au pilonnement tourne à vitesse constante.



**Figure 41 - Fonctionnement d'un mécanisme "Scotch-Yoke".**

Les ailes effectuent le mouvement de tangage grâce aux deux moteurs électriques situés tout près des ailes à chaque extrémité de la bielle centrale de pilonnement. Étant donné le couplage direct entre les ailes et leurs actuateurs, ces derniers doivent constamment changer de sens de rotation. L'utilisation d'un encodeur et d'un algorithme de contrôle en position permet de suivre la fonction de tangage précisément.

### Avantages et inconvénients

- + mouvement de pilonnement sinusoïdal facile à convertir en électricité;
- + chaîne cinématique de tangage simplifiée au maximum;
- actuateurs de tangage doivent être étanches;
- efficacité de la conversion du mouvement de tangage faible;

- efficacité du mécanisme « Scotch-Yoke » inconnue;
- impossibilité de ramener le concept à 1 degré de liberté.

#### **5.2.4 Système style « MAO » de rivière**

Le quatrième concept de solution est le système « MAO » de rivière. Cette appellation provient du fait que ce système utilise les mêmes éléments mécaniques que le montage « MAO » décrit dans le chapitre 2 sauf que ces derniers sont adaptés à une utilisation en milieu naturel. Ainsi, une courroie crantée et des câbles bidirectionnels sont couplés à des servomoteurs afin de guider respectivement le mouvement de pilonnement et de tangage des ailes.

##### Fonctionnement

La cinématique en pilonnement est transmise des ailes à une bielle centrale qui pivote en son centre. Cette rotation est acheminée vers l'arbre de la génératrice par une courroie crantée.

Pour le tangage, des câbles bidirectionnels sont installés à chaque extrémité des ailes et le mouvement est transmis vers les génératrices via ces derniers. Pour des raisons de rigidité, une paire de câbles bidirectionnels est installée sur chaque aile.

À cause de leur accouplement de nature directe, les machines électriques de tangage et de pilonnement doivent constamment changer de sens de rotation. Ceci amène également comme conséquence qu'il n'est pas possible de ramener la cinématique à 1 degré de liberté.

##### Avantages et inconvénients

- + mécanismes simplifiés avec peu de composantes;
- génératrices doivent constamment changer de sens de rotation;
- efficacité des câbles bidirectionnels faibles;
- efficacité des courroies crantées moyennes;
- impossibilité de coupler les mouvements de pilonnement et de tangage;

- élasticité des éléments de transmission (câbles bidirectionnels, courroies crantées) potentiellement problématique;
- impossibilité de ramener le concept à 1 degré de liberté.

### **5.2.5 Système de conversion à mécanismes parallèles**

Le cinquième concept de solution est le système de conversion à mécanismes parallèles. Ce dernier utilise une configuration similaire à celle employée sur le prototype de table, soit un couplage des mouvements de pilonnement et de tangage via des mécanismes à 4 barres dont la sortie est rapportée à un arbre unique.

#### Fonctionnement

Le mouvement de pilonnement est assuré par un mécanisme à 4 barres. Comme les ailes sont installées sur une des barres du mécanisme, un dimensionnement adéquat permet d'obtenir un pilonnement sinusoïdal pour une génératrice tournant à vitesse constante. L'utilisation de ce dernier permet de situer le mécanisme à 4 barres hors de l'eau, ce qui est intéressant au niveau hydrodynamique.

Le tangage des ailes est également assuré par des mécanismes à 4 barres. L'angle d'entrée de ces derniers est autour du même axe que le mécanisme de pilonnement, ce qui permet de ramener l'ensemble de la puissance à un degré de liberté et conséquemment à une génératrice unique. La sortie des mécanismes à 4 barres est transmise aux ailes via des courroies crantées ou des chaînes comme sur le prototype de table.

#### Avantages et inconvénients

- + ensemble de la puissance ramenée à un arbre unique;
- + grande rigidité au niveau des mécanismes de transmission;
- + possibilité d'installer les composantes électriques hors de l'eau;
- complexité du mécanisme en raison du nombre de membrures.

### **5.2.5 Observations**

On remarque que chacun des cinq systèmes décrits ci-dessus a ses forces et ses faiblesses.

Parmi les cinq systèmes, 2 possèdent des mécanismes où les génératrices doivent constamment changer de sens de rotation pour conférer la cinématique désirée aux ailes. Ces systèmes sont le système d'entraînement par courroies et le système style « MAO » de rivière. Cette caractéristique amène comme conséquence que le système électrique doit être surdimensionné pour pouvoir fournir les couples engendrés par le changement de sens de rotation sur une échelle de temps courte (2 changements de sens de rotation en environ 1 sec). De plus, le changement de sens de rotation élimine la possibilité d'utiliser un volant d'inertie pour aider à l'asservissement du système. Finalement, ces deux systèmes ne peuvent être ramenés à 1 seul degré de liberté, ce qui complexifie d'autant plus l'asservissement. Pour ces raisons, on peut conclure que ces deux systèmes ne sont pas intéressants pour le prototype.

Pour le système de conversion hydromécanique, les génératrices tournent toujours dans le même sens, mais le débit hydraulique doit être asservi de manière à obtenir des trajectoires sinusoïdales. Ceci amène la nécessité d'utiliser des servovalves dont on fera l'asservissement en temps réel, ce qui peut être problématique au niveau de la précision requise et nécessitera fort probablement l'utilisation de composantes surdimensionnées pour pouvoir réagir assez rapidement. De plus, les composantes hydrauliques possèdent une efficacité limitée. En raison de ces facteurs, un système utilisant des vérins hydrauliques pour contrôler à la fois la cinématique et transmettre la puissance extraite a été rejeté pour le prototype de 1 kW.

Pour le système utilisant un mécanisme « scotch-yoke » pour le pilonnement, il est possible d'utiliser un volant d'inertie pour aider à réaliser un asservissement à vitesse constante. De ce point de vue, ce système est très intéressant. Toutefois, la fiabilité et la performance de ce type de mécanisme est inconnue pour l'instant. De plus, des servomoteurs installés tout près des ailes ont été proposés pour actualiser le tangage des ailes. Ces derniers devront constamment changer de sens de rotation et il ne sera pas possible d'utiliser un volant d'inertie pour en faciliter l'asservissement. Finalement, ce système ne peut être ramené à 1 seul degré de liberté. Ainsi, malgré les caractéristiques intéressantes de ce système, cette topologie ne sera pas utilisée pour le prototype de 1 kW.

Finalement, le système utilisant des mécanismes à 4 barres montés en parallèles s'avère très intéressant étant donné qu'il est possible de ramener toute la cinématique à un arbre de sortie unique et en supposant un dimensionnement adéquat, que ce dernier tourne à vitesse constante. Il est donc possible d'utiliser un volant d'inertie et un asservissement en vitesse standard pour contrôler la cinématique du système. L'utilisation de mécanismes à 4 barres permet aussi de localiser les composantes électriques hors de l'eau, ce qui simplifie le montage au niveau de l'étanchéité. Comme il a été mentionné précédemment, ce système possède le désavantage de contenir beaucoup de membrures. Ces dernières sont en mouvement dans l'eau, de telle sorte qu'elles dissipent de l'énergie par frottement visqueux. Toutefois, dans l'ensemble, cette topologie possède des avantages majeurs par rapports aux autres topologies et conséquemment, elle s'avère être le meilleur choix pour le prototype de 1 kW.

Ainsi, il a été déterminé que la topologie de mécanismes la plus adaptée au prototype de 1 kW était l'utilisation de mécanismes à 4 barres en parallèles, ces derniers permettant de ramener les mouvements des deux ailes à 1 degré de liberté à vitesse constante. Toutefois, pour que cela soit possible, un dimensionnement adéquat des mécanismes doit être effectué. La section suivante est consacrée à cette étape.

## **5.3 Dimensionnement des mécanismes à 4 barres**

### **5.3.1 Problématique**

La section précédente a permis de déterminer que la topologie la plus adaptée pour le contrôle cinématique des ailes et la transmission de la puissance extraite était l'utilisation de mécanismes à 4 barres en parallèles dans une configuration à 1 degré de liberté. La prochaine étape consiste donc à déterminer les valeurs des longueurs des bielles des mécanismes à 4 barres qui permettent d'obtenir un mouvement résultant qui se rapproche le plus d'une fonction sinusoïdale pour le pilonnement et le tangage des ailes. Il est à noter que la résolution d'un mécanisme à quatre barres est un problème classique en théorie des mécanismes. D'ailleurs, la résolution de nombreux mécanismes de ce genre a été effectuée par Allen-Demers [15].

La méthodologie qui sera utilisée pour résoudre ce problème consiste donc à :

- 1- établir l'équation de résolution d'un mécanisme à 4 barres quelconque;
- 2- utiliser l'équation trouvée en 1 et la relier au mouvement de pilonnement des ailes;
- 3- établir une fonction d'erreur permettant de comparer le mouvement de pilonnement conféré par un mécanisme aux ailes versus le mouvement théorique, i.e. sinusoïdal;
- 4- utiliser l'équation trouvée en 1 et la relier au mouvement de tangage des ailes;
- 5- établir une fonction d'erreur permettant de comparer le mouvement de tangage conféré par un mécanisme aux ailes versus le mouvement théorique, i.e. sinusoïdal;
- 6- à l'aide d'un algorithme numérique, minimiser les fonctions d'erreurs écrites en 2 et en 4, de manière à obtenir les dimensions de membrures des mécanismes à 4 barres qui permettent de reproduire le plus fidèlement possible la cinématique décrite précédemment.

### 5.3.2 Formulation

#### 1. Résolution d'un mécanisme à 4 barres quelconque

Un schéma de mécanisme à 4 barres dont deux des articulations sont fixes est montré à la Figure 42.

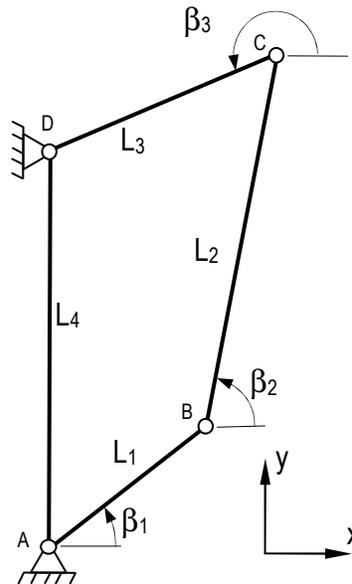


Figure 42 - Mécanisme à 4 barres quelconque

En écrivant l'équation de fermeture de la boucle, nous obtenons en x :

$$L_1 \cos \beta_1 + L_2 \cos \beta_2 + L_3 \cos \beta_3 = 0 \quad (\text{éq. 4})$$

Et en y:

$$L_1 \sin \beta_1 + L_2 \sin \beta_2 + L_3 \sin \beta_3 = L_4 \quad (\text{éq. 5})$$

En isolant le terme en  $\beta_2$  dans chacune des deux équations ci-dessous, en élevant les termes des deux équations au carré et en additionnant membre à membre, on obtient :

$$(L_1 \cos \beta_1 + L_3 \cos \beta_3)^2 + (L_1 \sin \beta_1 + L_3 \sin \beta_3 - L_4)^2 = L_2^2 \quad (\text{éq. 9})$$

En développant l'équation ci-dessus, on obtient:

$$\begin{aligned} L_1^2 + 2L_1L_3 \sin \beta_1 \sin \beta_3 \\ + 2L_1L_3 \cos \beta_1 \cos \beta_3 \\ - 2L_1L_4 \sin \beta_1 + L_3^2 - 2L_3L_4 \sin \beta_3 + L_4^2 = L_2^2 \end{aligned} \quad (\text{éq. 10})$$

Puis, en réorganisant les termes, on peut réécrire l'équation ci-dessus sous la forme suivante:

$$C_1 = A_1 \sin \beta_3 + B_1 \cos \beta_3, \quad \text{Où :} \quad \begin{cases} A_1 = 2L_1L_3 \sin \beta_1 - 2L_3L_4 \\ B_1 = 2L_1L_3 \cos \beta_1 \\ C_1 = L_2^2 - L_4^2 - L_1^2 - L_3^2 \end{cases} \quad (\text{éq. 11})$$

On obtient donc :

$$\sin \beta_3 = \frac{B_1 C_1 - k_1 A_1 \sqrt{\Delta_1}}{A_1^2 + B_1^2} \quad (\text{éq. 12})$$

$$\cos \beta_3 = \frac{A_1 C_1 - k_1 B_1 \sqrt{\Delta_1}}{A_1^2 + B_1^2} \quad (\text{éq. 13})$$

Où  $k_1 = \pm 1$ , selon la branche choisie et  $\Delta_1 = A_1^2 + B_1^2 - C_1^2$ . Avec ce résultat, il est possible de déterminer l'angle de sortie d'un mécanisme à 4 barres ( $\beta_3$ ) en fonction de son angle d'entrée ( $\beta_1$ ). On peut aussi ajouter que l'angle de sortie d'un mécanisme à 4 barres est fonction de la longueur de ses bielles ainsi que du temps ( $\beta_1 = \gamma t$ ) :

$$\beta_3 = f(\beta_1, L_1, L_2, L_3, L_4) \quad (\text{éq. 14})$$

## 2. Établissement de l'équation du mécanisme de pilonnement

Étant donné qu'un mécanisme à 4 barres est utilisé pour contrôler le pilonnement, on peut utiliser le résultat précédent pour prédire la position de pilonnement. Les bielles composants ce mécanisme sont dénommés pL1, pL2, pL3 et pL4. À partir du schéma de la Figure 43, on peut écrire :

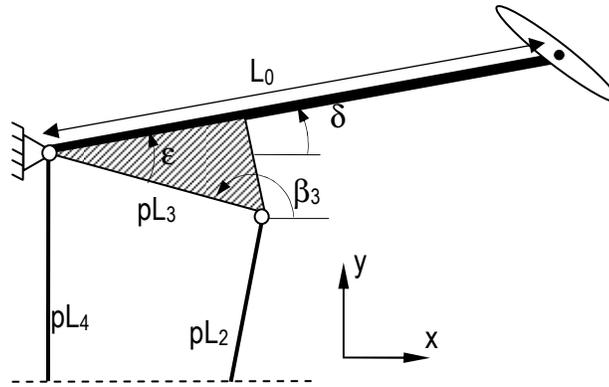


Figure 43 - Mécanisme de pilonnement.

$$\beta_3 + \varepsilon - \delta = \pi \rightarrow \delta = \beta_3 + \varepsilon - \pi \quad (\text{éq. 15})$$

Ainsi, pour une longueur  $L_0$  donnée, la hauteur de pilonnement  $h$  est

$$h = L_0 \sin(\delta) \rightarrow h = f(\beta_1, pL_1, pL_2, pL_3, pL_4, \varepsilon) \quad (\text{éq. 16})$$

Cependant, il est à noter que pour éviter de retrouver plusieurs fois des mécanismes semblables, la longueur  $L_1$  sera toujours définie comme étant unitaire. Les autres dimensions de bielles seront donc exprimées en fonction de  $L_1$ .

La vitesse de pilonnement  $V_y$  est la dérivée de la position  $h$  :

$$V_y = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{h(\beta_1 + \Delta) - h(\beta_1 - \Delta)}{2\Delta} \quad (\text{éq. 17})$$

### 3. Établissement d'une fonction d'erreur pour le mouvement de pilonnement

La fonction d'erreur a pour fonction de comparer le mouvement de pilonnement obtenu avec un mécanisme par rapport au mouvement théorique. Dans notre cas, la vitesse de pilonnement est primordiale puisque cette dernière apparaît directement dans le calcul de l'angle d'attaque effectif. Cependant, étant donné que l'on désire que le mouvement de pilonnement soit symétrique par rapport à l'horizontale dans une application tandem, la position de pilonnement doit également être précise. Il est ainsi possible d'écrire une fonction d'erreur  $E_p$  comme :

$$E_p = \frac{1}{n} \sum \left[ \frac{1}{4} (h_{\text{obtenu}}(t) - h_{\text{théo.}}(t))^2 + \frac{3}{4} (V_{y,\text{obtenu}}(t) - V_{y,\text{théo.}}(t))^2 \right], \forall t \quad (\text{éq. 18})$$

$$\in \left\{ 0, \frac{T}{n}, \frac{2T}{n}, \dots, T \right\}$$

où la position de pilonnement est pondérée avec un poids de 25% et la vitesse de pilonnement est pondérée avec un poids de 75%. On accorde ainsi plus de poids à la vitesse de pilonnement mais en ayant tout de même un souci de l'exactitude du mouvement.

### 4. Établissement de l'équation du mécanisme de tangage

La solution générale pour la sortie d'un mécanisme à 4 barres développée à l'étape no.1 s'applique également au mécanisme de tangage. Cependant, la fonction qui relie la sortie du mécanisme et la position de tangage est différente. Il est à noter que les bielles composant ce mécanisme sont dénommés tL1, tL2, tL3 et tL4. À partir du schéma de la Figure 44, on peut écrire :

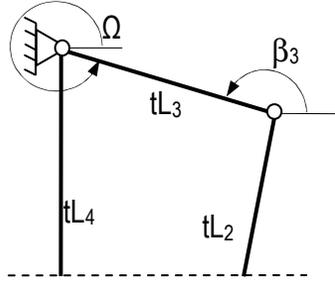


Figure 44 - Mécanisme de tangage.

Ainsi, pour un rapport de multiplication  $n$  situé en aval de  $\Omega$  et un déphasage  $\xi$  entre le mécanisme et les ailes, l'angle de sortie en tangage du mécanisme à 4 barres en tangage vaut :

$$\Omega = \beta_3 - \pi \quad (\text{éq. 19})$$

$$\theta = n\Omega + \xi = n(\beta_3 - \pi) + \xi \rightarrow \theta = f(t, tL_1, tL_2, tL_3, tL_4, n, \xi) \quad (\text{éq. 20})$$

### 5. Établissement d'une fonction d'erreur

La fonction d'erreur compare le mouvement de tangage obtenu avec un mécanisme au mouvement théorique. Dans notre cas, seule la position de tangage est importante puisqu'elle apparaît directement dans le calcul de l'angle d'attaque effectif. Il est ainsi possible d'écrire une fonction d'erreur  $E_t$  comme :

$$E_t = \frac{1}{n} \sum \left[ (\theta_{\text{obtenu}}(t) - \theta_{\text{théo.}}(t))^2 \right], \forall t \in \left\{ 0, \frac{T}{n}, \frac{2T}{n}, \dots, T \right\} \quad (\text{éq. 21})$$

### 6. Minimisation de la fonction d'erreur

Étant donné la complexité des deux fonctions d'erreur  $E_p$  et  $E_t$  qui contiennent respectivement 4 et 5 variables (les bielles  $pL1$  et  $tL1$  ayant des longueurs unitaires) et qui sont non-linéaires, un algorithme d'optimisation numérique a été utilisé : la méthode des gradients conjugués. Cette méthode est très performante mais demande le calcul des

dérivées de la fonction à minimiser en fonction de chacune des variables. Ces dérivées ont été calculées numériquement selon :

$$\frac{\partial E_p}{\partial x_i} = \frac{E_p(x_i + h) - E_p(x_i - h)}{2h}, \text{ où } x_i \text{ est une des variables de } E_p \quad (\text{éq. 22})$$

$$\frac{\partial E_t}{\partial x_i} = \frac{E_t(x_i + h) - E_t(x_i - h)}{2h}, \text{ où } x_i \text{ est une des variables de } E_t \quad (\text{éq. 23})$$

Étant donné que l'équation à minimiser est non-linéaire, la convergence se fait vers un minimum dont il est impossible de savoir s'il est global. Ainsi, la méthode utilisée pour trouver le minimum global a été d'essayer plusieurs combinaisons initiales de variables et de les faire converger vers le minimum le plus près pour trouver le plus petit minimum local. Les différentes combinaisons initiales ont été générées au hasard en respectant les bornes prédéterminées pour les longueurs relatives des bielles.

De plus, de manière à obtenir des mécanismes réalisables en pratique, la longueur relative entre chacune des bielles a été restreinte à un facteur 10. Également, le rapport de multiplication situé à la sortie du mécanisme de tangage a été limité à 4.

### 5.3.3 Résultats

L'utilisation de l'algorithme des gradients conjugués a permis d'identifier les mécanismes à 4 barres les mieux adaptés pour la configuration envisagée. Pour le pilonnement, le mécanisme optimal présente des longueurs de bielles de  $pL1=1$ ,  $pL2 = 6,8$ ,  $pL3 = 2,71$ ,  $pL4 = 7,7$  et  $\varepsilon = 29,9^\circ$ . Ce mécanisme, illustré à la Figure 45, produit la fonction de sortie montrée sur le graphique de la Figure 46 où elle est comparée à la fonction harmonique souhaitée pour un cycle de pilonnement. Sur l'ensemble du cycle, l'écart moyen entre les deux courbes est de 0,027 corde. L'écart maximal est de 0,054 corde et est atteint pour  $t/T = 0,230$ .

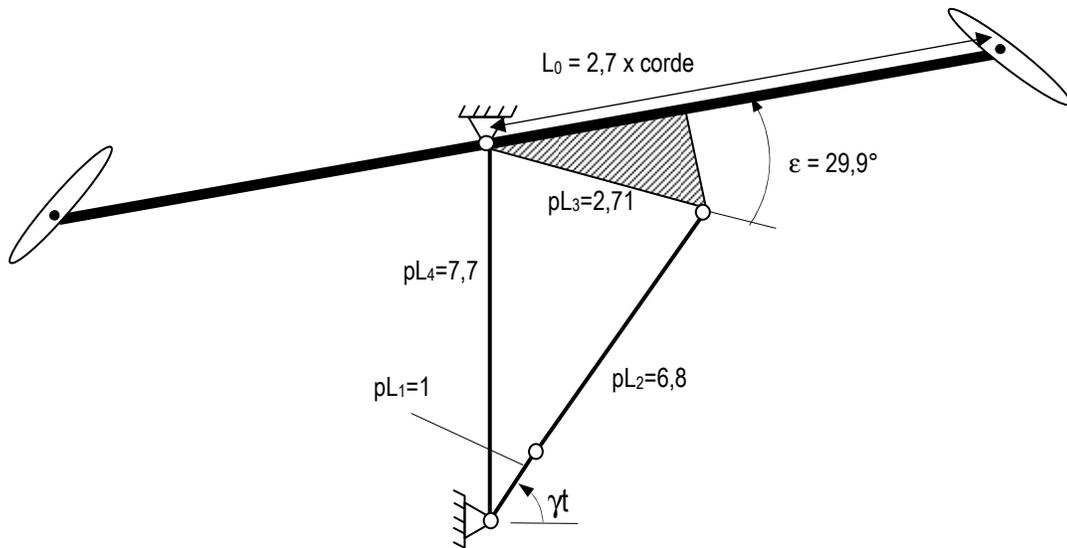


Figure 45 – Mécanisme à 4 barres de pilonnement optimisé

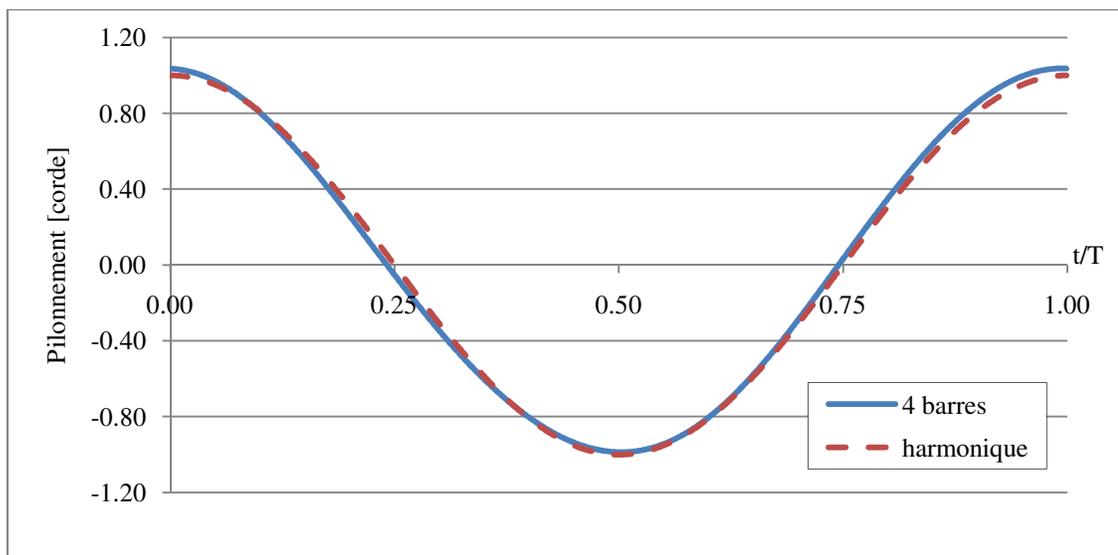


Figure 46 - Comparaison entre la sortie du mécanisme de pilonnement et la trajectoire désirée.

Pour le tangage, le mécanisme optimal (Figure 47) présente les longueurs de bielles suivantes :  $tL_1=1$ ,  $tL_2= 8,85$ ,  $tL_3=3,20$ ,  $tL_4=10,0$  alors que le déphasage entre le mécanisme et l'aile  $\xi$  vaut  $122,61^\circ$  et le rapport de multiplication  $n$  à la sortie du mécanisme vaut 4,00. On peut remarquer que contrairement au mécanisme de pilonnement, pour le mécanisme de tangage, deux des cinq paramètres d'optimisation ont atteint le seuil maximal qui avait été fixé, soit  $tL_4$  et  $n$ . On en déduit que l'augmentation de ces seuils permettrait fort probablement d'obtenir un mécanisme plus performant. Toutefois, dans la

pratique, on désire conserver un mécanisme ayant des longueurs de bielles du même ordre de grandeur pour des raisons de précision. De plus, il pourrait être difficile d'obtenir un rapport de multiplication supérieur à 4 pour une transmission à un étage par courroie ou par chaîne. Pour ces raisons, et étant donné que le mécanisme obtenu est raisonnablement précis, il a été conservé. Le graphique de la Figure 48 montre la trajectoire obtenue avec ce mécanisme en comparaison la fonction harmonique visée. En moyenne, l'écart entre les deux courbes est de  $0,92^\circ$  et l'écart maximal vaut  $2,16^\circ$ , ce dernier étant atteint pour  $t/T=0,428$ .

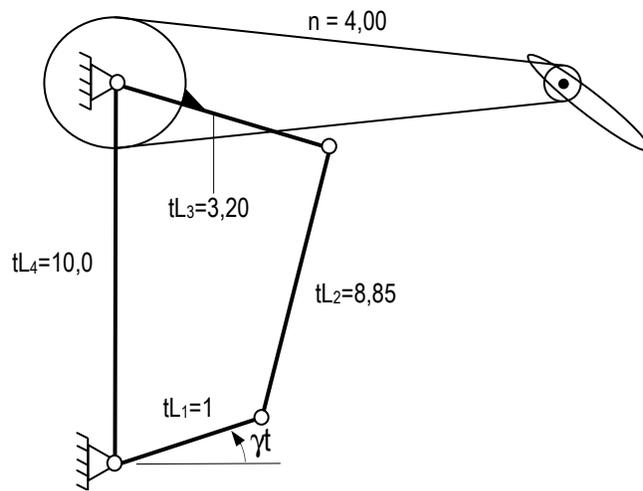


Figure 47 – Mécanisme à 4 barres de tangage optimisé

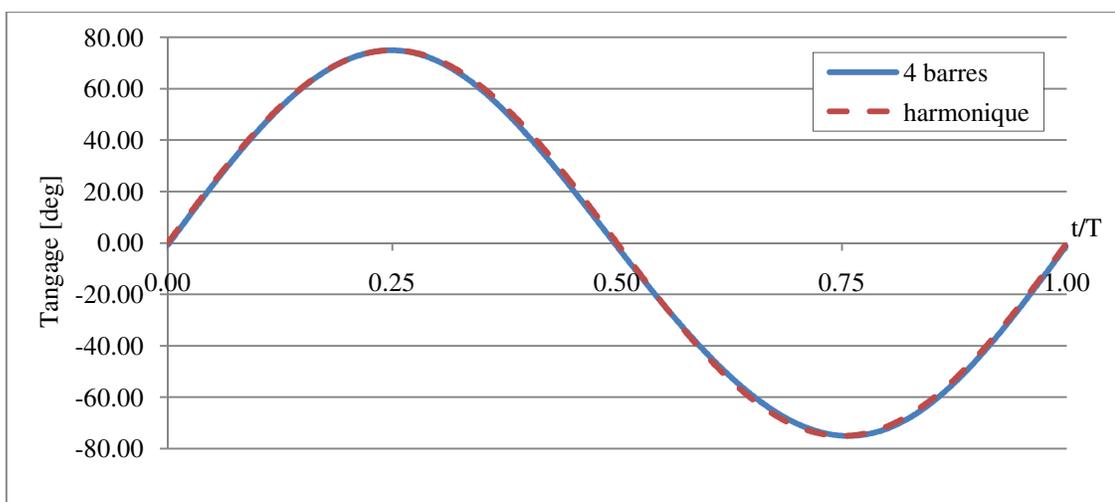
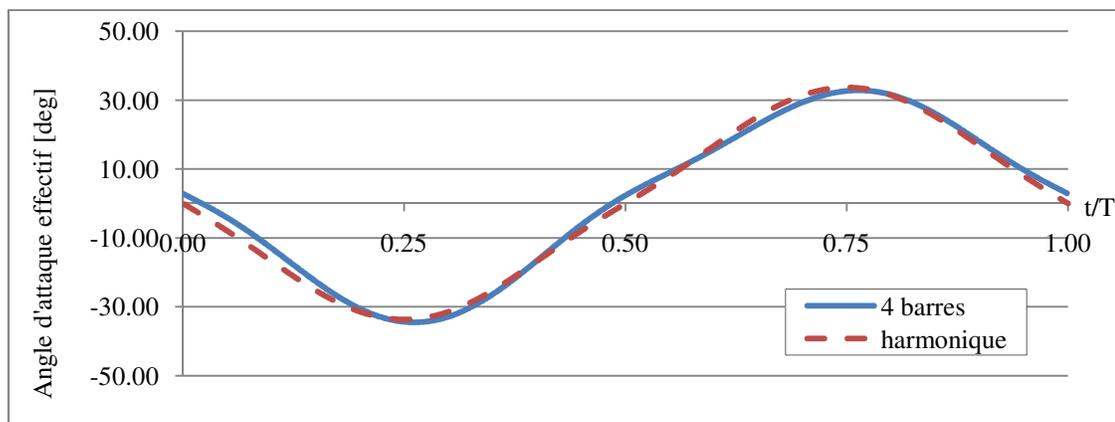


Figure 48 - Comparaison entre la sortie du mécanisme de tangage et la trajectoire désirée.

Les graphiques précédents montrent que les mécanismes obtenus permettent de reproduire assez bien les fonctions harmoniques visées. Toutefois, on peut se demander si les écarts entre les fonctions obtenues et celles visées sont significatives sur les performances de l'hydrogénérateur. Pour répondre à cela, on peut d'abord observer l'angle d'attaque effectif résultant des trajectoires des mécanismes. Le graphique de la Figure 49 montre l'angle d'attaque effectif obtenu avec les mécanismes en comparaison avec celui obtenu avec les fonctions de mouvements harmoniques pour un cycle complet, pour un cas dimensionnel à la fréquence optimale, soit pour  $f^*=0,14$ .



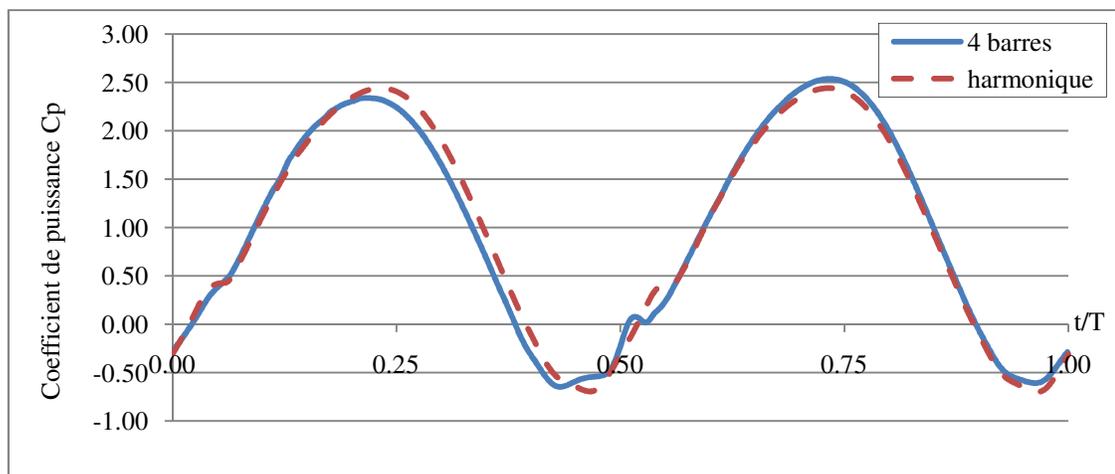
**Figure 49 - Comparaison entre l'angle d'attaque effectif obtenu avec les mécanismes et avec les fonctions harmoniques visées.**

Sur ce graphique, on remarque que la combinaison du pilonnement et du tangage amplifie les déviations causées par l'imprécision des mécanismes. L'écart maximal entre les deux courbes est d'environ  $4,0^\circ$ .

À l'aide des outils numériques développés par Kinsey & Dumas (2008), il a été possible de simuler une aile oscillante qui évolue selon ces trajectoires dans un cas comparatif 2d laminaire. La Figure 50 montre la comparaison entre les courbes de puissance obtenues pour les fonctions propres aux mécanismes et les fonctions harmoniques souhaitées.

Sur le graphique de la Figure 50, on peut remarquer que pendant certaines parties du cycle, les fonctions harmoniques entraînent des coefficients de puissance plus élevés qu'avec les

mécanismes et que le contraire se produit également dans d'autres portions du cycle. Dans l'ensemble, la simulation numérique a démontré que tandis que les fonctions harmoniques permettaient d'obtenir une efficacité d'extraction d'énergie de 38,7%, la même aile oscillant selon les fonctions obtenues avec les mécanismes à 4 barres décrits ci-dessus permet d'obtenir une efficacité d'extraction d'énergie de 38,4%, ce qui représente une baisse de 0.3% par rapport au cas comparatif. Comme cette baisse est faible, il a été conclu que les mécanismes trouvés étaient satisfaisants et reproduisaient fidèlement la cinématique souhaitée.



**Figure 50 - Comparaison des courbes de puissance obtenues avec les mécanismes à 4 barres et avec les fonctions harmoniques pour le cas avec 1 aile 2d et dans un écoulement laminaire.**

# Chapitre 6

## Conception de l'hydrolienne

### 6.1 Problématique

Le chapitre précédent a permis de déterminer que la topologie de mécanisme la mieux adaptée pour l'hydrolienne était d'utiliser des mécanismes à 4 barres. De plus, un dimensionnement optimal a également été identifié, de telle sorte que tous les éléments relatifs au contrôle cinématique et à la transmission de la puissance extraite des ailes oscillantes étaient déterminés pour effectuer la conception de l'hydrolienne.

Toutefois, en plus du cahier des charges présenté dans le premier chapitre, d'autres éléments techniques par rapport au design ont aussi dues ajoutées pour assurer le bon fonctionnement du montage. Voici une énumération de ces derniers :

- les éléments électriques devaient se situer hors de l'eau pour des raisons d'étanchéité. Ainsi, le moteur, le contrôleur, le bus de batterie et toute l'électronique associée seront au sec, dans l'embarcation;
- les ailes devaient osciller à une profondeur suffisante pour réduire les effets de surface libre. Un calcul réalisé au LMFN a permis d'identifier qu'une profondeur de 2 m était adéquate. Considérant ceci, un mécanisme permettant de descendre la

turbine sous l'embarcation et de la remonter pour les opérations près de la rive a été intégré au design. Ce mécanisme de levage devait aussi être opérable par une seule personne, de manière à réduire la quantité de main d'œuvre nécessaire à l'opération de l'hydrolienne;

- comme le montage devait être utilisé à l'extérieur, l'ensemble du mécanisme devait être conçu pour résister à la corrosion, au minimum pour le temps des essais. Pour les pièces où cela était possible, l'aluminium a été utilisé en priorité. Pour les pièces en acier, même si la rouille de surface n'altère pas les propriétés mécaniques à court terme, de la peinture antirouille a été utilisée pour conserver l'esthétisme du montage. De plus, chaque roulement fonctionnant sous l'eau devait être en acier inoxydable pour ne pas que ses performances se dégradent au fil des essais. Les roulements à l'air libre furent choisis en acier standard pour des raisons de coûts;
- la génératrice électrique utilisée pour générer l'électricité est un moteur à courant continu Baldor CDP-3605. Comme cette composante était déjà en main, la chaîne de transmission de l'hydrolienne a dû s'y adapter. De plus, comme cette machine électrique possède une vitesse d'opération nominale de 1750 rpm et que le point nominal d'opération de l'hydrolienne est à 70 rpm, une boîte d'engrenage devait obligatoirement être utilisée. Un rapport de transmission de 20 a permis d'amener l'arbre tournant à haute vitesse à 1400 rpm, ce qui laissait une marge de manœuvre de 350 rpm au cas où il y aurait survitesse au niveau de la turbine;
- en raison de l'utilisation de mécanismes à 4 barres dont les axes sont en mouvement, l'hydrolienne allait présenter une inertie variable. Pour atténuer cet aspect et pour faciliter l'asservissement en vitesse, un volant d'inertie a été utilisé sur l'arbre tournant à haute vitesse. Ce dernier possède une inertie de  $1.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ;
- un appareil de mesure pour le couple (couplemètre modèle BLH Type A-12) et un appareil de mesure de vitesse de rotation (AMCI H25-FS-R5B) sur l'arbre basse

vitesse de l'hydrolienne devaient être inclus au design, de manière à pouvoir calculer la puissance instantanée en amont de la boîte d'engrenage.

- l'hydrolienne devait s'adapter à l'embarcation décrite dans le chapitre 4. De plus, la structure de l'hydrolienne devait permettre de transférer les efforts générés par cette dernière à la structure de l'embarcation, préférentiellement le long des flotteurs, ces éléments étant conçus pour reprendre les efforts de la turbine.

Il est à noter que tout au long du processus de conception, le dimensionnement de toutes les composantes a été rigoureusement validé à l'aide d'outils d'analyse mécanique tel que l'analyse de structure par éléments finis, l'analyse modale et le calcul de contraintes par la théorie de la résistance des matériaux.

## **6.2 Description du montage**

L'hydrolienne, dans son design initial, est présentée à la Figure 51. Cet assemblage comprend la base en « H » (1), le monte-charge (2), le châssis (3), quatre câbles d'acier (4), le montage oscillant (5), quatre liens vilebrequin – montage oscillant (6), le vilebrequin (7) et l'ensemble de conversion (8).

En position abaissée, l'ensemble présenté à la Figure 51 possède des dimensions hors-tout d'environ 2,4 m x 3,60 m x 8,1 m de haut, dont 5,4 m surplombant le dessus de l'embarcation. Cet ensemble possède une masse de 500 kg.

Dans cette configuration, l'hydrolienne était prête à être installée sur l'embarcation décrite au chapitre 4. La Figure 52 montre un schéma CAO de l'hydrolienne installée sur l'embarcation motorisée.

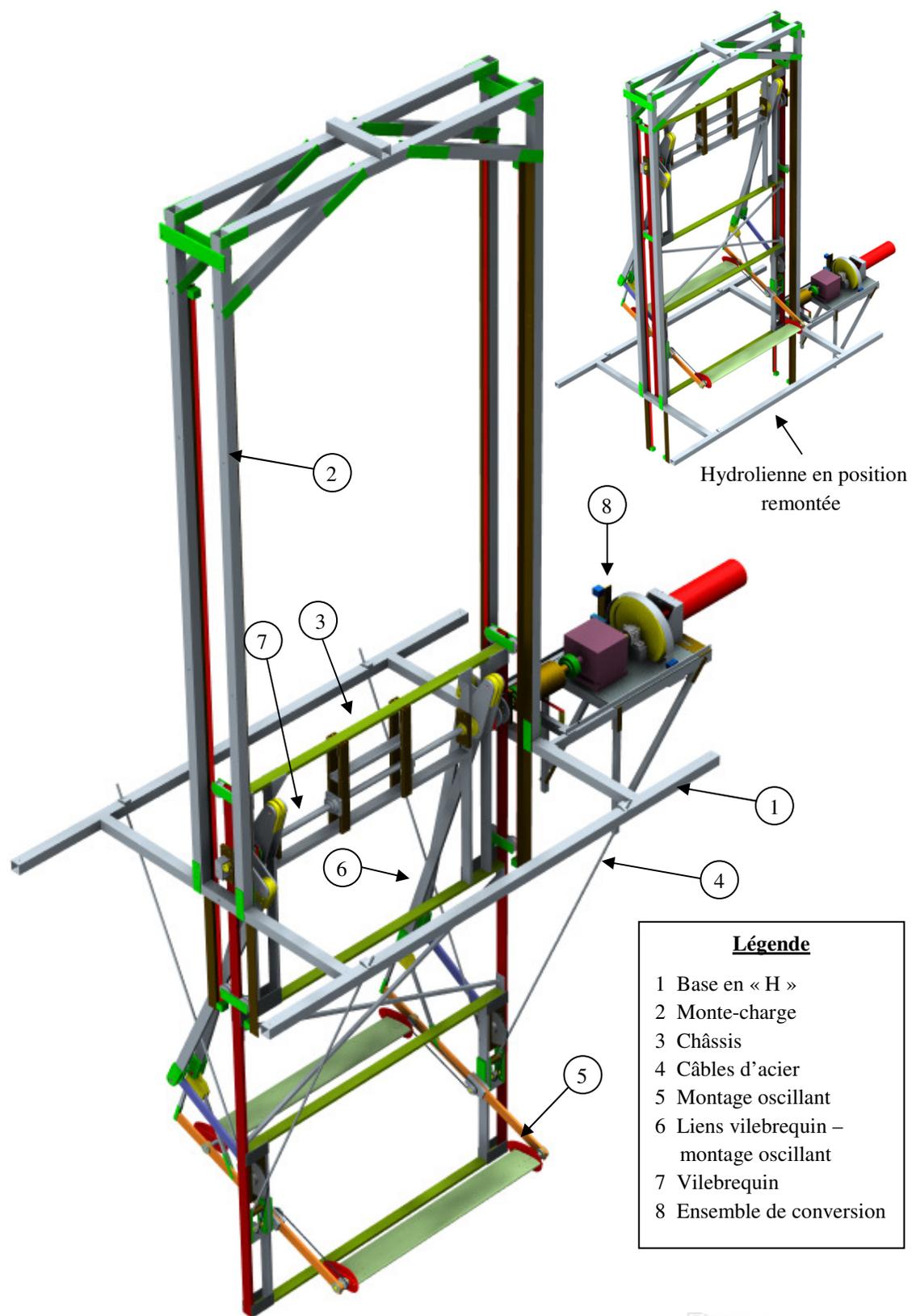
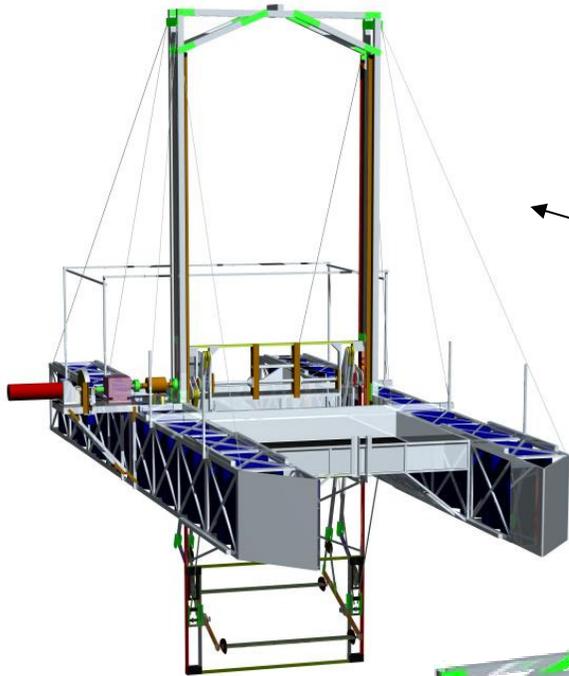
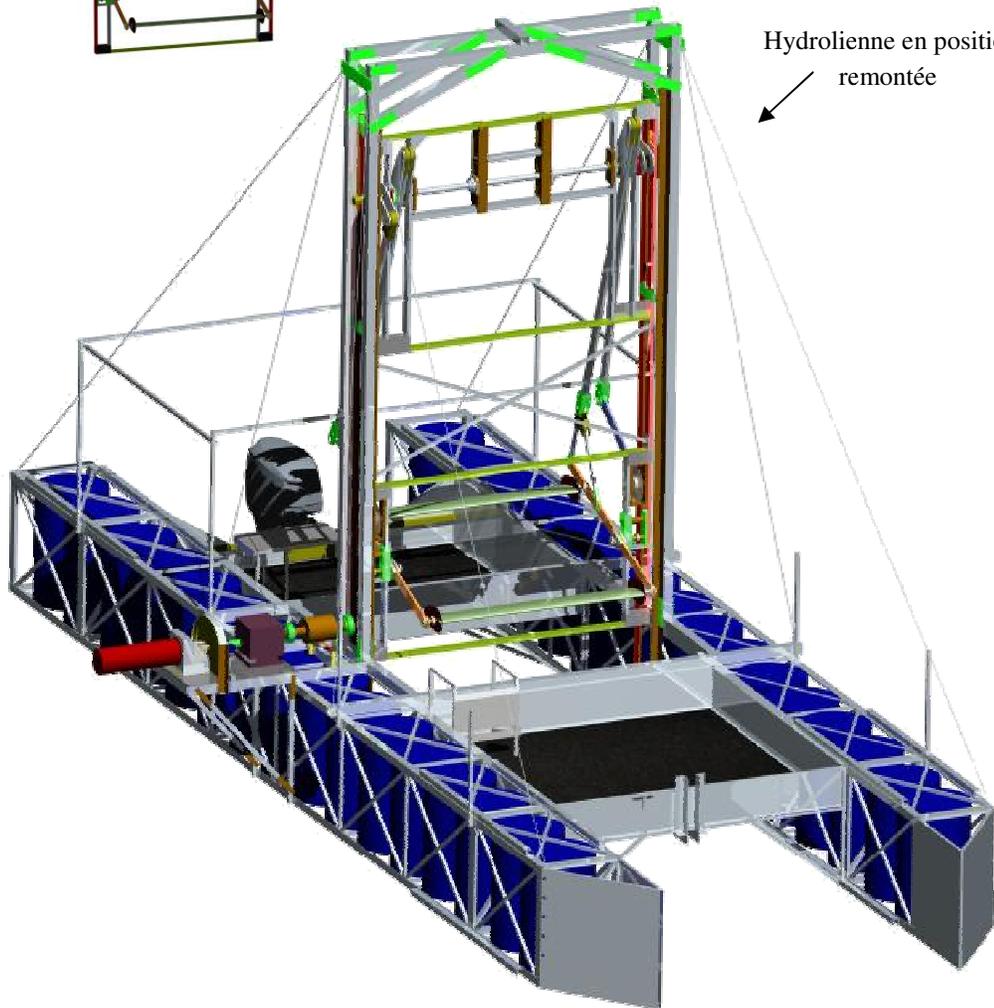


Figure 51 – Hydrolienne en position abaissée.



Hydrolienne en position abaissée



Hydrolienne en position remontée

### 6.2.1 Base en « H »

Une fois fixée à l'embarcation, la base en « H » est la sous-composante permettant de fournir un support rigide à l'hydrolienne. La Figure 53 montre cette composante.

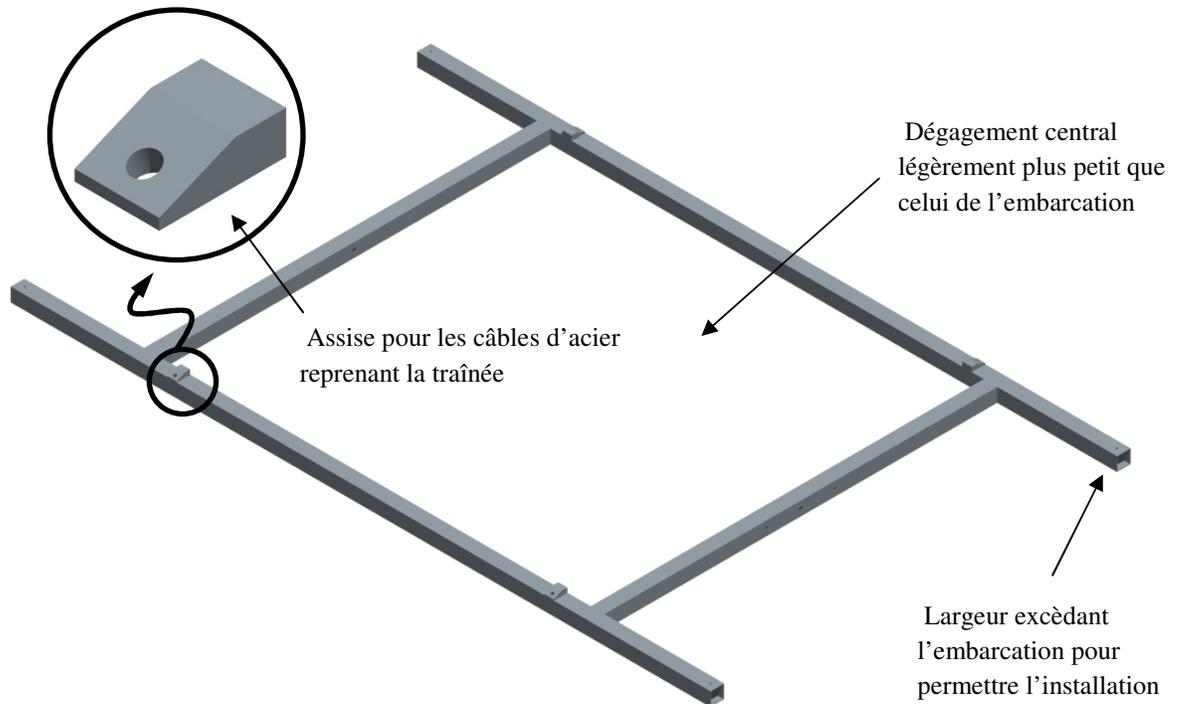
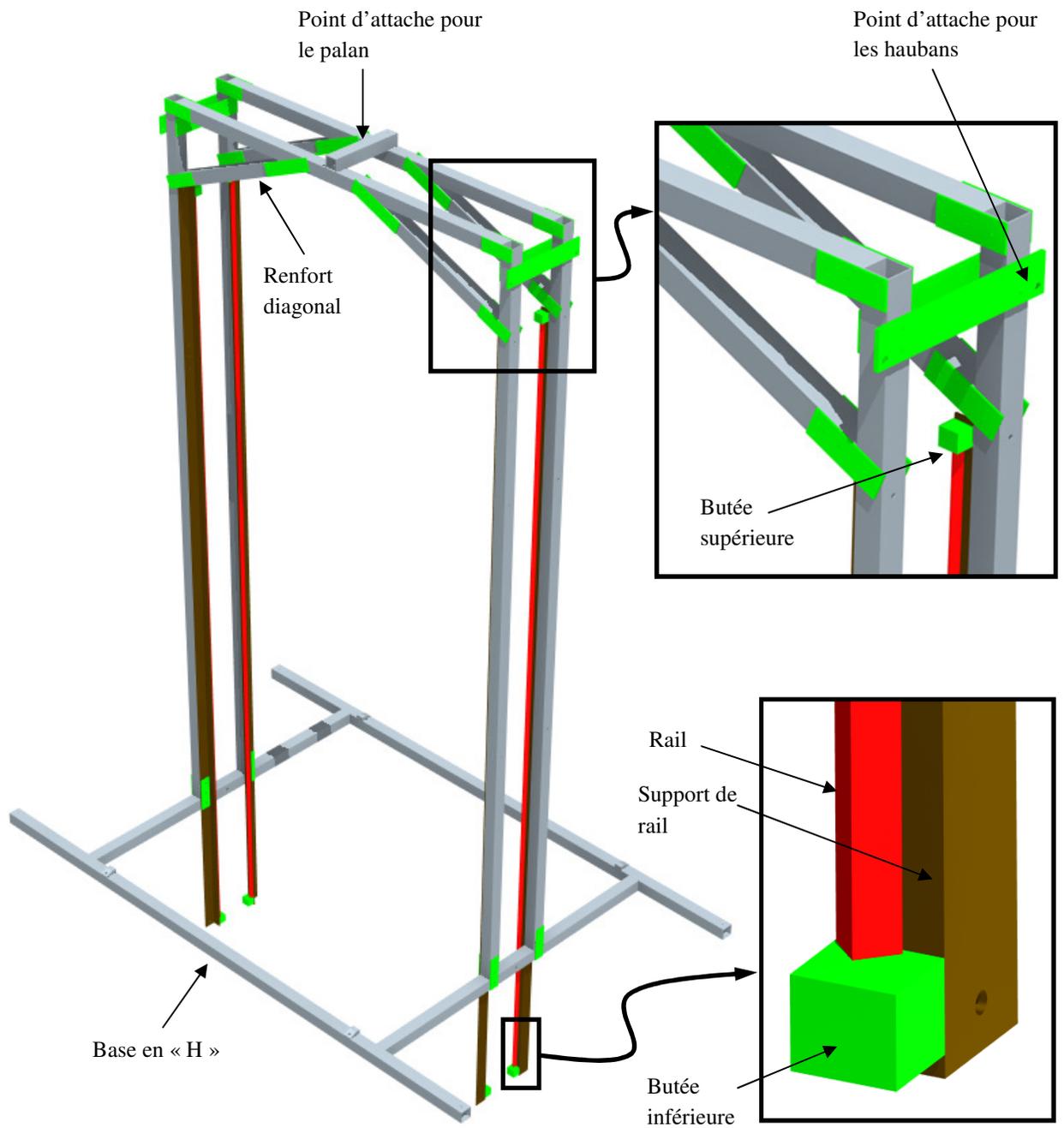


Figure 53 - Base en "H".

Le dégagement central de la base en « H » est de dimension légèrement inférieure au dégagement central qu'on retrouve au centre de l'embarcation. En largeur, elle excède légèrement de chaque côté de l'embarcation pour permettre sa fixation à celle-ci. Elle comprend également quatre assises en acier soudées pour permettre de fixer les câbles d'acier montrés à la figure précédente. Ces dernières possèdent une inclinaison qui assure un support perpendiculaire aux câbles.

### 6.2.2 Monte-charge

Le monte-charge permet de monter l'hydrolienne au-dessus de l'embarcation pour les opérations près de la rive et de la descendre sous l'embarcation pour les essais. Ce dernier possède des dimensions hors-tout de 2,40 m par 0,45 m par 4,8 m de hauteur. La Figure 54 montre le monte-charge installé sur la base en « H ».



**Figure 54 - Monte-charge.**

Le monte-charge est formé d'une structure en tube d'aluminium sur laquelle sont installés les 4 rails, ces derniers servant à guider l'hydrolienne dans sa montée / descente. Un palan à chaîne est utilisé pour manipuler la turbine, son point d'attache étant identifié sur la Figure 54. Des butées de fin de course sont utilisées pour éviter que l'hydrolienne ne sorte des rails.

La structure du monte-charge comprend également des renforts diagonaux dans le haut pour rigidifier l'ensemble dans la direction transversale à l'embarcation. Pour la direction longitudinale, 8 câbles d'acier sont utilisés pour stabiliser la structure. Quatre de ces derniers s'attachent aux coins de la base en « H » tandis que les autres se fixent aux coins de l'embarcation.

### **6.2.3 Châssis**

Le châssis est l'interface rigide qui permet de supporter les mécanismes de l'hydrolienne et les membrures faisant bouger les ailes. Ce dernier est dimensionné de manière à ce que les ailes débattent à environ 2 m sous la surface tout en gardant la chaîne de conversion électromécanique hors de l'eau. Le châssis est montré à la Figure 55.

Pour les tubes du châssis, l'acier a été préféré à l'aluminium en raison de sa plus grande rigidité. Les dimensions extérieures du châssis sont d'environ 4,2 m de haut par 2,4 m de large. Il a été conçu de manière à posséder une fenêtre de dégagement pour les ailes. Cette dernière est plus large que les ailes (1,95 m de largeur vs 1,65 m de largeur pour les ailes) et également plus haute (environ 1,35 m de hauteur vs un débattement vertical total des ailes d'environ 0,56 m), ce qui permet d'éviter que le sillage ne viennent trop influencer l'aile arrière.

Il comprend également quatre chariots à roulettes permettant le guidage de l'ensemble lors des opérations de montée/descente réalisées avec le monte-charge. Ainsi, les roulettes en « V » (8 au total) roulent sur les rails décrits à la section précédente et le contact entre les chariots et les butées indiquent les fins de course.

Dans le haut du châssis se retrouve l'axe du vilebrequin qui constitue l'axe tournant à vitesse constante entraîné par les mécanismes à 4 barres. Dans le bas, on retrouve l'axe de rotation des bielles de pilonnement autour duquel évolue le montage oscillant. La distance entre ces deux axes est d'environ 2,70 m. Ces deux axes de rotation possèdent des roulements qui permettent une rotation avec un minimum de frottement.

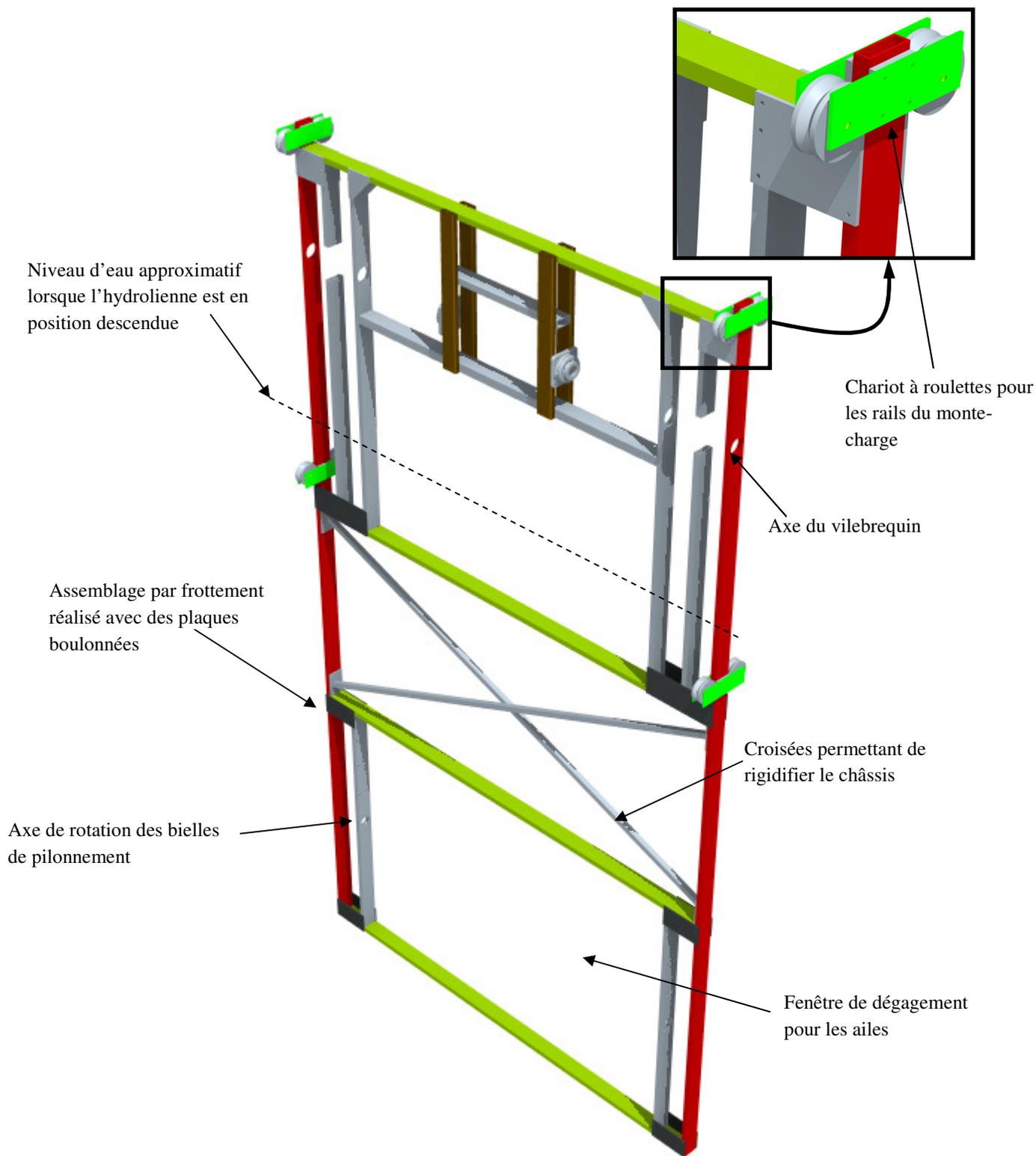


Figure 55 – Châssis.

### 6.2.4 Roulements – Axe du vilebrequin

Pour des raisons de rigidité, le vilebrequin est supporté en rotation par 8 roulements à billes, lesquels sont montrés en détails à la Figure 56. Pour permettre l'alignement commun

de tous les roulements, ces derniers ont été montés dans des logements fixés avec des boulons passant dans des trous de passage surdimensionnés de 1,58 mm (1/16 po). Les roulements utilisés sur cet axe sont tous en acier chromé.

De chaque côté du châssis, on retrouve 3 roulements permettant de supporter les efforts transmis par les cames de tangage et de pilonnement. Pour chacun de ces roulements, un logement a été usiné dans un bloc d'aluminium de 2,54 cm d'épais. Toutefois, un design de logement plus compact a été utilisé pour les roulements SKF 6814 en raison de limitation quant au dégagement disponible. Ces roulements sont contraints en translation dans la direction axiale par un épaulement et un anneau élastique. Finalement, un ajustement glissant a été utilisé pour les roulements dans leur logement, de manière à permettre un remplacement plus rapide.

Il est aussi important de noter qu'à l'extrémité à laquelle se trouve la chaîne de conversion électromécanique, un roulement SKF QJ214 à quatre points de contacts à été utilisé pour reprendre les efforts axiaux qui auraient pu se propager jusqu'au couplemètre. De plus, à l'autre extrémité, la portée a été modifiée de manière à recevoir un capteur de position angulaire (voir Figure 56 à la page suivante).

Au centre du châssis, au même niveau, on retrouve deux paliers à semelle complet permettant de soutenir l'arbre central du vilebrequin. Ces derniers portent le numéro de modèle SKF 6111.

### **6.2.5 Cage inférieure et cage supérieure**

Dans la région du montage oscillant, tel que montré à la Figure 57, on retrouve deux cages de chaque côté qui sont boulonnées au châssis, soient la cage supérieure et la cage inférieure. Ces dernières viennent s'insérer entre les côtés du châssis et la fenêtre de dégagement des ailes.

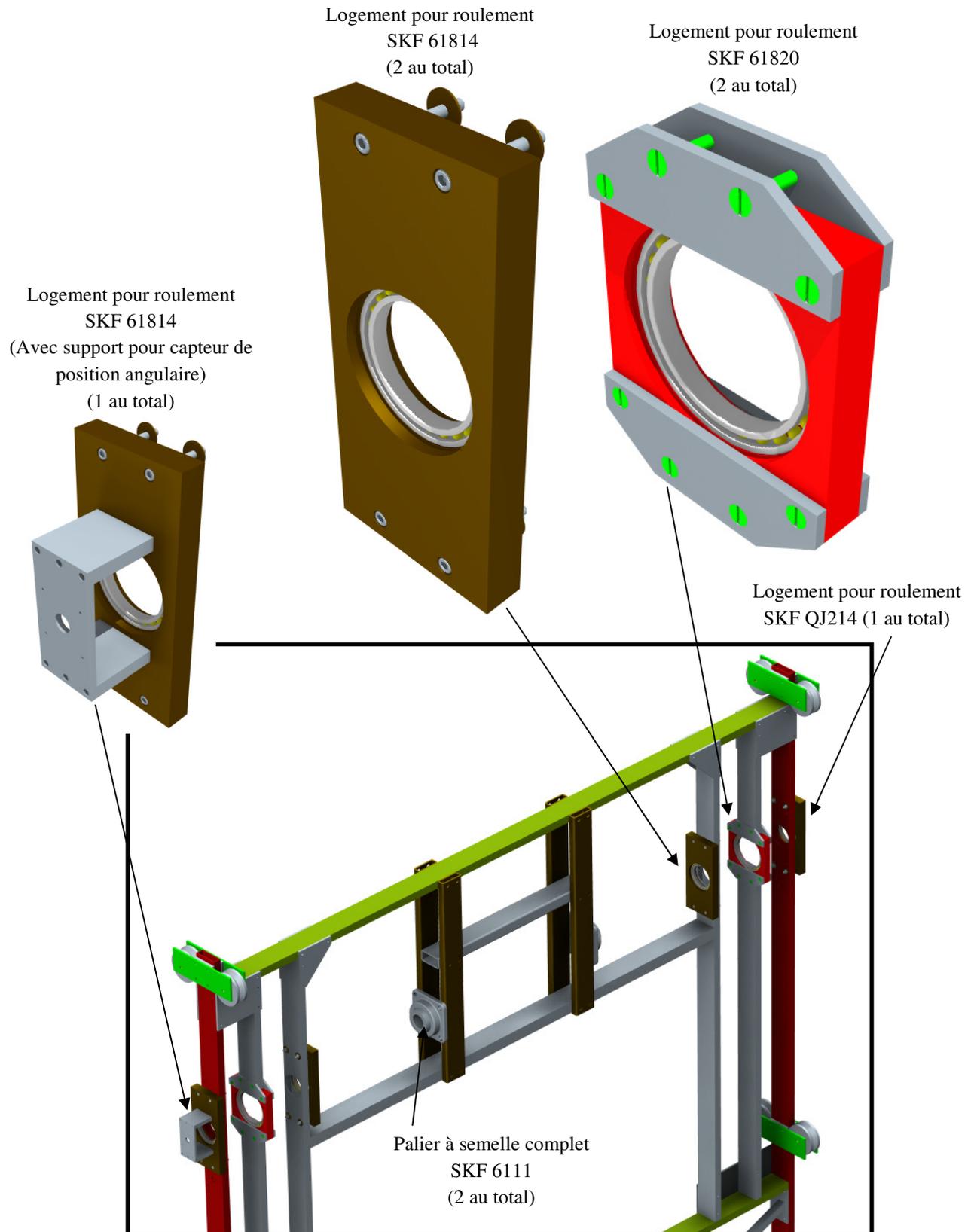
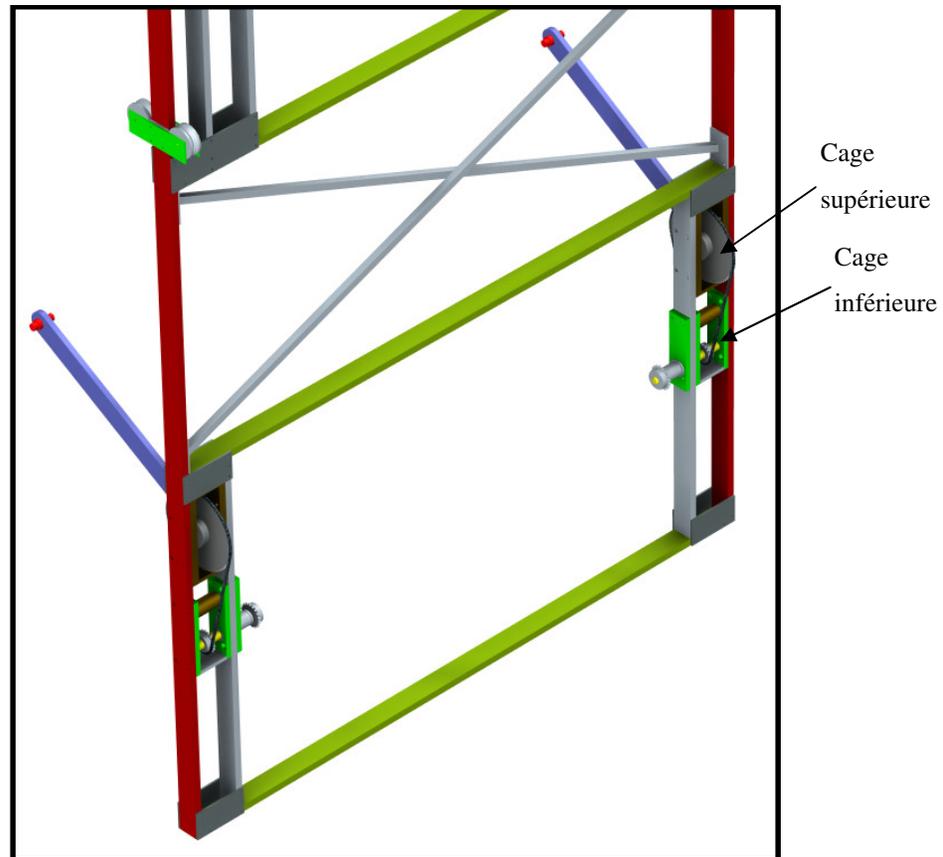


Figure 56 - Roulements utilisés pour le vilebrequin.

Les cages ont été construites de manière similaire en ce sens qu'elles sont assemblées avec des goupilles de positionnement et que conséquemment leur précision ne dépend pas de celle du châssis qui, on le rappelle, est assemblé avec des boulons. Cette façon de faire permet d'assurer que les arbres traversant la cage auront leurs roulements le mieux aligné possible.



**Figure 57 - Localisation des cages supérieures et inférieures.**

La cage supérieure a comme fonction de transmettre le mouvement de la bielle L2 du mécanisme de tangage à une chaîne pour l'acheminer aux ailes. Des détails de cette composante sont montrés à la Figure 58. Chaque cage supérieure contrôle le tangage d'une aile. Elle est composée d'une boîte extérieure, d'une roue dentée de 72 dents pour chaîne ANSI 40 en acier durci, d'un espaceur de 6,35 cm (1/4 po) en aluminium, d'une bielle tL2 de tangage faite à partir d'une barre d'aluminium de 7,62 cm (3 po) x 19.05 mm (3/4 po),

d'un arbre d'aluminium traversant la cage et d'un arbre en aluminium permettant de relier les bielles tL2 et tL3 du mécanisme de tangage.

L'arbre traversant la cage est monté sur roulements en acier inoxydable, à chaque extrémité. La roue dentée, l'espaceur et la bielle tL2 sont reliés ensemble par deux goupilles de positionnement et deux boulons. Les goupilles servent à contraindre les trois pièces en rotation avec un jeu minimal tandis que les boulons empêchent que les pièces ne se séparent dans la direction axiale. Un épaulement et un collet pour arbre permettent de localiser ces trois pièces sur l'arbre.

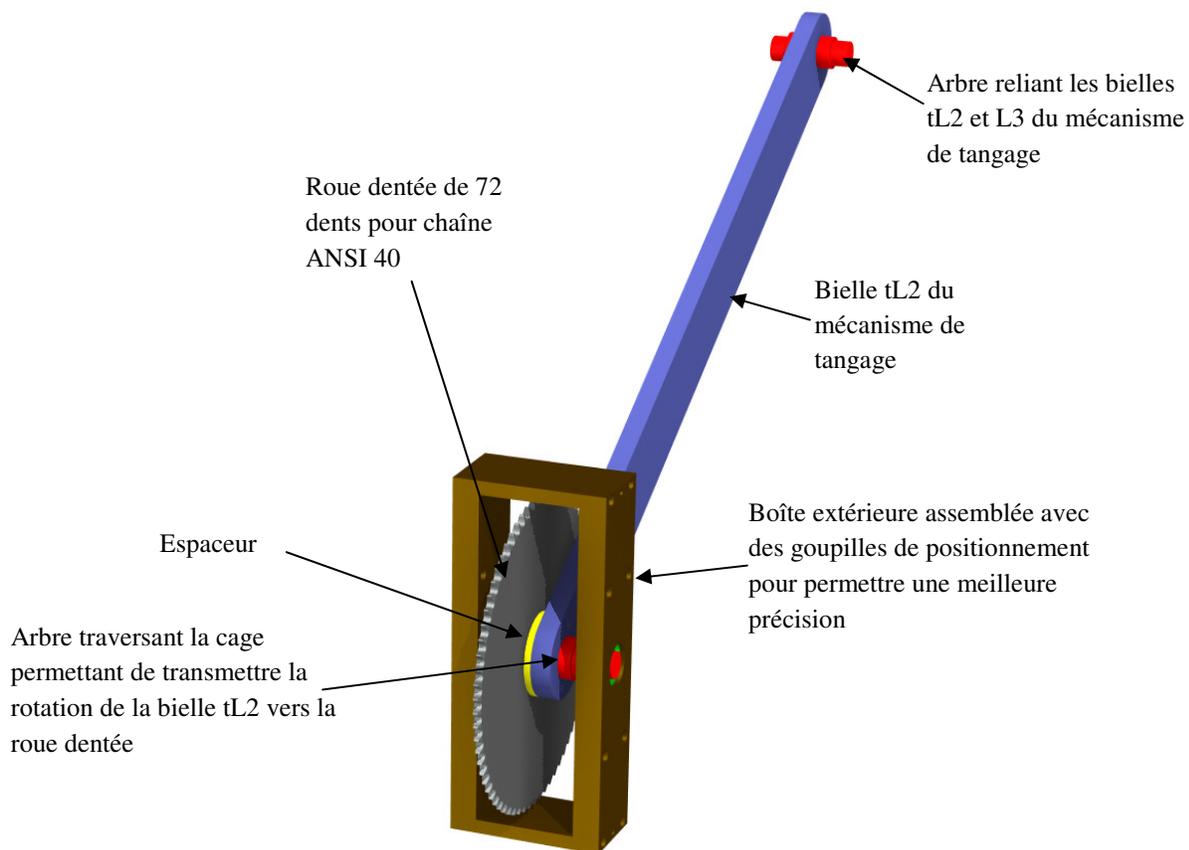
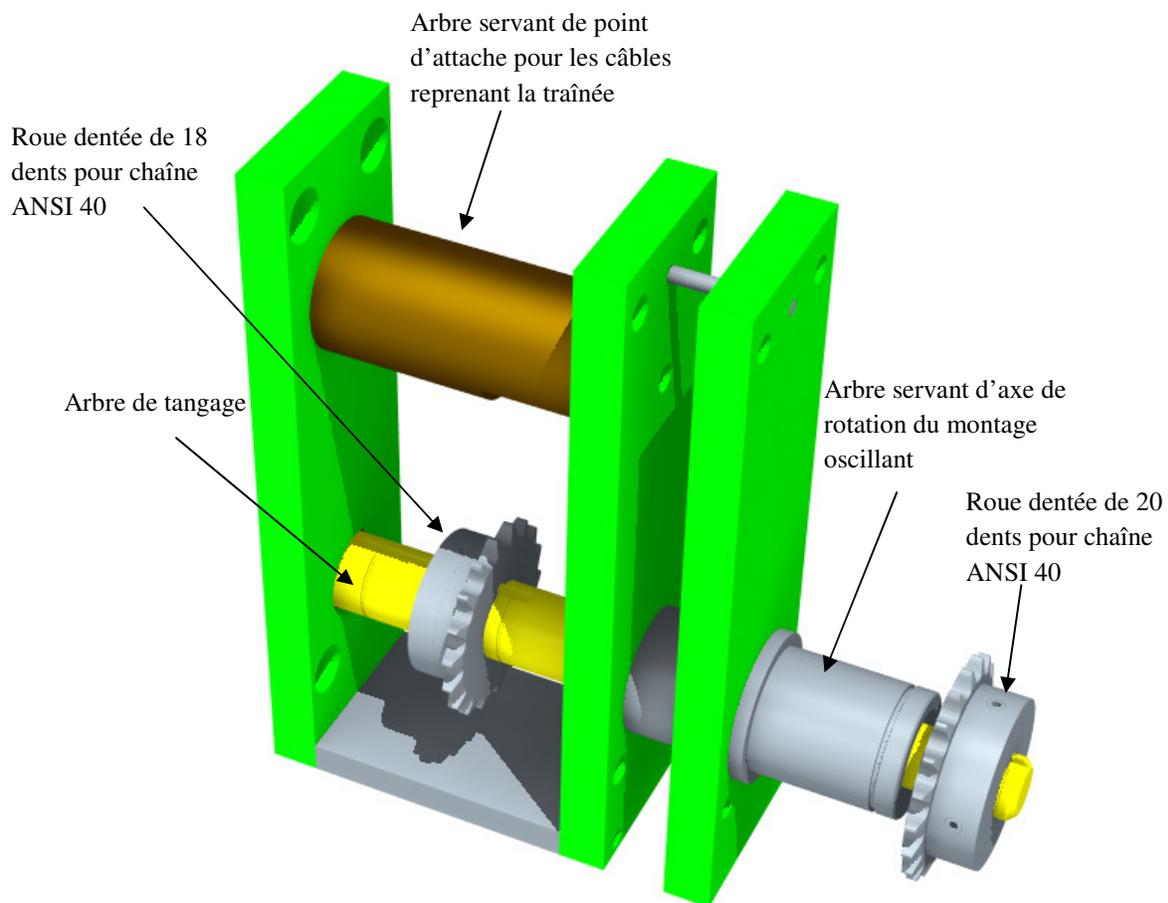


Figure 58 - Détails de la cage supérieure.

L'arbre permettant de relier les bielles tL2 et tL3 du mécanisme de tangage est assemblé par interférence dans la bielle tL2 du mécanisme de tangage. Afin d'obtenir un assemblage le plus serré possible, une interférence de 0,1 mm (0,004 po) a été rendu possible grâce à l'utilisation d'azote liquide pour refroidir l'arbre avant de l'insérer dans la bielle tL2.

La cage inférieure a comme fonction de servir de points d'attache pour les câbles d'acier reprenant la traînée, de transmettre le mouvement de tangage de la cage supérieure vers les ailes et de servir d'axe de rotation pour le montage oscillant. On peut voir les détails de cette composante à la Figure 59.

La cage inférieure encastre un arbre servant de point d'attache pour les câbles reprenant la traînée, tel que montré dans la Figure 59. Cet arbre possède d'ailleurs des plats qui fournissent un appui perpendiculaire aux câbles.



**Figure 59 - Détails de la cage inférieure.**

Elle est traversée en entier par l'arbre de tangage, lequel est supporté à ses deux extrémités par des roulements en acier inoxydable SKF 6805. Ce dernier passe au centre de l'arbre servant d'axe de rotation du montage oscillant pour transmettre le tangage provenant de la

roue dentée de 72 dents de la cage supérieure vers les ailes via un rapport de transmission de 4 :1. Le rapport de transmission entre la roue dentée du bout de l'arbre de tangage et la roue dentée sur l'aile est de 1 :1. Puisque ces chaînes n'effectuent jamais de rotation complète, des tendeurs servant habituellement pour les câbles ont été utilisés, de telle sorte qu'un ajustement infinitésimal est possible entre le mécanisme de tangage et les ailes. L'arbre de tangage est réalisé à partir d'aluminium 7075-T651 pour des raisons de résistance mécanique.

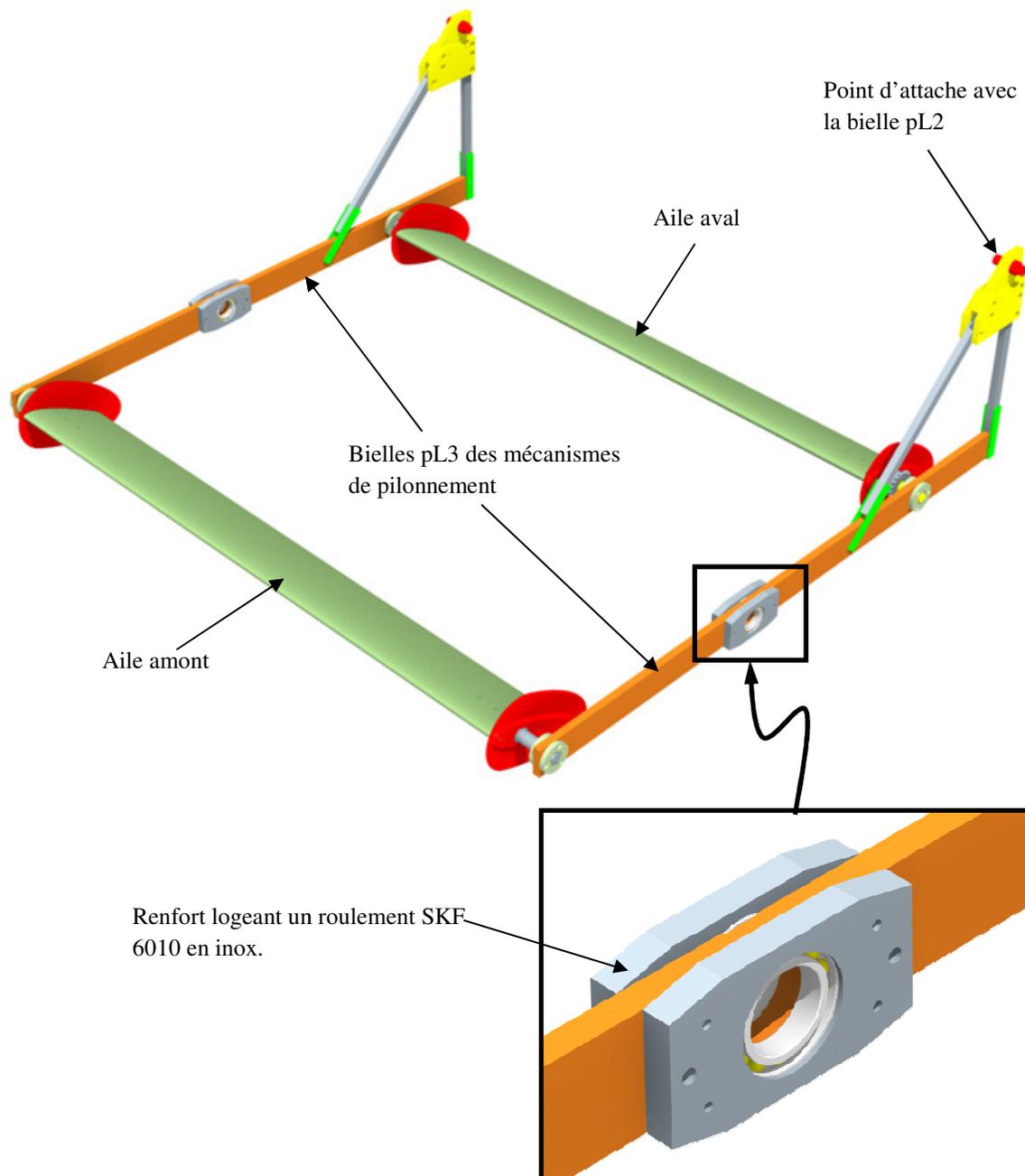
La cage inférieure possède aussi un arbre servant d'axe de rotation pour le montage oscillant. Le montage oscillant y est contraint transversalement avec un épaulement d'un côté et un anneau élastique de l'autre.

#### **6.2.6 Montage oscillant**

Le montage oscillant est un assemblage composé des deux bielles pL3 des mécanismes de pilonnement et des deux ailes. Ce dernier est montré à la Figure 57.

Il repose sur les arbres prévus à cette fin sur les cages inférieures situées de chaque côté du châssis. Il se connecte aux liens montage oscillant – vilebrequins montrés dans Figure 62, de manière à compléter les mécanismes cinématiques.

Les bielles pL3 des mécanismes de pilonnement servent essentiellement à faire pilonner les ailes. Ceci est rendu possible grâce à la rotation au centre, ce qui confère un mouvement de translation suivant un arc aux ailes. Les détails de cette composante sont montrés à la Figure 60.



**Figure 60 - Composantes du montage oscillant.**

Les ailes, quant à elles, ont été réalisées à partir d'une barre d'aluminium 6061-T6 de 25,4 cm par 7,62 cm d'épais sur une fraiseuse à commande numérique, selon un profil NACA 0015. Ces dernières mesurent un peu plus de 1.64 m de long et ont une corde de 24 cm. Des détails sont montrés à la Figure 61.

À chaque extrémité, on retrouve une plaque de bout d'aile qui encastré l'aile. Ces dernières ont pour fonction de réduire la perte de portance causée par les tourbillons de bout d'aile. On retrouve également un arbre d'aluminium 7075-T651 sur lequel sont installés deux roulements SKF 6905 en acier inoxydable logés dans des plaques circulaires, aussi en aluminium. Cette configuration permet de fixer l'aile aux bielles pL3 de pilonnement. Finalement, un des côté de l'aile possède une roue dentée de 20 dents pour chaîne ANSI 40 permettant de faire tanguer l'aile.

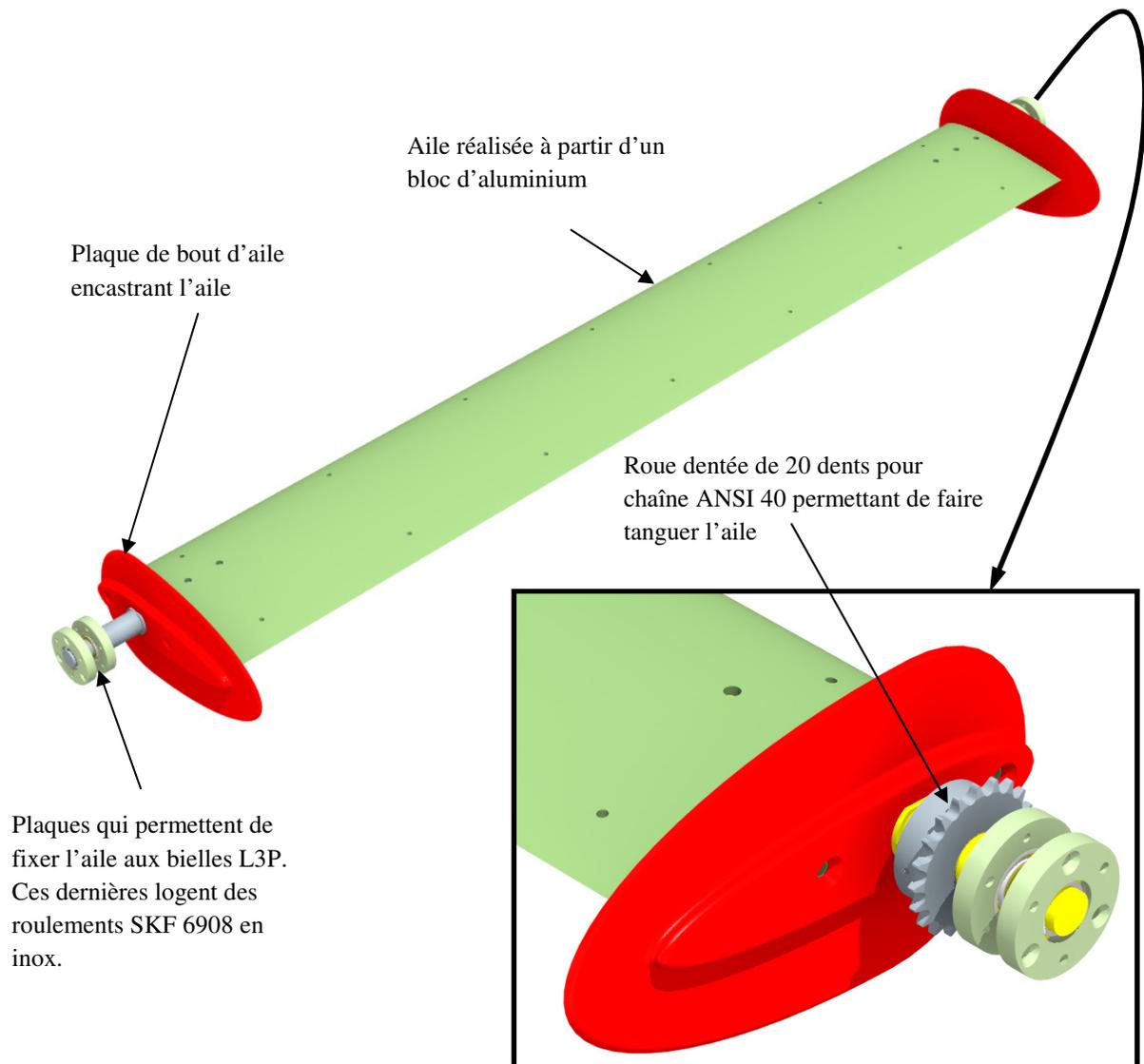


Figure 61 - Détails de l'aile

### 6.2.7 Liens vilebrequin – montage oscillant

Les quatre liens vilebrequin – montage oscillant sont en fait les bielles pL2 et tL2 des mécanismes de pilonnement et de tangage. Ces dernières sont identiques en conception, mais diffèrent par leur longueur. En effet, les liens pour le mécanisme de pilonnement ont une longueur de 1,98 m alors que pour le mécanisme de tangage, la longueur totale est de 1,57 m.

Les détails du lien vilebrequin – montage oscillant sont présentés dans la Figure 62.

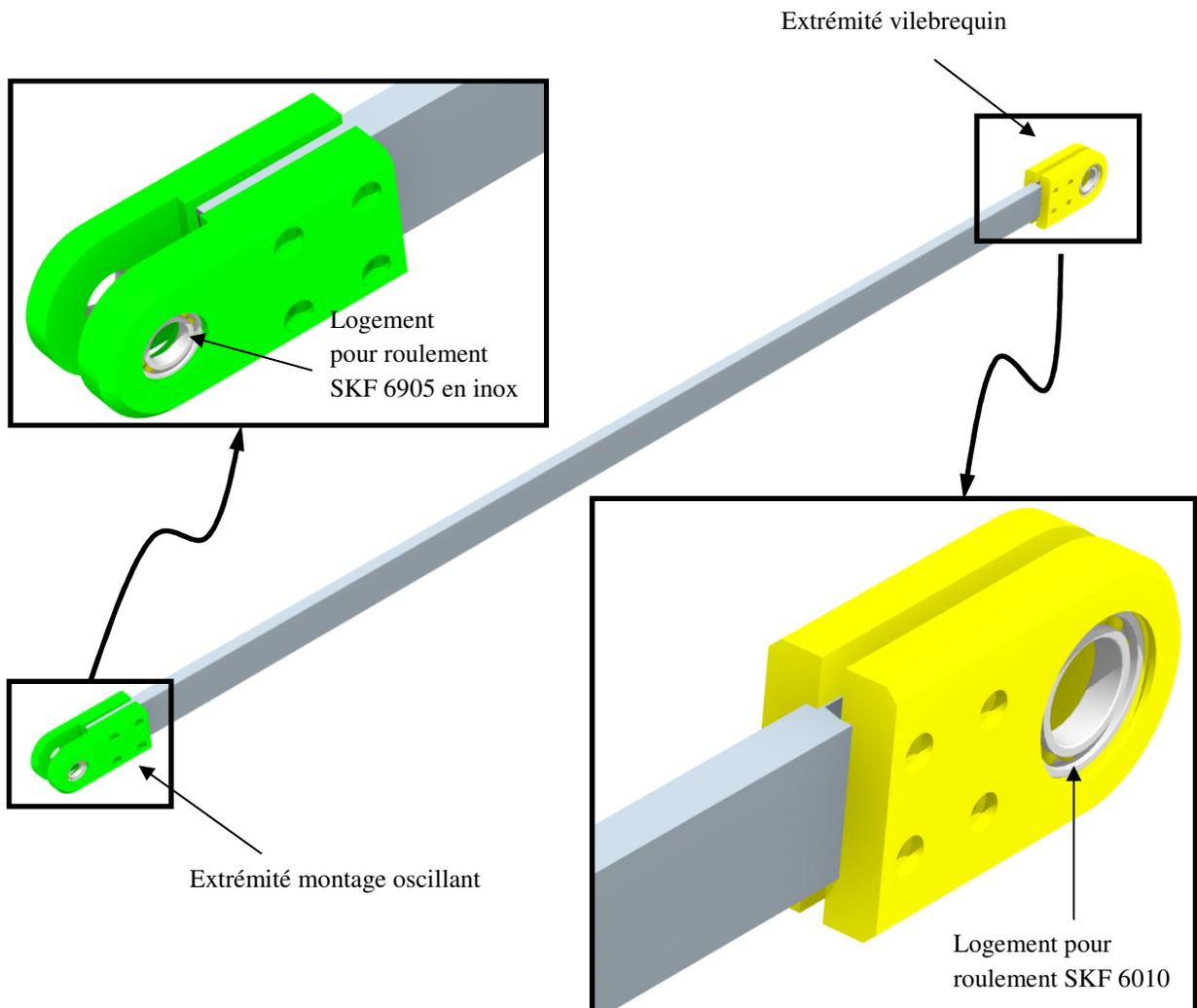


Figure 62 - Détails du lien vilebrequin - montage oscillant.

### 6.2.8 Vilebrequin

La dernière composante qui permet de relier le mouvement du montage oscillant à la chaîne de conversion électromécanique est le vilebrequin. Ce dernier est un arbre tournant incorporant les bielles pL1 et tL1 et des quatre mécanismes cinématiques. Une vue générale du vilebrequin est montrée dans la Figure 63.

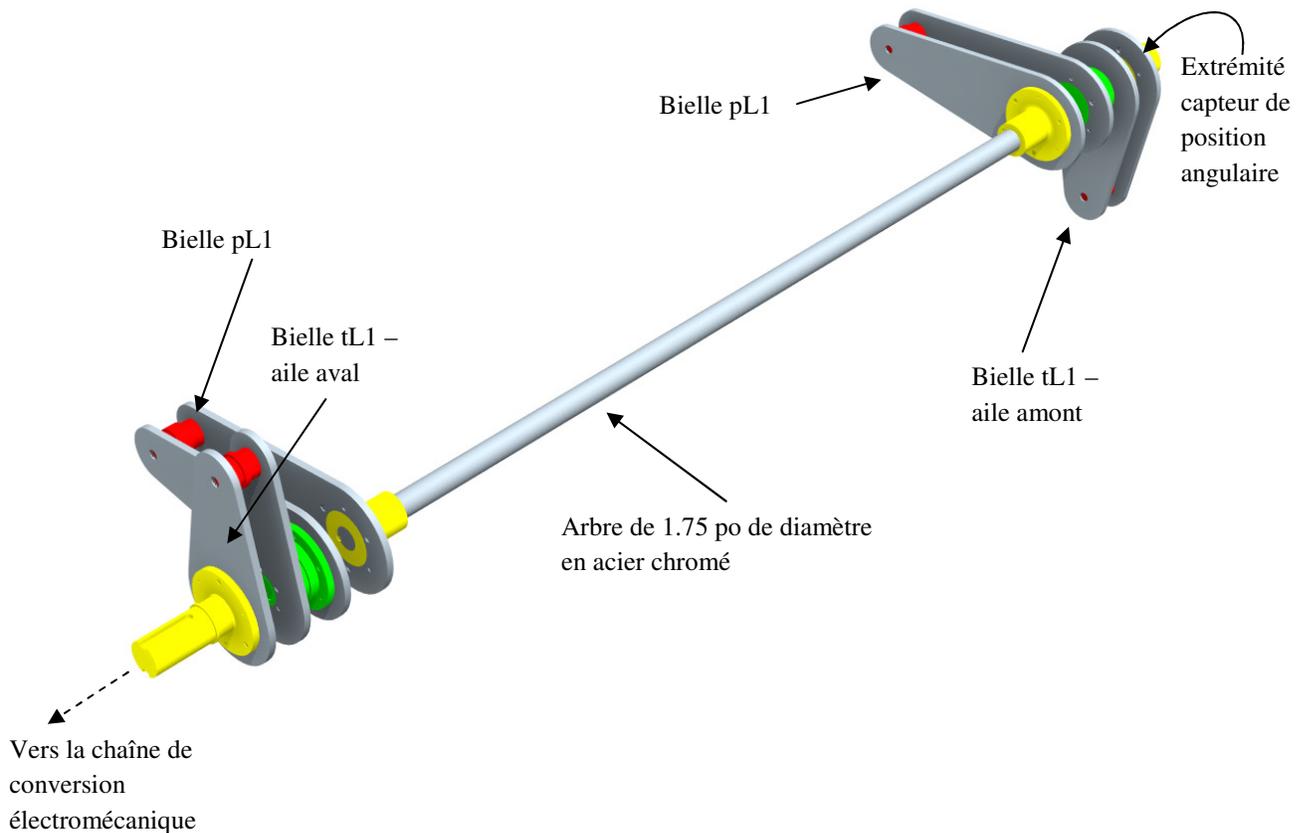


Figure 63 - Vue générale du vilebrequin.

Comme on peut le voir sur la Figure 63, le vilebrequin est composé d'un arbre de 4,45 cm de diamètre en acier chromé, lequel sépare deux ensembles de cames. À chaque extrémité, on retrouve une bielle pL1 et une bielle tL1. On peut remarquer le déphasage de  $90^\circ$  entre les bielles de pilonnement et de tangage. Des détails montrant la conception d'une des extrémités sont montrés à la Figure 64. L'arbre de sortie permet de transmettre la puissance extraite vers la chaîne de conversion électromécanique.

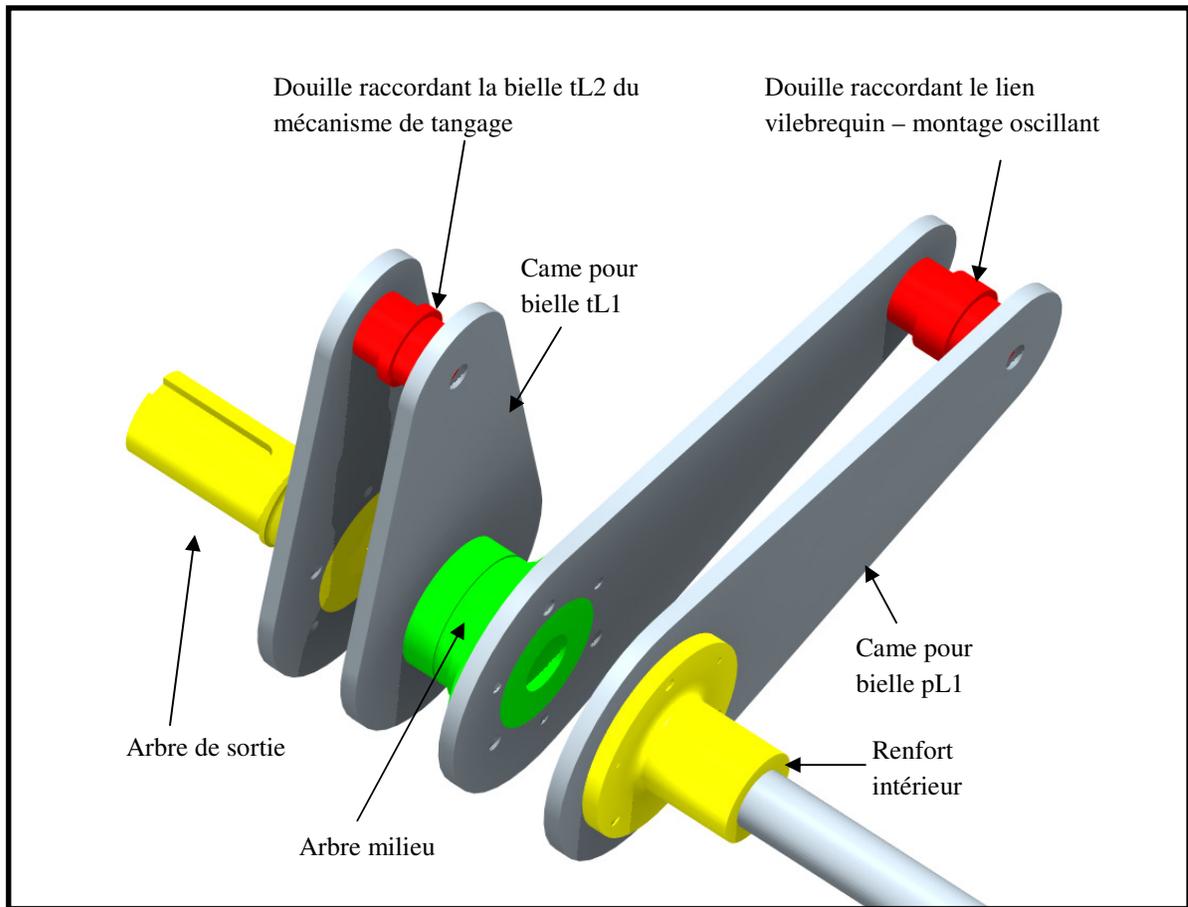
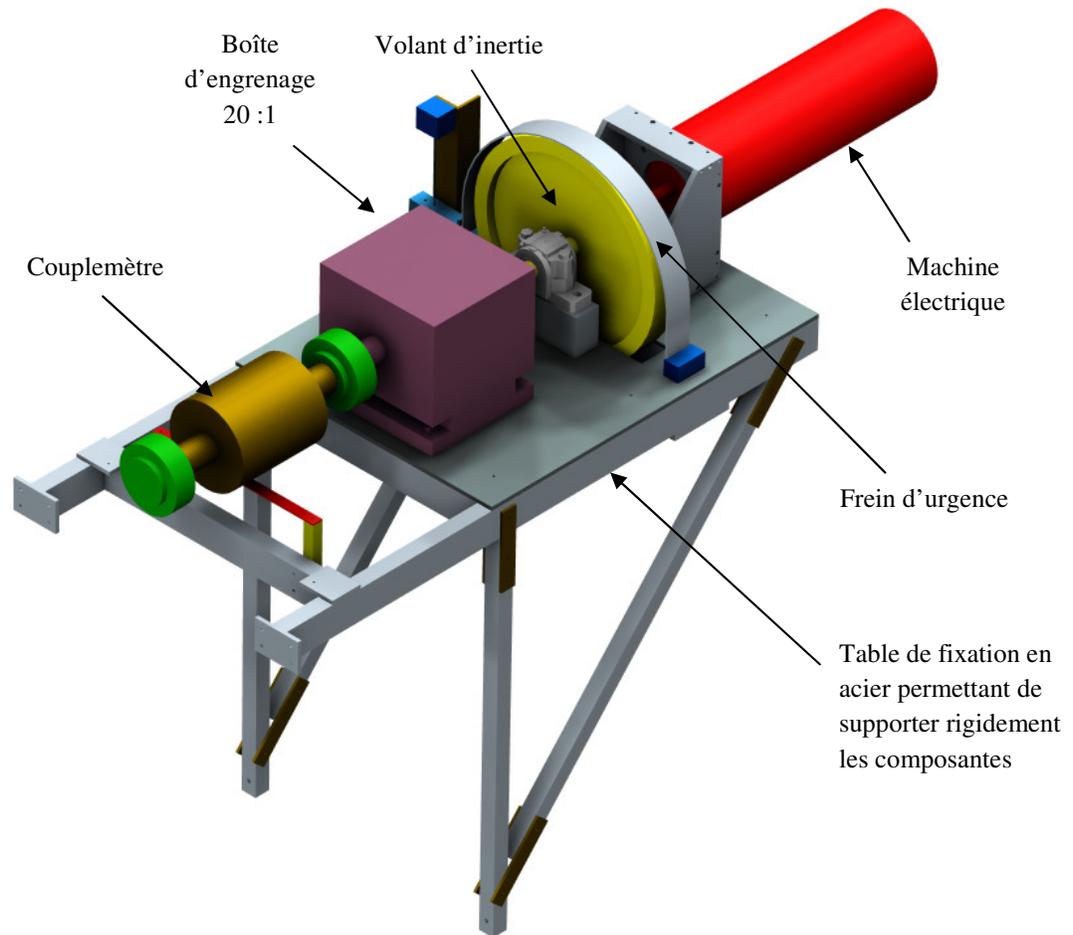


Figure 64 – Détails de la conception du vilebrequin.

### 6.2.9 Ensemble de conversion électromécanique

L'ensemble de conversion électromécanique permet de récupérer la puissance extraite par l'hydrolienne et de la convertir en électricité. Pour ce faire, à la sortie de l'hydrolienne, la puissance est d'abord transmise par un couplemètre, de manière à connaître le couple instantané généré par la turbine, puis dans une boîte d'engrenages, qui augmente la vitesse d'un facteur 20 afin de rendre plus efficace la conversion en électricité. Vient ensuite un volant d'inertie, qui facilite l'asservissement en vitesse, et finalement la génératrice, qui permet de convertir l'énergie extraite en électricité. Toutes ces composantes sont fixées sur une table en acier fournissant un lien rigide entre ces dernières. De plus, un frein d'urgence a été installé de manière à pouvoir freiner la turbine rapidement. Une vue générale présentant ces éléments est montrée dans la Figure 65.



**Figure 65 - Vue générale de l'ensemble de conversion électromécanique.**

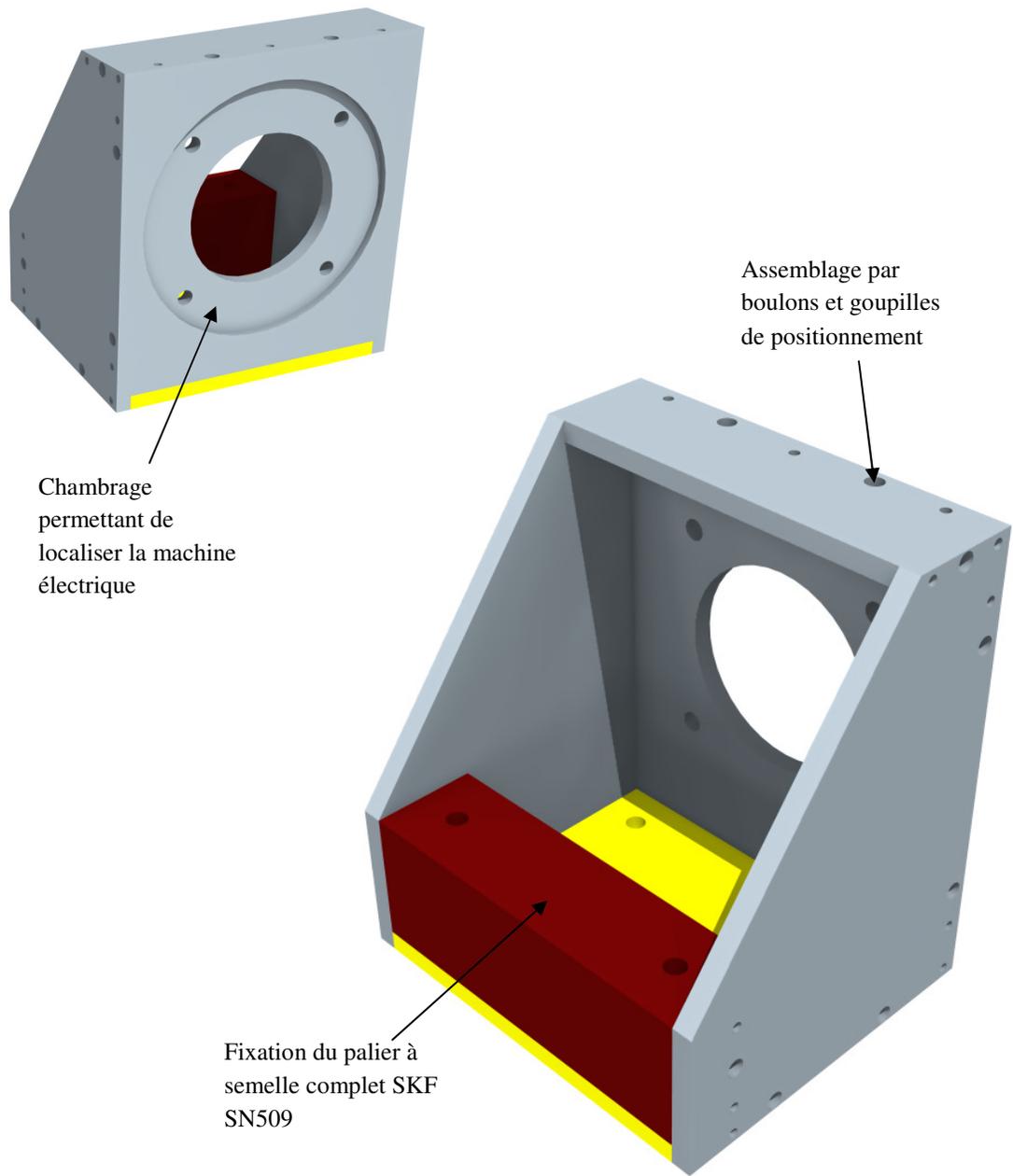
D'une manière générale, les composantes de l'ensemble de conversion électromécanique sont fixées à l'aide de boulons sur la table de fixation. Cette configuration a été choisie en fonction du degré de liberté qu'elle offrait quant à l'alignement des composantes entre-elles.

Le couplemètre est un BLH Type A-12 torque pickup d'une capacité d'environ 1355 N\*m. Les dimensions extérieures sont de 20,3 cm de diamètre par 45,7 cm de long et sa masse est de 43 lb. De chaque côté, on retrouve un accouplement par engrenages pour arbre de 6,35 cm permettant d'éviter de transmettre des efforts de flexion dans le couplemètre, ce qui fausserait la mesure du couple.

La composante qui suit le couplemètre dans la chaîne cinématique est une boîte d'engrenages hélicoïdaux Boston Gear 652B-20 d'un rapport 20 :1 pouvant transmettre un couple de 1500 N\*m à un arbre tournant à basse vitesse (88 rpm). La masse de cette composante est de 45 kg.

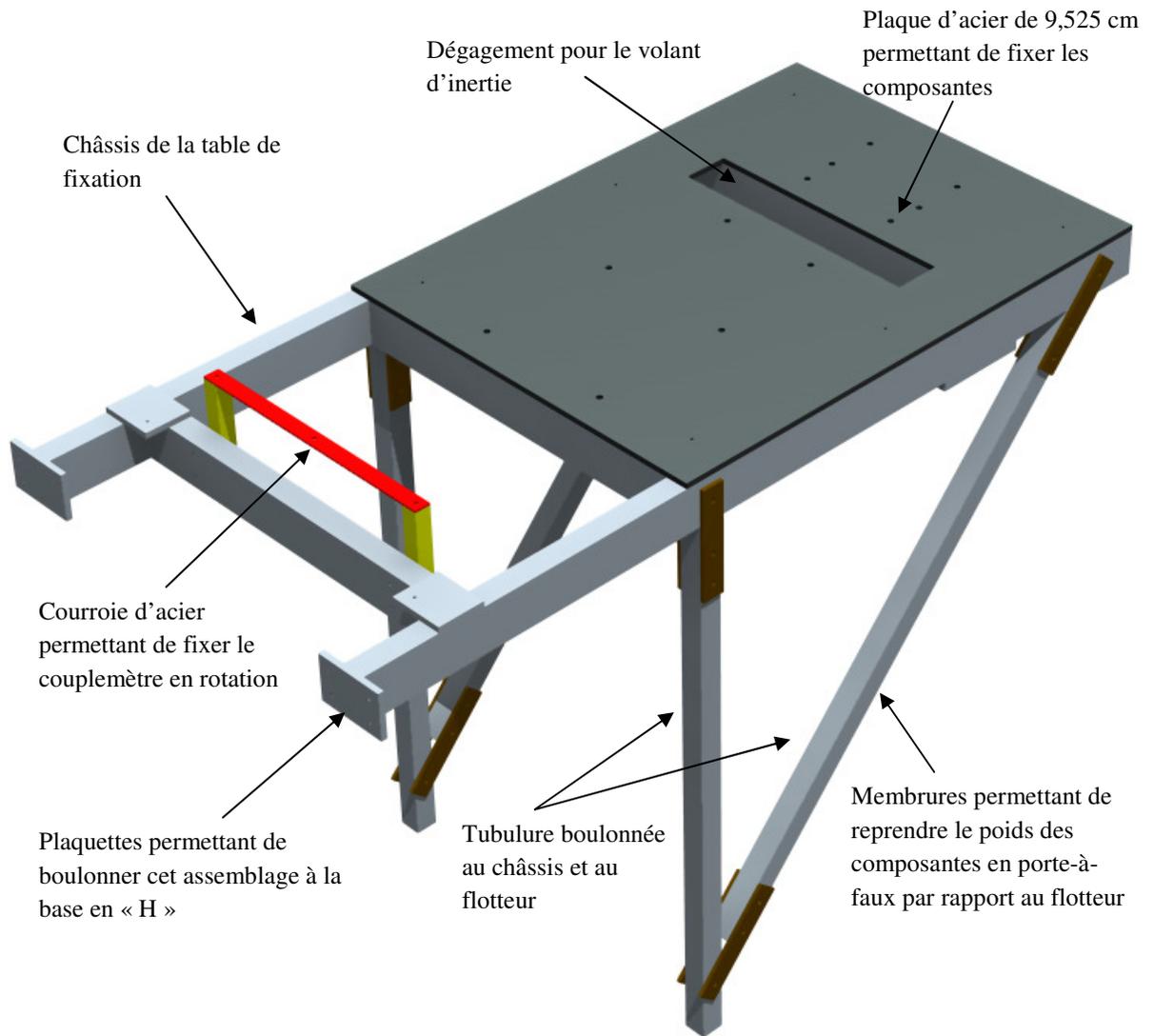
Le volant d'inertie présente des dimensions de 48 cm de diamètre par 6,35 cm d'épaisseur et une masse de 45 kg, pour une inertie de 1.52 kg\*m<sup>2</sup>. Il est monté sur un arbre de 3,81 cm, lequel est supporté par deux paliers à semelles complets SKF SN 509, fixés à la table. Un accouplement flexible à 3 griffes en élastomère permet de relier le boîtier d'engrenage et le volant d'inertie.

La machine électrique est un moteur CC Baldor CDP-3605. Elle est installée sur la table de fixation à l'aide de la boîte de fixation moteur, laquelle est présentée dans la Figure 66.



**Figure 66 - Boîte de fixation moteur.**

La table de fixation en acier permettant de relier rigidement les composantes décrites est présentée à la Figure 67.



**Figure 67 - Table de fixation pour l'ensemble de conversion électromécanique.**

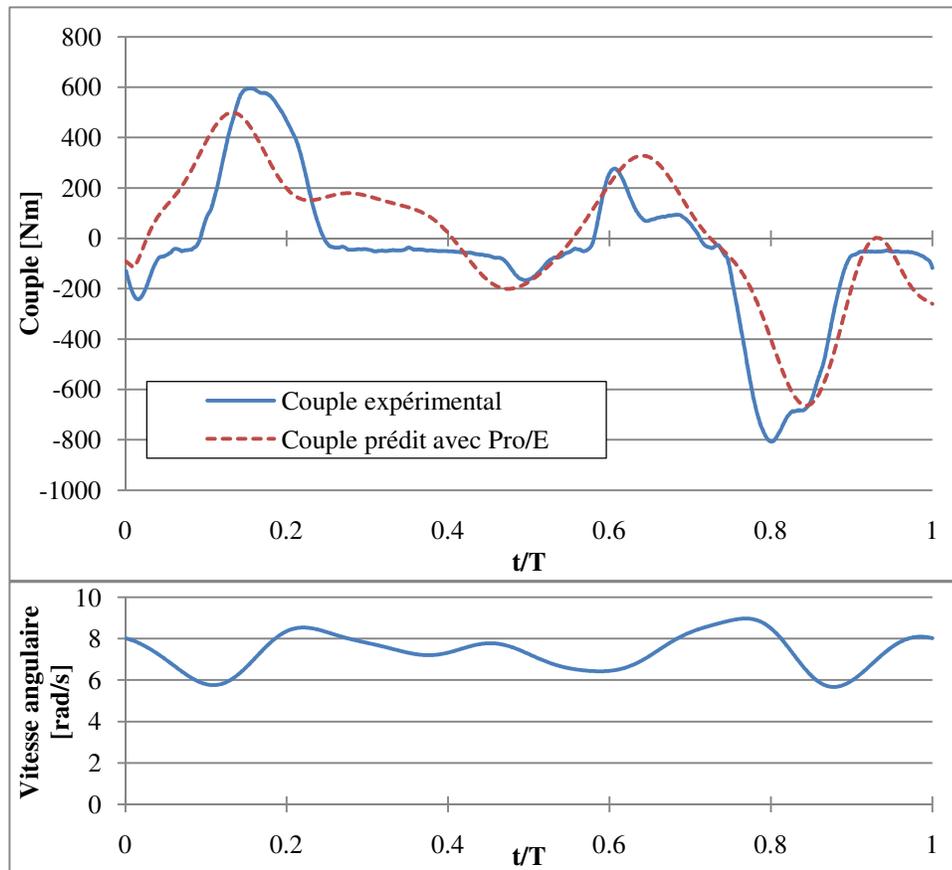
### 6.3 Mise en service de l'hydrolienne

L'hydrolienne a d'abord été assemblée en entier dans un local, de manière à s'assurer de son bon fonctionnement avant son déploiement sur le terrain. Dans cette configuration, la génératrice était alimentée en électricité et servait de moteur permettant de faire tourner l'ensemble. Cette opération a d'ailleurs permis d'apporter des correctifs mineurs à la mécanique et de faire des ajustements au niveau du système d'instrumentation.

Pendant cette étape, nous avons profité du fait que le montage était fonctionnel et instrumenté pour analyser la performance du contrôle en vitesse (volant d'inertie et

entraînement électronique) et mesurer le couple instantané requis pour faire tourner le montage, de manière à obtenir un ordre de grandeur du frottement présent et voir si certaines positions du cycle étaient problématiques, notamment au niveau de la reprise du jeu dans la boîte d'engrenage. La Figure 68 présente un exemple de courbes obtenues pour une commande de vitesse de 1,2 Hz ( $2,4\pi$  rad/s) à l'hydrolienne. Il est à noter que le cycle de vitesse angulaire et de couple expérimental montré représente un cycle moyen obtenu à partir de tous les cycles mesurés lors de cet essai. L'incertitude sur ces essais est grande étant donné la présence, lors des essais en salle, d'une dérive sur la mesure du couple, mais les résultats permettent quand même de faire ressortir certains éléments intéressants.

On remarque que la vitesse angulaire fluctue considérablement, malgré l'utilisation d'un volant d'inertie et d'un dispositif de contrôle électronique. Sur le cycle présenté, la commande était de  $2,4\pi$  rad/s et la vitesse moyenne obtenue a été de  $2,36\pi$  rad/s, ce qui représente une erreur d'environ 2.5%, ce qui est faible. Toutefois, on note que pendant ce cycle moyenné, la vitesse maximale atteinte était de  $2,86\pi$  rad/s (19% supérieur à la commande) et la vitesse minimale atteinte était de  $1,90\pi$  rad/s (21% inférieur à la commande). Ainsi, pour une commande à la vitesse nominale de l'hydrolienne de 1,2Hz, le contrôle de vitesse permettait d'obtenir une vitesse moyenne à l'hydrolienne assez près de celle commandée mais comprenant des fluctuations de vitesse de  $\pm 20\%$ . Pour une vitesse d'hydrolienne inférieure, les fluctuations étaient encore plus importantes étant donné que le volant d'inertie est dans ce cas moins efficace pour conserver une vitesse constante. La principale raison qui explique pourquoi la vitesse fluctuait autant, malgré la présence du volant d'inertie et du contrôle électronique de vitesse, est que l'inertie du système fluctuait elle aussi lors d'un cycle. En effet, comme il a été mentionné précédemment, en raison du changement de position de l'axe de rotation de certaines composantes lors du mouvement, l'inertie rapportée à l'arbre de la génératrice varie au fil d'un cycle. Conséquemment, pour conserver une vitesse angulaire constante, l'asservissement doit non seulement fournir de l'énergie pour compenser les pertes par frottement mais aussi réagir aux couples inertiels engendrés par la variation de l'inertie en fonction du temps.



**Figure 68 - Cycle moyenné de vitesse et de couple mesurés pour une commande de vitesse de  $2.4\pi$  rad/s à l'hydrolienne.**

Les efforts inertiels variables mentionnés ci-dessus sont explicables mathématiquement mais difficilement quantifiable de manière analytique étant donné la complexité du système. Ainsi, il a été nécessaire d'utiliser le modèle CAO présentée dans la section 6.2 et le logiciel PTC Pro/Engineer pour effectuer des simulations de la dynamique de ce système et ainsi connaître les couples à l'arbre de sortie de l'hydrolienne engendrés par la variation de l'inertie du système et par les fluctuations de vitesse angulaire décrites précédemment.

Le graphique supérieur de la Figure 68 présente une courbe de couple obtenue expérimentalement et une courbe de couple obtenue en simulant la dynamique avec Pro/Engineer. Il est aussi à noter que la courbe obtenue avec le modèle CAO a été évaluée alors que les chaînes permettant de transmettre le mouvement de tangage des mécanismes à 4 barres de tangage aux ailes n'étaient pas en fonction. Les ailes étaient donc libres de

tourner autour de l'axe de tangage, ce qui explique d'ailleurs pourquoi la courbe simulée ne semble pas périodique.

La courbe simulée et la courbe expérimentale ne sont pas parfaitement confondues, ce qui est prévisible. En effet, comme mentionné ci-dessus, les ailes étaient libres de tourner autour de l'axe de tangage, ce qui induit un couple inertiel différent de celui d'une aile suivant une trajectoire précise. De plus, la courbe simulée présente un bilan énergétique nul, c'est-à-dire que les pertes énergétiques (frottements, vibrations, bruits, etc.) n'étaient pas modélisées mais étaient présentes lors de l'expérimentation. Ainsi, sans permettre de comparaison précise, l'évaluation des efforts inertiels à l'aide du logiciel Pro/E a permis d'expliquer que les pointes de couple allant d'environ 600 Nm à -700 Nm sont engendrées par l'inertie des composantes et non par d'autres phénomènes tel un cognement, une résonance, etc.

## **6.4 Résultats expérimentaux**

La campagne d'essais réelle a ensuite été réalisée plus tard pendant l'été 2009 de manière à tester le prototype de 1 kW et à connaître ses performances en extraction d'énergie. Dans un premier temps, des essais ont été réalisés avec les deux ailes en place, tel qu'il avait été prévu initialement. Toutefois, par la suite, des essais ont également été réalisés sans l'aile arrière, puis sans aucune aile, de manière à obtenir des mesures d'extraction d'énergie pour une aile oscillante seule et quantifier les pertes engendrées par le mouvement des membrures dans l'écoulement.

La Figure 69 présente l'ensemble des résultats obtenus à 2 ailes lors de la campagne d'essais de l'été 2009. L'axe des ordonnées représente l'efficacité d'extraction d'énergie mesurée au couplemètre par rapport à la fenêtre hydraulique balayée, de manière moyennée sur un essai représentant un certain nombre de cycles (en général, plus de 20 cycles ont été utilisés pour calculer le cycle moyen). On remarque la bonne cohérence de l'ensemble des résultats autour d'une forme s'apparentant à une parabole, ce qui correspond à la tendance attendue. D'ailleurs, dans les meilleurs cas, une efficacité d'extraction d'énergie et de transmission de puissance des ailes jusqu'au couplemètre de plus de 30% a été mesurée. On

remarque cependant que l'efficacité d'extraction semble être une fonction de la vitesse de l'écoulement amont et que la fréquence adimensionnelle optimale se situe aux alentours de 0.11, contrairement à ce que prédisaient les simulations numériques effectuées aux LMFN ( $f^*=0.14$ ). L'analyse de ces aspects sera traitée par Kinsey ([1]).

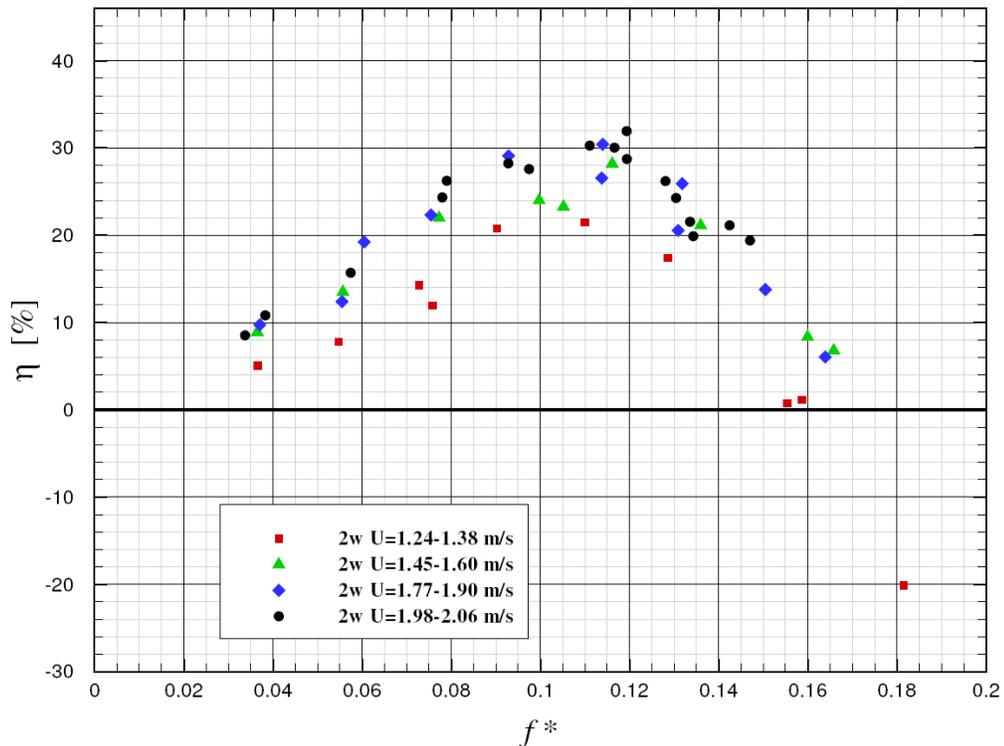
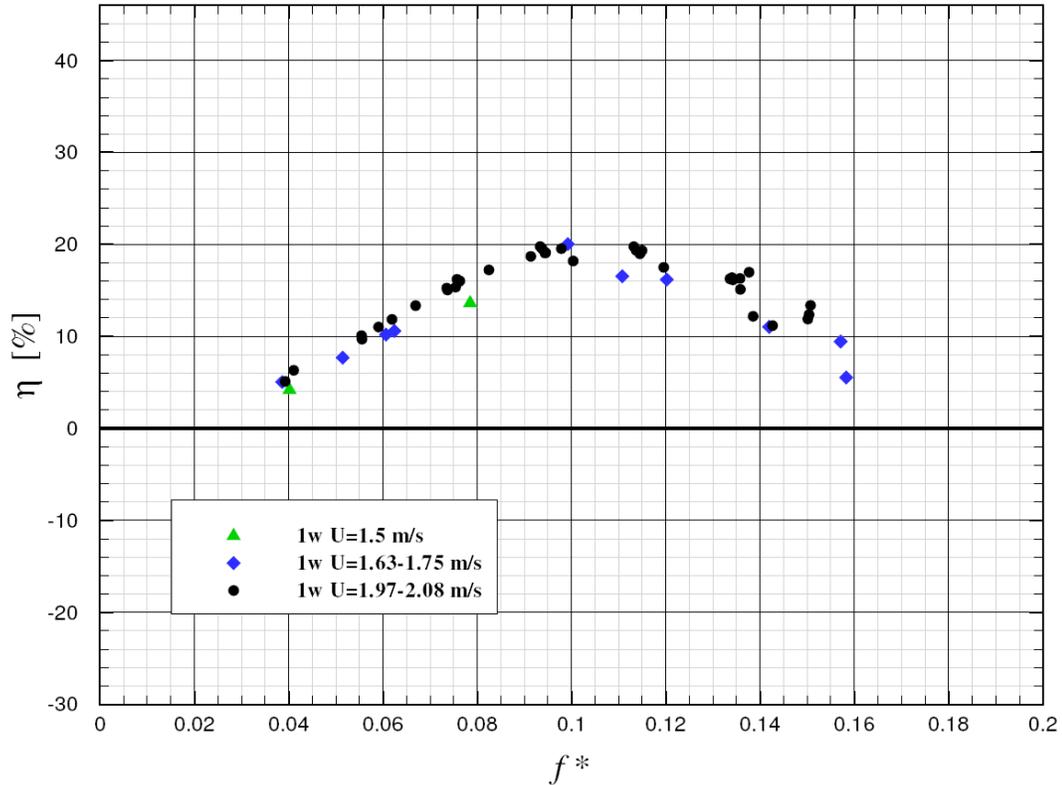


Figure 69 - Performance en extraction d'énergie pour le système à 2 ailes

La Figure 70 montre les résultats obtenus sans l'aile arrière. Dans cette configuration, on remarque que la performance en extraction d'énergie a été d'environ 20% dans les meilleurs cas. De plus, on remarque que l'ensemble des résultats se trouve distribué autour d'une tendance ayant une forme parabolique, de manière similaire au cas à deux ailes. Toutefois, dans le cas à 1 aile, la fréquence adimensionnelle optimale en extraction d'énergie obtenue se situe autour de 0,1, une valeur un peu plus faible que pour le cas à deux ailes.

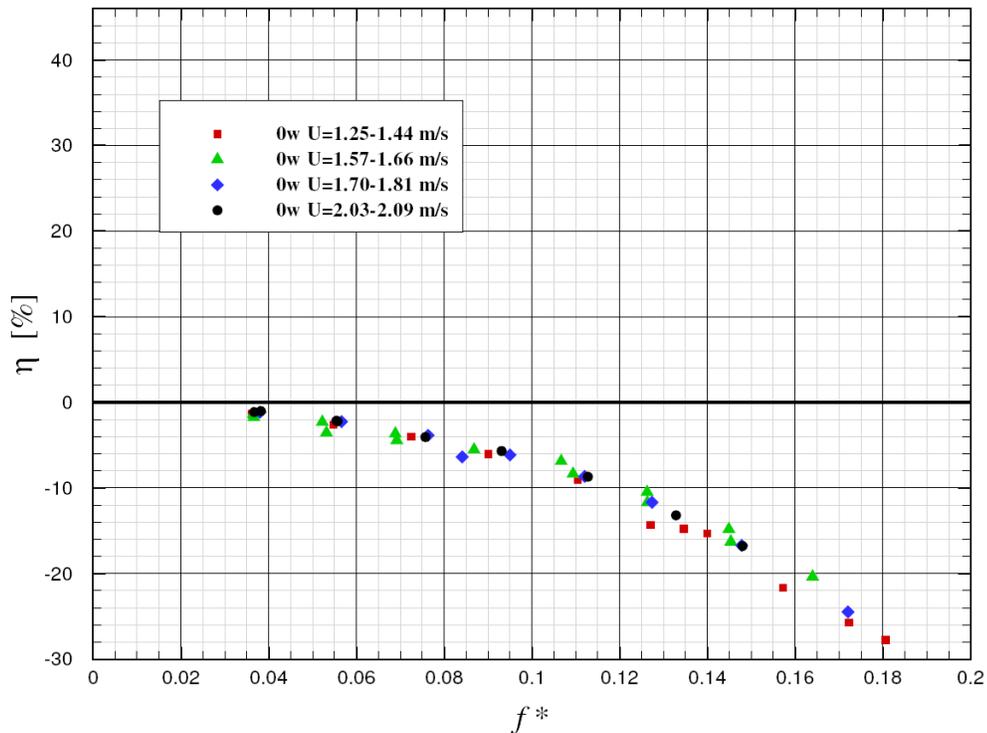


**Figure 70 - Performance en extraction d'énergie pour le système à 1 aile**

Finalement, à la Figure 71, on retrouve les performances en extraction d'énergie pour l'hydrolienne sans ailes. Évidemment, tous les essais ont menés à une efficacité négative, ce qui signifie qu'il a fallu, en moyenne, fournir de l'énergie au système pour le faire tourner, ce qui est cohérent puisque les éléments de capture d'énergie n'étaient pas en place. Ces essais ont été réalisés de manière à mesurer les pertes induites par le mouvement des bielles dans l'eau et par les pertes de mécanismes de transmission. Toutefois, les pertes dans les mécanismes de transmission ne sont pas nécessairement représentatives de celles présentes lors des essais avec les ailes, puisque les charges dans les paliers sont supérieures dans les cas avec aile(s). Les résultats de la Figure 71 représentent donc une limite inférieure pour les pertes par dissipation visqueuse et dans les mécanismes.

En considérant l'efficacité obtenue avec une ou deux ailes, et en soustrayant les pertes mesurées lors des essais sans ailes, on obtient une limite inférieure de la performance hydrodynamique d'extraction d'énergie du système. Pour le cas à deux ailes, l'efficacité

maximale de 30% était obtenu à  $f^*=0,11$ . À la Figure 71, on remarque qu'il coûtait environ 10% d'efficacité pour faire bouger les membrures dans l'eau. Conséquemment, pour la configuration la plus efficace, une extraction d'énergie hydrodynamique d'environ 40% a été obtenue. Dans le cas à une aile, un raisonnement similaire donne une extraction d'énergie d'environ 27%. La comparaison de ces performances avec la modélisation numérique sera effectuée par Kinsey ([1]).



**Figure 71 - Performance en extraction d'énergie pour le système sans aile**

Pour clore la campagne d'essai réalisée à l'été 2009, une analyse complète des résultats et une comparaison avec les prédictions numériques effectuées par le LMFN est en cours de réalisation. Les résultats qui en découleront seront présentés par Kinsey ([1]).

# Chapitre 7

## Conclusion

Par la réalisation de ces études de maîtrise, l'objectif principal visé était d'effectuer la conception et la réalisation d'un prototype de turbine à ailes oscillantes de 1 kW comprenant deux ailes en série dans l'écoulement, de manière à démontrer le potentiel d'extraction d'énergie de cette technologie et à valider certaines prédictions numériques effectuées par le LMFN.

Le contenu présenté dans ce mémoire permet de suivre le processus de conception, de la revue de littérature à la conception de l'hydrolienne et présente des détails sur la conception du prototype de table, sur la conception de l'embarcation motorisée et sur l'optimisation de la chaîne cinématique. En ce sens, on peut dire que l'objectif principal a été entièrement atteint et a été explicité en détails dans ce mémoire.

Dans un second temps, le premier but visé avec la réalisation de ce prototype était de démontrer le potentiel d'extraction d'énergie de cette technologie. À ce sujet, la campagne d'essais réalisée à l'été 2009 a permis d'atteindre cet objectif puisque les résultats rapportés dans ce mémoire montrent qu'une efficacité hydrodynamique d'extraction d'énergie d'environ 40% a été réalisée dans certaines conditions, ce qui est comparable aux performances des meilleures turbines rotatives. Par la réalisation de la campagne d'essais

de l'été 2009 sans aucun bris ou incident majeur, on peut dire que le prototype réalisé a très bien rempli sa fonction.

Troisièmement, les résultats obtenus seront utilisés afin de valider certaines prédictions numériques réalisés par le LMFN pour ce type de système. Pour y arriver, les résultats obtenus sur le terrain avec le prototype réalisé seront utilisés conjointement à d'autres outils, notamment le modèle CAO de l'hydrolienne avec lequel il est possible d'effectuer des simulations dynamiques à l'aide du logiciel Pro/Engineer. Les résultats qui en découleront seront rapportés par Kinsey ([1]) et permettront de conclure la campagne d'essais et d'atteindre l'objectif qu'était la validation expérimentale de certaines prédictions numériques.

Les résultats obtenus et rapportés dans ce mémoire permettent d'entrevoir un futur très intéressant pour cette technologie puisqu'avec la réalisation de ce prototype, on sait maintenant que la technologie de turbine à ailes oscillantes pour l'extraction d'énergie à partir des courants de rivières ou de marées permet d'atteindre des efficacités très intéressantes. Toutefois, le prototype qui a été réalisé est loin d'être une solution industrielle et les prochains prototypes qui seront réalisés dans une optique de déploiement commercial devront intégrer une chaîne de transmission plus simple entre les ailes et le générateur, c'est-à-dire intégrer moins de composantes et diminuer le nombre de pièces en mouvement dans l'eau. De plus, l'efficacité totale de conversion des ailes jusqu'à la sortie du générateur devra être considérée. À ce sujet, la campagne d'essais réalisés pendant l'été 2009 n'a pas permis de quantifier l'efficacité d'extraction jusqu'à la sortie du convertisseur électrique mais cet aspect devra nécessairement être considéré prochainement.

# Bibliographie

- [1] Kinsey T., Dumas G., Lalande G., Ruel J., Méhut A., Viarouge P., Lemay J., Jean Y., « Prototype Testing of a Hydrokinetic Turbine Based on Oscillating Hydrofoils », Article soumis à Renewable Energy, 23 mars 2010.
  
- [2] McKinney W., DeLaurier J., “The Wingmill: An Oscillating-Wing Windmill”, AIAA/SERI Wind Energy Conference, Boulder, Colorado, April 9-11, États-Unis, 1981.
  
- [3] T. Kinsey, G. Dumas, « Parametric Study of an Oscillating Airfoil in Power Extraction Regime », AIAA Journal 46, no.6, pp. 1813-1330, juin 2006.
  
- [4] Jones K.D., Davids S., Platzer M.F., “Oscillating-Wing Power Generation”, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ASME/JSME Joints Fluids Engineering Conference July 18-23 1999, États-Unis, July 1999.
  
- [5] Jones K.D., Lindsey K., Platzer M.F., “An Investigation of the fluid-structure interaction in an oscillating-wing micro-hydropower generator”, Department of Aeronautics & Astronautics, Naval Postgraduate School, États-Unis, 2003.
  
- [6] Deschamps J., “Étude expérimentale de l’hydrodynamique d’une aile oscillante”, Mémoire de maîtrise, Département de génie mécanique, Université Laval, août 2009.

- [7] Faure J.-F., “Étude des caractéristiques hydrodynamiques d’une aile oscillante”, Mémoire de maîtrise, Département de génie mécanique, Université Laval, juin 2008.
- [8] The Engineering Business Limited, "Research and Development of a 150 kW Tidal Stream Generator", Crown Copyright, 2002.
- [9] The Engineering Business Limited, "Stingray Tidal Energy Device - Phase 2", The Engineering Business Ltd., 2003.
- [10] The Engineering Business Limited, "Stingray Tidal Energy Device - Phase 3", The Engineering Business Ltd., 2005.
- [11] Site web de la compagnie PulseGeneration, <http://www.pulsegeneration.co.uk>, consulté le 20 novembre 2009.
- [12] Site web de la compagnie BioPowerSystems, <http://www.biopowersystems.com/>, consulté le 20 novembre 2009
- [13] Lambert-Bolduc M., “Self-trimming oscillating wing system”, US 6,652,232 B2, 25 novembre 2003.
- [14] Lambert-Bolduc M., “Self-trimming oscillating system”, PCT WO 2004/110859 A1, 23 décembre 2004.
- [15] Allen Demers L.-A., "Synthèse de mécanismes pour une génératrice hydrolienne à ailes oscillantes", Mémoire de maîtrise, Département de génie mécanique, Université Laval, Canada, 2007.
- [16] Paish M., « Fluid power generation/propulsion system », PCT WO 2005/108781 A1, 17 novembre 2005.

- [17] Paish M., « Oscillating vane apparatus with sliding connection and only one crank », GB 2,425,794 A, 3 juin 2005.
- [18] Grose D. L., “Wind powered apparatus”, US 4,470,770, 11 septembre 1984.
- [19] Grose D. L., “Wind powered apparatus”, US 4,595,336, 17 juin 1986.
- [20] Grinsted T. W., Watchorn M.J., “Water generator oscillating due to rapid flow of fluid”, US 6,731,018 B1, 4 mai 2004.
- [21] Grinsted T. W., Watchorn M. J., “Extracting power from moving water”, US 6,849,963 B2, 1<sup>er</sup> février 2005.
- [22] Arnold L., “Fluid energy converting method and apparatus”, US 4,347,036, 31 août 1982.
- [23] Arnold L., “Fluid energy converting method and apparatus”, US 4,184,805, 22 janvier 1980.
- [24] Arnold L., “Extraction of energy from flowing fluids”, US 6,273,680 B1, 14 août 2001.
- [25] Price D. T., “Cable restrained reciprocating blade system for energy extraction from moving body of water”, US 5,548,956, 27 août 1996.
- [26] Grinsted T.W., Campbell A. M., “Apparatus for extracting or generating power”, GB 2,412,143 A, 21 septembre 2005.
- [27] Kallenberg R. C., “Hydrodynamic power-generating system”, US 6,323,563 B1, 27 novembre 2001.

[28] Smith R. D., "Wind motor", US 5,009,571, 23 avril 1991.