

LOUIS-ALEXIS ALLEN DEMERS

**SYNTHÈSE DE MÉCANISMES POUR UNE
GÉNÉRATRICE HYDROLIENNE 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.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2007

Résumé

L'objectif principal de ce mémoire est de mettre à jour les étapes parcourues dans la synthèse de mécanismes pour une génératrice éolienne/hydrolienne à ailes oscillantes. En effet, l'utilisation d'ailes oscillant dans un écoulement d'air ou d'eau afin d'en extraire de l'énergie nécessite un contrôle par un mécanisme contraignant cette dite oscillation. Une architecture doit donc être conçue afin d'imposer le mouvement adéquat de tangage et de pilonnement aux ailes, en plus de transférer aux alternateurs l'énergie cinétique extraite.

De ce fait, l'analyse de l'aile oscillante à auto-compensation, un mécanisme proposé dans la littérature, est d'abord conduite. Deux lacunes sont ainsi identifiées : le manque d'adaptabilité du système à l'environnement et l'impossibilité d'atteindre des amplitudes de tangage supérieures à 62° . S'ensuit alors une recherche de solutions pouvant procurer les mouvements établis qui se solde en l'élaboration de deux architectures à deux degrés de liberté : Valkyrie 2 et AEGIR.

L'examen de celles-ci révèle ensuite que Valkyrie 2 est plus difficile à contrôler qu'AEGIR, puisque ce dernier possède une commande découplée. De son côté, Valkyrie 2 utilise seulement des barres et des liaisons rotoïdes, ce qui est un avantage du point de vue de l'efficacité énergétique. En étudiant par la suite la possibilité d'utiliser ces mécanismes dans des systèmes tandem, l'avantage du contrôle découplé d'AEGIR se fait plus important, puisqu'il est plus facile de diriger l'orientation des ailes par le pivot central à l'aide de courroies plutôt que par de nombreuses membrures. Finalement, la proposition d'ajouter des masses décentrées au système AEGIR tandem est apportée afin d'améliorer l'allure de la courbe de puissance en sortie du système.

Avant-propos

Je veux d'abord commencer ce mémoire en remerciant les gens qui m'ont permis de mener ma maîtrise à terme. Il y a d'abord Clément Gosselin, mon directeur de recherche, qui m'a confié ce projet et qui, par la suite, m'a toujours soutenu par ses conseils judicieux. Merci aussi Clément pour ta générosité et pour ton soutien dans l'écriture de deux articles durant cette année de maîtrise. Cette heureuse expérience de recherche est aussi attribuable aux membres du laboratoire de robotique, que ce soit par l'aide précieuse de Boris ou Thierry lorsqu'un problème survenait ou encore par les moments de détente passés avec les étudiants et professionnels du laboratoire de robotique, comme les midis assis sur le gazon du grand axe ou les parties de hockey durant l'hiver. Merci donc à Boris, Thierry, Nicolas, Vincent, Samuel, Mehdi, Cyril, Catherine, Noémie, Philippe, Martin, Marise, Ian, Xianwen, Qimi, Jean-Philippe, Mathieu, Pierre-Luc, Jean-Marie, Olivier, Matthieu, Marco, Simon, Simon et Simon(-Guy). Il fallait bien-sûr que je finisse avec les trois Simon...

Puisque mon projet s'est effectué en partenariat avec le laboratoire de mécanique des fluides numérique, avec le laboratoire de mécanique des fluides, avec le bureau de design et avec le laboratoire d'électrotechnique, électronique de puissance et de commande industrielle, j'aimerais aussi remercier leurs membres. D'abord, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Guy Dumas, l'instigateur du projet d'ailes oscillantes à l'Université Laval. Il y a aussi les autres professeurs et spécialistes touchant à cette étude, tel que Jean Lemay, Jean Ruel, Yves Jean, Maxime Dubois et Philippe Viarouge. Finalement, merci à tous les étudiants faisant partie de cette incroyable entreprise pour les dîners-réunions où nous nous tenions au courant des avancements des divers mandats, dont Pascal, Steve, Thomas, Julie, Jean-Frederick, Guillaume et Arnaud.

Je me permets aussi de mentionner l'apport des membres de l'équipe de l'Avion Cargo Laval à mon agréable aventure à l'Université Laval, car j'ai fait parti de cette équipe durant les deux dernières années. J'ai d'ailleurs passé des moments mémorables avec ce groupe durant la conception, la fabrication et la destruction de l'avion aux compétitions se tenant à Los Angeles en 2006 et à Dallas en 2007. Merci Dominic, Jean-Louis, Marc-Antoine, Martin, Nicolas, Pascal, Pierre-Luc, Véronique, de même que notre défunt Nicolas, pour votre compréhension et votre amitié.

Finalement, j'adresse un merci tout spécial à ma compagne, Valérie. Elle fut toujours là pour me soutenir et m'aider, pour me comprendre lors des moments difficiles comme pour profiter des quelques moments de paix avec moi. Mes vieux amis ont eux aussi été des sources de distraction bien appréciée, alors merci Antoine, Christian, Jean-François, Mathieu, Martin, Nicolas et Nicolas. Je finis naturellement avec ma famille, la première à avoir été là et la dernière qui me restera. Je ne peux vous exprimer ma reconnaissance avec un simple merci, alors je vous ai gardé cet espace privilégié. Clermont, Johane, Catherine, Nicolas, Maria et Fannie, merci pour tout.

*Au fond, on ne sait que lorsqu'on ne sait peu :
avec le savoir croît le doute.*

Goethe

Table des matières

Résumé	i
Avant-propos	ii
Table des matières	v
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Liste des symboles	xii
Introduction	1
1 Étude de l'aile oscillante à auto-compensation	3
1.1 Examen du système d'aile oscillante à auto-compensation	4
1.1.1 Définition du mécanisme	4
1.1.2 Dérivation du modèle mathématique	4
1.1.2.1 Analyse de la boucle ACDB	7
1.1.2.2 Analyse de la boucle EFGD	8
1.1.3 Courbes obtenues pour les valeurs initiales des membrures . . .	10
1.2 Étude du dimensionnement des membrures	12
1.3 Commentaires sur le système d'aile oscillante à auto-compensation . . .	15
2 Recherche de solutions	16
2.1 Guidage de l'aile	17
2.2 Mécanismes à un degré de liberté	19

2.2.1	Ressort	19
2.2.2	Valkyrie 1	20
2.2.3	Parallélogramme double	20
2.2.4	Engrenages	21
2.3	Mécanismes à deux degrés de liberté	22
2.3.1	Câble en série	22
2.3.2	Câbles en parallèle	23
2.3.3	Valkyrie 2	24
2.3.4	AEGIR	25
2.4	Discussion sur la recherche de solutions	25
3	Étude du mécanisme Valkyrie 2	26
3.1	Définition du mécanisme	27
3.2	Dérivation des équations cinématiques	28
3.2.1	Analyse de la boucle ABCD	28
3.2.2	Analyse de la boucle EFGCD	29
3.2.3	Détermination des vitesses angulaires	31
3.2.4	Détermination des accélérations angulaires	31
3.3	Dérivation des équations dynamiques	32
3.3.1	Accélération du centre de masse des membrures	32
3.3.2	Forces et moments agissant aux centres de masse	33
3.3.3	Déplacements infinitésimaux	34
3.3.4	Détermination des moments générés	35
3.4	Étude du dimensionnement des membrures	35
3.5	Simulation	38
3.6	Commentaires sur le mécanisme Valkyrie 2	41
4	Étude de systèmes Valkyrie tandem	42
4.1	Recherche d'architectures pour un système Valkyrie tandem	43
4.1.1	Système Valkyrie tandem avec une courroie	43
4.1.2	Système Valkyrie tandem avec des engrenages	44
4.1.3	Système Valkyrie tandem avec seulement des barres	45
4.2	Commentaires sur les mécanismes Valkyrie tandem	46
5	Étude du mécanisme AEGIR	47
5.1	Définition du mécanisme	48
5.2	Dérivation des équations cinématiques	49
5.2.1	Analyse de la boucle de pilonnement	49

5.2.2	Analyse de la boucle de tangage	50
5.2.3	Détermination des vitesses angulaires	50
5.2.4	Détermination des accélérations angulaires	51
5.3	Dérivation des équations dynamiques	51
5.3.1	Accélération du centre de masse des membrures	51
5.3.2	Forces et moments agissant aux centres de masse	52
5.3.3	Déplacements infinitésimaux	53
5.3.4	Détermination des moments générés	54
5.4	Étude du dimensionnement des membrures	55
5.5	Simulation	56
5.6	Commentaires sur le mécanisme AEGIR	59
6	Étude du système AEGIR tandem	60
6.1	Définition du mécanisme	61
6.2	Dérivation des équations cinématiques	62
6.3	Dérivation des équations dynamiques	63
6.4	Étude du dimensionnement des membrures	66
6.5	Simulation	67
6.5.1	Programme <i>Matlab</i>	67
6.5.2	Validation avec <i>ADAMS</i>	72
6.5.3	Amélioration de la courbe de puissance produite	75
6.6	Commentaires sur le système AEGIR tandem	78
	Conclusion	81
	Bibliographie	84
A	Copie de la demande de brevet d'Éolo	87
B	Résolution d'une équation en sinus et cosinus	111
C	Réponses du mécanisme d'Éolo pour des amplitudes de tangage	113
D	Scénario d'un système d'ailes oscillantes en tandem	122

Liste des tableaux

1.1	Dimensions des membrures tracées dans la demande de brevet.	10
1.2	Limite supérieure des dimensions pour les erreurs minimales	13
1.3	Erreur obtenue selon l'amplitude de tangage demandée.	13
1.4	Limite supérieure des dimensions pour des résultats applicables.	13
1.5	Dimensions des membrures respectant les contraintes du tableau 1.4.	14
2.1	Mécanismes potentiels simples pour guider l'aile.	17
2.2	Mécanismes potentiels plus complexes pour guider l'aile.	18
3.1	Dimensions proposées des membrures de Valkyrie 2.	37
3.2	Paramètres utilisés pour la simulation numérique.	38
5.1	Dimensions proposées des membrures d'Aegir.	55
6.1	Dimensions proposées des membrures du mécanisme de pilonnement.	66
6.2	Paramètres utilisés dans la simulation du système AEGIR tandem.	67
6.3	Résultats de la simulation dynamique du système AEGIR tandem.	71

Liste des figures

1	Mouvements de tangage et de pilonnement imposés.	2
1.1	Vue isométrique éclatée de l'aile oscillante à auto-compensation.	5
1.2	Vue de face de l'aile oscillante à auto-compensation.	5
1.3	Vue de face du mécanisme modélisé dans <i>Pro-Engineer</i>	6
1.4	Schéma du mécanisme de l'aile oscillante à auto-compensation.	6
1.5	Graphiques de l'angle φ en fonction de l'angle θ_1	11
1.6	Graphiques de l'angle θ en fonction de l'angle θ_1	11
1.7	Graphes obtenus pour une amplitude de θ de 62°	14
1.8	Mécanisme modélisé selon les dimensions du tableau 1.5.	15
2.1	Mécanisme avec un ressort.	19
2.2	Mécanisme Valkyrie 1.	20
2.3	Mécanisme avec un parallélogramme double.	21
2.4	Mécanisme avec des engrenages.	21
2.5	Mécanisme avec un câble en série.	22
2.6	Mécanisme de câbles en parallèle.	23
2.7	Mécanisme Valkyrie 2.	24
2.8	Mécanisme Valkyrie 2 simplifié.	24
2.9	Mécanisme AEGIR.	25
3.1	Mécanisme Valkyrie 2.	27
3.2	Mécanisme Valkyrie 2 simplifié.	27
3.3	Schéma du mécanisme Valkyrie 2 simplifié.	27
3.4	Schéma du mécanisme AEGIR avec le c.d.m. des membrures.	32

3.5	Schéma du mécanisme Valkyrie 2 simplifié.	36
3.6	Mécanisme modélisé selon les dimensions du tableau 3.1.	37
3.7	Forces agissant sur l'aile selon les paramètres du tableau 3.2.	38
3.8	Moment agissant sur l'aile selon les paramètres du tableau 3.2.	38
3.9	Position angulaires θ_1 et θ_2 du mécanisme Valkyrie 2.	39
3.10	Pilonnement de l'aile obtenu avec le mécanisme Valkyrie 2.	39
3.11	Tangage de l'aile obtenu avec le mécanisme Valkyrie 2.	40
3.12	Couples générés aux alternateurs avec le mécanisme Valkyrie 2.	40
3.13	Puissances instantanées générées ou requises aux alternateurs.	41
4.1	Montage tandem d'ailes oscillantes avec le mécanisme Valkyrie 2.	43
4.2	Mécanisme tandem avec une courroie.	43
4.3	Montage inadéquat d'engrenages dans un mécanisme tandem.	44
4.4	Montage adéquat d'engrenages dans un mécanisme tandem.	44
4.5	Mécanisme tandem avec seulement des membrures.	45
4.6	Tangage de la seconde aile.	46
4.7	Pilonnement de la seconde aile.	46
5.1	Mécanisme AEGIR.	48
5.2	Mécanisme AEGIR simplifié.	48
5.3	Schéma du mécanisme AEGIR simplifié.	48
5.4	Schéma du mécanisme AEGIR avec le c.d.m. des membrures.	52
5.5	Mécanisme modélisé selon les dimensions du tableau 5.1.	55
5.6	Positions angulaires θ_1 et θ_2 du mécanisme AEGIR.	56
5.7	Pilonnement de l'aile obtenu avec le mécanisme AEGIR.	57
5.8	Tangage de l'aile obtenu avec le mécanisme AEGIR.	57
5.9	Couples générés aux alternateurs avec le mécanisme AEGIR.	58
5.10	Puissances instantanées générées ou requises aux alternateurs.	58
6.1	Montage tandem d'ailes oscillantes avec le mécanisme AEGIR.	61
6.2	Schéma du mécanisme AEGIR tandem simplifié.	61
6.3	Schéma du système AEGIR tandem avec le c.d.m. des membrures.	64
6.4	Schéma du mécanisme de pilonnement.	66
6.5	Forces agissant sur les ailes selon les paramètres du tableau 6.2.	68
6.6	Moments agissant sur les ailes selon les paramètres du tableau 6.2.	68
6.7	Position angulaires θ_1 , θ_2 et θ_3 du système AEGIR tandem.	69
6.8	Pilonnement des ailes obtenu avec le système AEGIR tandem.	69

6.9	Tangage des ailes obtenu avec le système AEGIR tandem.	70
6.10	Couples générés aux alternateurs avec le système AEGIR tandem. . . .	70
6.11	Puissances instantanées générées ou requises aux alternateurs.	71
6.12	Système AEGIR tandem modélisé avec <i>ADAMS/View</i>	72
6.13	Comparaison des positions angulaires obtenues avec <i>Matlab</i> et <i>ADAMS</i>	73
6.14	Comparaison des pilonnements obtenus avec <i>Matlab</i> et <i>ADAMS</i>	73
6.15	Comparaison des tangages obtenus avec <i>Matlab</i> et <i>ADAMS</i>	74
6.16	Comparaison des couples obtenus avec <i>Matlab</i> et <i>ADAMS</i>	74
6.17	Comparaison des puissances instantanées obtenues avec <i>Matlab</i> et <i>ADAMS</i>	75
6.18	Puissance aux alternateurs en tenant compte de l'inertie et de la masse.	76
6.19	Puissance aux alternateurs avec une distribution de masse modifiée.	76
6.20	Système AEGIR tandem amélioré avec une masse désaxée.	77
6.21	Puissances instantanées générées en ajoutant un stockage potentiel.	77
6.22	Inversion du sens de rotation avec des engrenages coniques.	78
6.23	Inversion du sens de rotation avec des engrenages droits.	78
6.24	Système AEGIR tandem à un ddl.	78
6.25	Système AEGIR tandem avec un mécanisme de pilonnement raccourci.	79
6.26	Système AEGIR tandem avec un mécanisme incliné.	79
6.27	Système AEGIR tandem avec des ailes en parallèle.	79
6.28	Système AEGIR tandem avec des pales horizontales.	80
6.29	Système AEGIR tandem avec des pales verticales.	80
C.1	Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 10°	114
C.2	Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 20°	115
C.3	Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 30°	116
C.4	Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 40°	117
C.5	Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 50°	118
C.6	Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 60°	119
C.7	Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 62°	120
C.8	Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 70°	121

Liste des symboles

θ_i	Coordonnée articulaire associée au i^e moteur
h	Pilonnement, position verticale de l'aile oscillante.
H_0	Amplitude de pilonnement.
θ	Tangage, orientation d'une aile oscillante seule.
θ_0	Amplitude de tangage.
ϑ_1	Tangage de l'aile oscillante en aval dans un système en tandem.
ϑ_2	Tangage de l'aile oscillante en amont dans un système en tandem.
f	Fréquence d'oscillation pour le pilonnement et le tangage.
γ	Fréquence angulaire d'oscillation pour le pilonnement et le tangage.
ϕ	Différence de phase entre le mouvement de tangage et celui de pilonnement.
U_∞	Vitesse de l'écoulement libre du fluide.
c'	Corde, longueur du profil de l'aile.

Introduction

*Quand tous les individus s'appliqueront à progresser,
alors, l'humanité sera en progrès.*

Charles Baudelaire, Journaux intimes

Ce travail s'inscrit dans un projet plus global impliquant des chercheurs en mécanique des fluides, en mécanismes et en électrotechnique et qui vise le développement de génératrices hydroliennes à ailes oscillantes. En effet, de récentes recherches ont démontré le potentiel intéressant de l'utilisation d'ailes oscillantes comme organe d'extraction d'électricité [1, 2, 4, 5, 14]. Dans ce contexte, un des enjeux importants dans la conception d'un système permettant de capter l'énergie cinétique d'un fluide est la transformation de cette énergie en électricité. Étant donné qu'il n'est pas encore efficace de passer directement du mouvement d'un fluide à une énergie électrique [13], il est nécessaire de concevoir un système mécanique intermédiaire. La fonction de celui-ci consiste à convertir l'énergie cinétique du fluide en énergie cinétique d'un mécanisme capable de convertir celle-ci en énergie électrique. Dans le projet proposé ici, le système mécanique a aussi une fonction supplémentaire, soit de guider l'orientation des pales (ailes) tout au long du cycle de mouvement afin de maximiser l'efficacité.

Une aile oscillante peut être décrite comme une surface portante subissant simultanément un mouvement de tangage $\theta(t)$ et de pilonnement $h(t)$ comme montré dans la

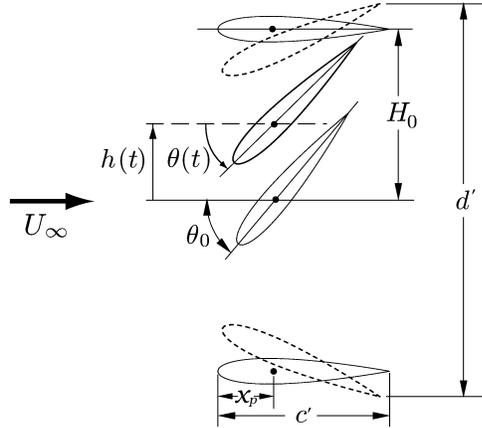


Figure 1: Mouvements de tangage et de pilonnement imposés.

figure 1. En prenant un axe de rotation situé sur la ligne de corde à la position x_p du bord d'attaque, le mouvement de l'aile peut être exprimé par les équations (1) et (2) si l'on souhaite obtenir un mouvement sinusoïdal [5].

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\gamma t) \quad (1)$$

$$h(t) = H_0 \sin(\gamma t + \phi) \quad (2)$$

où θ_0 et H_0 sont respectivement les amplitudes de tangage et de pilonnement, γ la fréquence angulaire et ϕ l'angle de déphasage entre les deux fonctions. La vitesse du fluide libre bien en aval de l'aile oscillante, U_∞ , est aussi indiquée dans la figure 1. Des résultats récents [5] ont montré que l'efficacité maximale du système est atteinte pour une amplitude de tangage, θ_0 , de 75° et pour une amplitude de pilonnement d'une corde, $H_0 = c'$, où c' est la longueur du profil de l'aile (figure 1). Durant ce travail, il est posé que $c' = 0,5 m$, sauf pour le chapitre 6 qui utilise les spécifications d'un cas particulier reproduites dans l'annexe D. Aussi, tel que vu dans la figure 1, seuls les profils symétriques sont considérés dans cette étude et ϕ est maintenu constant à 90° puisque le tangage est nul pour le pilonnement maximal.

Il est maintenant demandé de trouver un mécanisme qui peut reproduire ce type de mouvement en plus de pouvoir transmettre le plus efficacement possible l'énergie cinétique de l'aile à un ou plusieurs alternateurs. Ce mémoire sera donc un résumé des démarches entreprises dans la recherche et l'élaboration de ce type de mécanisme. D'abord, une analyse du mécanisme proposé sera conduite afin d'émettre des recommandations sur celui-ci. Suivra ensuite une recherche d'architectures pouvant reproduire le mouvement d'aile souhaité, de laquelle seront retenus deux mécanismes : Valkyrie 2 et AEGIR. Ceux-ci seront alors analysés à leur tour ainsi que leur utilisation respective dans un système d'ailes oscillantes en tandem, ce qui viendra finalement compléter l'étude.

Chapitre 1

Étude de l'aile oscillante à auto-compensation

Tout ce qui ne te détruit pas te rend plus fort.

Nietzsche

Dans ce chapitre, la cinématique de l'aile oscillante à auto-compensation sera analysée. En effet, il a été proposé par Maxime Lambert Bolduc de considérer son mécanisme [3] en vue d'effectuer le contrôle de l'aile oscillante. Un examen de l'appareil suggéré devra donc d'abord être présenté. Ensuite, une étude du dimensionnement des membrures de celui-ci sera accomplie afin de se rapprocher de la trajectoire et de la courbe d'orientation de l'aile prescrite. Finalement, une recommandation sera effectuée sur la viabilité de cette solution.

1.1 Examen du système d'aile oscillante à auto-compensation

1.1.1 Définition du mécanisme

L'architecture du mécanisme proposé par Éolo en la personne de Maxime Lambert Bolduc est présentée dans sa demande de brevets au Canada [3] et aux États-Unis [18]. Il est donc nécessaire d'aller consulter les dessins techniques s'y trouvant afin de pouvoir commencer l'examen du système d'aile oscillante à auto-compensation. La demande canadienne complète a été prise sur le site internet de l'Office de la propriété intellectuelle du Canada [3] et est reproduite dans l'annexe A, mais un aperçu du système est donné avec les figures 1.1 et 1.2. Celles-ci nous permettent de tirer les dimensions proposées pour les membrures en supposant que les dessins sont à l'échelle. Il est alors possible de construire le même système dans un logiciel de modélisation, tel *Pro-Engineer*, afin d'avoir une bonne idée de son fonctionnement. Une vue de face du modèle obtenu est d'ailleurs présentée dans la figure 1.3. Il est à noter que l'hypothèse des plans à l'échelle permet seulement de poser les valeurs initiales des membrures, sa validité n'entache en rien les résultats qui seront obtenus par la suite.

De ce modèle, la partie servant à contrôler le volet sera enlevée, car elle n'affecte pas le contrôle de l'aile proprement dite. De plus, comme l'aile est solidaire d'une membrure, cette dernière seulement sera gardée, ce qui permettra d'alléger fortement le schéma en n'y incluant pas l'aile oscillante. Nous obtenons donc la figure 1.4, ce qui permet maintenant de déterminer les équations du mouvement pour ce mécanisme.

1.1.2 Dérivation du modèle mathématique

En se basant sur la figure 1.4, nous pouvons distinguer deux boucles composées d'un mécanisme à quatre barres : la boucle ACDB et la boucle EFGD. Chacune de ces boucles nous permet d'obtenir un angle directement relié à la cinématique de l'aile. La boucle ACDB nous donne l'angle φ qui permet d'obtenir la position de l'aile en fonction de la position de la bielle \overline{AC} , θ_1 , alors que la boucle EFGD nous fait connaître la valeur de l'orientation de l'aile, θ , en fonction de θ_1 .

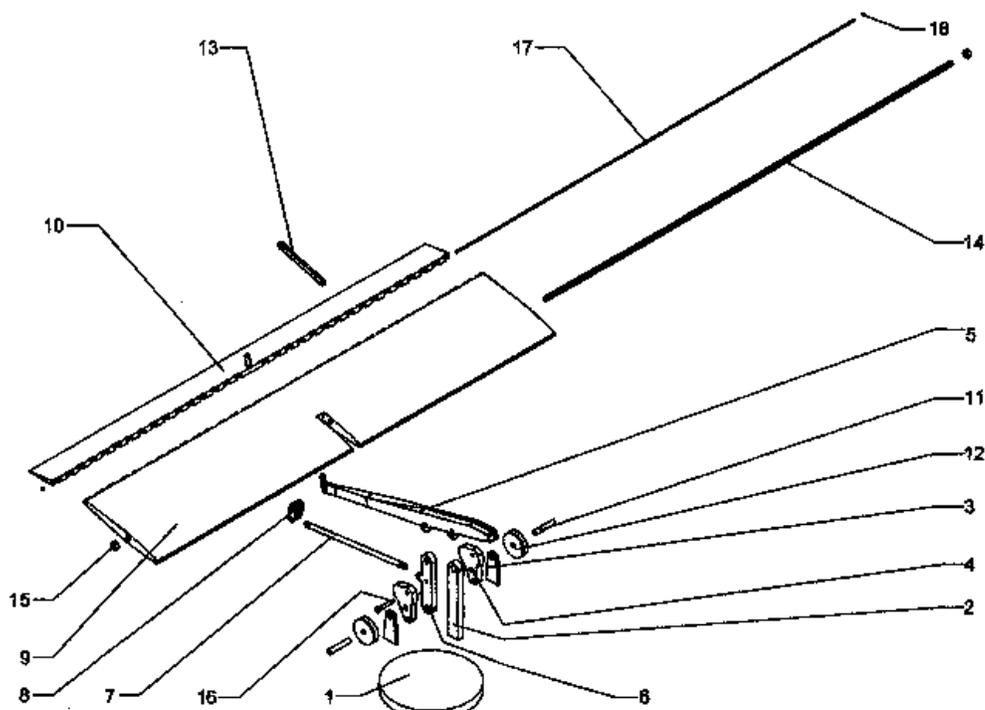


Figure 7

Figure 1.1: Vue isométrique éclatée de l'aile oscillante à auto-compensation.

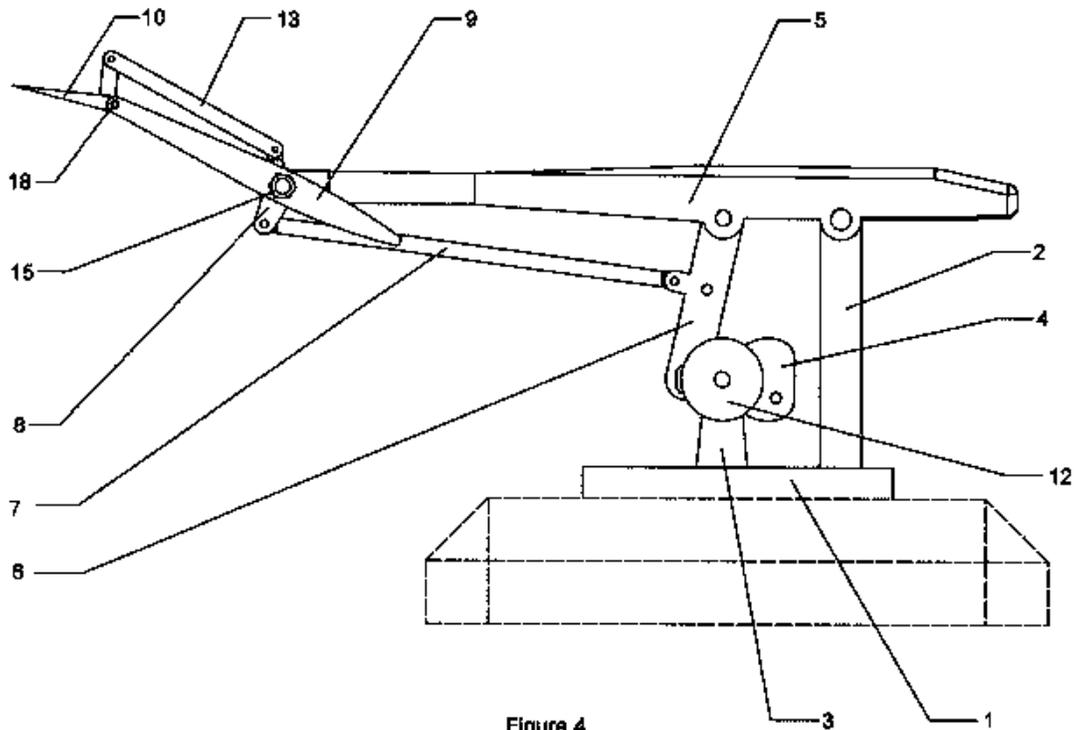


Figure 4

Figure 1.2: Vue de face de l'aile oscillante à auto-compensation.

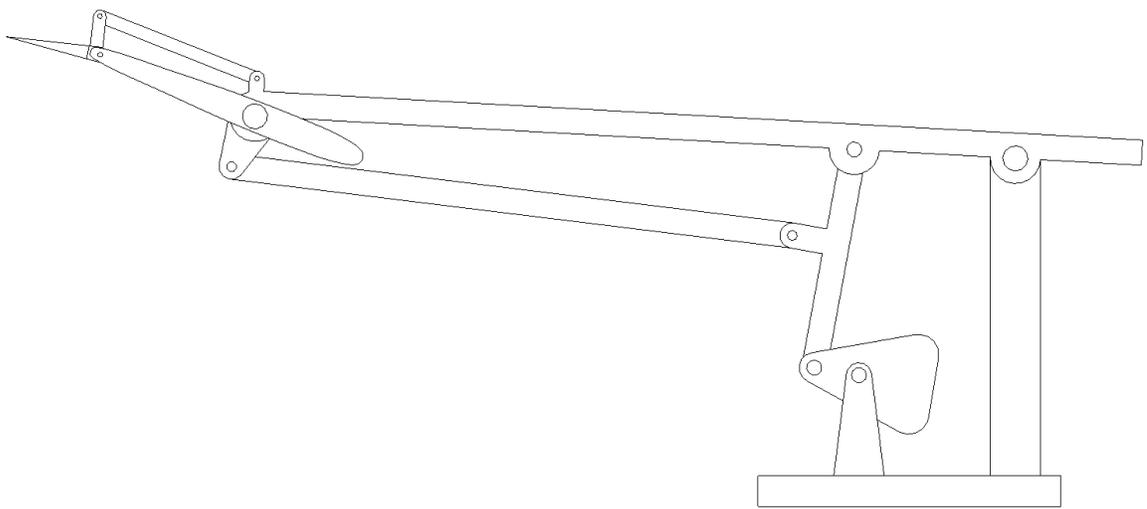


Figure 1.3: Vue de face du mécanisme modélisé dans *Pro-Engineer*.

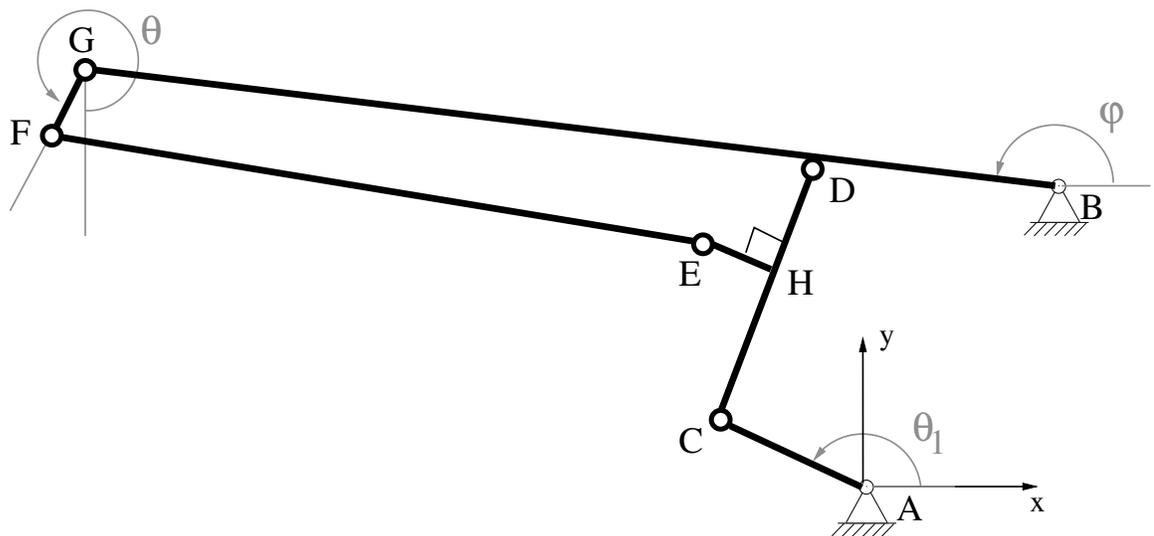


Figure 1.4: Schéma du mécanisme de l'aile oscillante à auto-compensation.

1.1.2.1 Analyse de la boucle ACDB

La boucle ACDB est un mécanisme simple à quatre barres dont deux des articulations sont fixes. L'équation suivante peut donc être trouvée :

$$\overline{CD}^2 = (D_x - C_x)^2 + (D_y - C_y)^2 \quad (1.1)$$

où C_x, C_y, D_x, D_y désignent les coordonnées x et y des points C et D respectivement.

Avec les équations des variables en fonction des angles connus :

$$C_x = A_x + \overline{AC} \cos \theta_1 \quad (1.2)$$

$$C_y = A_y + \overline{AC} \sin \theta_1 \quad (1.3)$$

$$D_x = B_x + \overline{BD} \cos \varphi \quad (1.4)$$

$$D_y = B_y + \overline{BD} \sin \varphi \quad (1.5)$$

où A_x, A_y, B_x, B_y désignent les coordonnées x et y des points A et B respectivement.

En mettant l'origine du repère fixe en A, $A_x = 0$ et $A_y = 0$, donc :

$$B_x^2 + B_y^2 = \overline{AB}^2. \quad (1.6)$$

Il est alors possible de substituer les équations (1.2) à (1.5) dans l'équation (1.1) afin d'obtenir :

$$\begin{aligned} \overline{CD}^2 - \overline{AC}^2 - \overline{BD}^2 - \overline{AB}^2 + 2\overline{AC} (B_x \cos \theta_1 + B_y \sin \theta_1) = \\ 2\overline{BD} (B_x - \overline{AC} \cos \theta_1) \cos \varphi + 2\overline{BD} (B_y - \overline{AC} \sin \theta_1) \sin \varphi \end{aligned} \quad (1.7)$$

ce qui correspond à :

$$C_1 = A_1 \cos \varphi + B_1 \sin \varphi \quad \text{où : } \begin{cases} A_1 = 2\overline{BD} (B_x - \overline{AC} \cos \theta_1) \\ B_1 = 2\overline{BD} (B_y - \overline{AC} \sin \theta_1) \\ C_1 = \overline{CD}^2 - \overline{AC}^2 - \overline{BD}^2 - \overline{AB}^2 \\ \quad + 2\overline{AC} (B_x \cos \theta_1 + B_y \sin \theta_1). \end{cases} \quad (1.8)$$

On obtient donc, selon le résultat de l'annexe B :

$$\cos \varphi = \frac{A_1 C_1 - k_1 B_1 \sqrt{\Delta_1}}{A_1^2 + B_1^2} \quad \text{où : } \begin{cases} k_1 = \pm 1 \text{ selon la branche choisie} \\ \Delta_1 = A_1^2 + B_1^2 - C_1^2 \end{cases} \quad (1.9)$$

$$\sin \varphi = \frac{B_1 C_1 + k_1 A_1 \sqrt{\Delta_1}}{A_1^2 + B_1^2}. \quad (1.10)$$

Nous pouvons donc déterminer la valeur de φ pour tout θ_1 donné. Lors du dimensionnement des membrures, la fonction décrivant θ_1 selon φ sera nécessaire. C'est en effet cette variable qui sera imposée puisqu'elle est liée à la position verticale de l'aile. Il s'agit alors d'utiliser l'équation (1.1) afin de trouver :

$$C_2 = A_2 \cos \theta_1 + B_2 \sin \theta_1 \quad \text{où :} \quad \begin{cases} A_2 = 2 \overline{AC} (B_x + \overline{BD} \cos \varphi) \\ B_2 = 2 \overline{AC} (B_y + \overline{BD} \sin \varphi) \\ C_2 = \overline{AB}^2 + \overline{AC}^2 + \overline{BD}^2 - \overline{CD}^2 \\ \quad + 2 \overline{BD} (B_x \cos \varphi + B_y \sin \varphi). \end{cases} \quad (1.11)$$

On obtient donc, encore selon le résultat de l'annexe B :

$$\cos \theta_1 = \frac{A_2 C_2 - k_2 B_2 \sqrt{\Delta_2}}{A_2^2 + B_2^2} \quad \text{où :} \quad \begin{cases} k_2 = \pm 1 \text{ selon la branche choisie} \\ \Delta_2 = A_2^2 + B_2^2 - C_2^2 \end{cases} \quad (1.12)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{B_2 C_2 + k_2 A_2 \sqrt{\Delta_2}}{A_2^2 + B_2^2}. \quad (1.13)$$

1.1.2.2 Analyse de la boucle EFGD

Bien que la boucle EFGD soit aussi un mécanisme à quatre barres, elle représente un niveau de complexité accru puisque toutes ses articulations sont mobiles dans le plan XY. Il s'ensuit qu'il faut d'abord déterminer l'équation régissant le point E afin de pouvoir ensuite définir la formule découlant de la géométrie de la boucle.

$$\text{Puisque } \mathbf{h} = \mathbf{c} + \mathbf{h}_c \text{ et que } \mathbf{h}_c = \frac{\overline{CH}}{\overline{CD}} \mathbf{d}_c$$

$$\text{avec } \mathbf{d}_c = \begin{bmatrix} D_x - C_x \\ D_y - C_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x + \overline{BD} \cos \varphi - \overline{AC} \cos \theta_1 \\ B_y + \overline{BD} \sin \varphi - \overline{AC} \sin \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (1.14)$$

$$\text{nous obtenons } \mathbf{h} = \begin{bmatrix} \overline{AC} \cos \theta_1 \\ \overline{AC} \sin \theta_1 \end{bmatrix} + \frac{\overline{CH}}{\overline{CD}} \begin{bmatrix} B_x + \overline{BD} \cos \varphi - \overline{AC} \cos \theta_1 \\ B_y + \overline{BD} \sin \varphi - \overline{AC} \sin \theta_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{h} = \frac{\overline{CH}}{\overline{CD}} \begin{bmatrix} B_x + \overline{BD} \cos \varphi + \overline{AC} \left(\frac{\overline{CD}}{\overline{CH}} - 1 \right) \cos \theta_1 \\ B_y + \overline{BD} \sin \varphi + \overline{AC} \left(\frac{\overline{CD}}{\overline{CH}} - 1 \right) \sin \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (1.15)$$

$$\text{De plus, } \mathbf{e}_h = \frac{\overline{HE}}{\overline{CD}} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{d}_c$$

$$\mathbf{e}_h = \frac{\overline{HE}}{\overline{CD}} \begin{bmatrix} -B_y - \overline{BD} \sin \varphi + \overline{AC} \sin \theta_1 \\ B_x + \overline{BD} \cos \varphi - \overline{AC} \cos \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (1.16)$$

$$\text{et } \mathbf{e} = \mathbf{h} + \mathbf{e}_h, \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} \text{donc } \mathbf{e} = & \frac{\overline{CH}}{\overline{CD}} \begin{bmatrix} B_x + \overline{BD} \cos \varphi + \overline{AC} \left(\frac{\overline{CD}}{\overline{CH}} - 1 \right) \cos \theta_1 \\ B_y + \overline{BD} \sin \varphi + \overline{AC} \left(\frac{\overline{CD}}{\overline{CH}} - 1 \right) \sin \theta_1 \end{bmatrix} \\ & + \frac{\overline{HE}}{\overline{CD}} \begin{bmatrix} -B_y - \overline{BD} \sin \varphi + \overline{AC} \sin \theta_1 \\ B_x + \overline{BD} \cos \varphi - \overline{AC} \cos \theta_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.18)$$

où \mathbf{c} , \mathbf{e} , \mathbf{h} sont les vecteurs reliant l'origine du repère fixe aux points C, E et H respectivement, alors que \mathbf{d}_c , \mathbf{e}_h , \mathbf{h}_c désignent les vecteurs reliant le point C au point D, le point H au point E et le point C au point H respectivement.

À partir de la géométrie de la boucle EFGD, il peut être prouvé que :

$$\overline{EF}^2 = (F_x - E_x)^2 + (F_y - E_y)^2 \quad (1.19)$$

où E_x, E_y, F_x, F_y désignent les coordonnées x et y des points E et F respectivement.

Avec les coordonnées de F en fonction des angles connus :

$$F_x = B_x + \overline{BG} \cos \varphi + \overline{FG} \sin \theta \quad (1.20)$$

$$F_y = B_y + \overline{BG} \sin \varphi - \overline{FG} \cos \theta \quad (1.21)$$

l'équation (1.19) devient :

$$\begin{aligned} \overline{EF}^2 = & \left[B_x + \overline{BG} \cos \varphi + \overline{FG} \sin \theta - \frac{\overline{CH}}{\overline{CD}} \left(B_x + \overline{BD} \cos \varphi + \overline{AC} \left(\frac{\overline{CD}}{\overline{CH}} - 1 \right) \cos \theta_1 \right) \right. \\ & \left. - \frac{\overline{HE}}{\overline{CD}} (-B_y - \overline{BD} \sin \varphi + \overline{AC} \sin \theta_1) \right]^2 + \left[B_y + \overline{BG} \sin \varphi - \overline{FG} \cos \theta \right. \\ & \left. - \frac{\overline{CH}}{\overline{CD}} \left(B_y + \overline{BD} \sin \varphi + \overline{AC} \left(\frac{\overline{CD}}{\overline{CH}} - 1 \right) \sin \theta_1 \right) - \frac{\overline{HE}}{\overline{CD}} (B_x + \overline{BD} \cos \varphi - \overline{AC} \cos \theta_1) \right]^2. \end{aligned} \quad (1.22)$$

Ce qui donne :

$$C_3 = A_3 \cos \theta + B_3 \sin \theta \quad (1.23)$$

où :

$$\begin{aligned} A_3 = & 2\overline{CD}\overline{FG} (\overline{HE}\overline{Bx} + (-\overline{CD} + \overline{CH})\overline{By} + (\overline{BD}\overline{CH} - \overline{BG}\overline{CD}) \sin \varphi \\ & + \overline{HE}\overline{BD} \cos \varphi - \overline{HE}\overline{AC} \cos \theta_1 + \overline{AC} (\overline{CD} - \overline{CH}) \sin \theta_1) \end{aligned} \quad (1.24)$$

$$\begin{aligned} B_3 = & 2\overline{CD}\overline{FG} ((\overline{CD} - \overline{CH})\overline{Bx} + \overline{HE}\overline{By} + (\overline{BG}\overline{CD} - \overline{BD}\overline{CH}) \cos \varphi \\ & + \overline{HE}\overline{BD} \sin \varphi - \overline{HE}\overline{AC} \sin \theta_1 + \overline{AC} (\overline{CH} - \overline{CD}) \cos \theta_1) \end{aligned} \quad (1.25)$$

$$\begin{aligned} C_3 = & \overline{EF}^2 \overline{CD}^2 - (\overline{BG}\overline{CD} - \overline{BD}\overline{CH})^2 - \overline{FG}^2 \overline{CD}^2 - (\overline{AB}^2 + \overline{AC}^2) (\overline{CD} - \overline{CH})^2 \\ & - (\overline{AB}^2 + \overline{BD}^2 + \overline{AC}^2) \overline{HE}^2 - 2 (\overline{BG}\overline{CD} - \overline{BD}\overline{CH}) [B_x (\overline{CD} - \overline{CH}) \\ & - \overline{AC} (\overline{CD} - \overline{CH}) \cos \theta_1 + \overline{HE} B_y + \overline{HE}\overline{BD} \sin \varphi - \overline{HE}\overline{AC} \sin \theta_1] \cos \varphi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -2 \overline{HE} \overline{BD} [B_x (\overline{CD} - \overline{CH}) - \overline{AC} (\overline{CD} - \overline{CH}) \cos \theta_1 + \overline{HE} B_y \\
& - \overline{HE} \overline{AC} \sin \theta_1] \sin \varphi + 2 \overline{HE} \overline{AC} [B_x (\overline{CD} - \overline{CH}) + \overline{HE} B_y] \sin \theta_1 \\
& + 2 \overline{AC} (\overline{CD} - \overline{CH}) [B_x (\overline{CD} - \overline{CH}) + \overline{HE} B_y - \overline{HE} \overline{AC} \sin \theta_1] \cos \theta_1 \\
& - 2 (\overline{BG} \overline{CD} - \overline{BD} \overline{CH}) [B_y (\overline{CD} - \overline{CH}) - \overline{AC} (\overline{CD} - \overline{CH}) \sin \theta_1 \\
& - \overline{HE} B_x - \overline{HE} \overline{BD} \cos \varphi + \overline{HE} \overline{AC} \cos \theta_1] \sin \varphi \\
& + 2 \overline{HE} \overline{BD} [B_y (\overline{CD} - \overline{CH}) - \overline{AC} (\overline{CD} - \overline{CH}) \sin \theta_1 - \overline{HE} B_x \\
& + \overline{HE} \overline{AC} \cos \theta_1] \cos \varphi - 2 \overline{HE} \overline{AC} [B_y (\overline{CD} - \overline{CH}) - \overline{HE} B_x] \cos \theta_1 \\
& + 2 \overline{AC} (\overline{CD} - \overline{CH}) [B_y (\overline{CD} - \overline{CH}) - \overline{HE} B_x + \overline{HE} \overline{AC} \cos \theta_1] \sin \theta_1. \tag{1.26}
\end{aligned}$$

On obtient donc :

$$\cos \theta = \frac{A_3 C_3 - k_3 B_3 \sqrt{\Delta_3}}{A_3^2 + B_3^2} \quad \text{où : } \begin{cases} k_3 & = \pm 1 \text{ selon la branche choisie} \\ \Delta_3 & = A_3^2 + B_3^2 - C_3^2 \end{cases} \tag{1.27}$$

$$\sin \theta = \frac{B_3 C_3 + k_3 A_3 \sqrt{\Delta_3}}{A_3^2 + B_3^2}. \tag{1.28}$$

1.1.3 Courbes obtenues pour les valeurs initiales des membrures

Tel qu'il a été mentionné préalablement, les valeurs initiales ont été tirées du dessin technique montré à la figure 1.2. Celles-ci ont été inscrites dans le tableau 1.1 en supposant que l'origine du système d'axe est placé au point A, donc que $A_x = A_y = 0$.

Segments	\overline{AC}	\overline{BD}	\overline{CD}	B_x	B_y	\overline{BG}	\overline{FG}	\overline{EF}	\overline{CH}	\overline{HE}
Dimension [mm]	9	32	44	31	43	151	11	112	25	9

Tableau 1.1: Dimensions des membrures tracées dans la demande de brevet.

À partir de ces valeurs, il est maintenant possible de trouver les angles φ et θ obtenus lorsque la bielle \overline{AC} effectue un tour complet, c'est-à-dire pour $\theta_1 \in [0, 2\pi]$ rad. Comme deux branches de solution sont possibles lors du calcul de φ en fonction de θ_1 , car $k_1 = \pm 1$, et qu'à partir de ces branches la valeur de θ est calculée avec deux autres branches possibles, $k_3 = \pm 1$, nous nous retrouvons avec quatre solutions possibles. En d'autres mots, nous pouvons avoir jusqu'à quatre configurations de membrures pour un angle θ_1 donné, bien que, pour une partie du domaine, certaines des solutions ne soient pas réalisables. En effet, lorsque les angles φ et θ sont calculés selon les quatre branches envisageables, il ressort que certaines fonctions ne peuvent pas être évaluées numériquement, donc la branche choisie est irréalisable physiquement pour cet angle.

En utilisant les dimensions tirées de la demande de brevet et inscrites dans le tableau 1.1, il devient évident que les deux branches de solution de l'angle φ sont réalisables si l'on ne s'occupe que de cette boucle, tel que présenté dans les figures 1.5(a) et 1.5(b). Par contre, seule une de ses branches est valide en tenant compte de la deuxième boucle, c'est-à-dire celle où $k_1 = 1$, ce qui donne les courbes présentées dans les figures 1.6(a) et 1.6(b) pour l'angle θ . En effet, lorsque $k_1 = -1$, l'angle φ varie de -55° à -85° tel que vu dans la figure 1.5(b), ce qui rend impossible l'assemblage de la boucle EFGD par la suite. L'angle θ ne peut donc pas être calculé pour ce cas. Il est intéressant de noter que l'apparition de saut dans les figures 1.5(a) et 1.6(b) est seulement due au fait que les valeurs des angles ont été limitées à $[-180^\circ, 180^\circ]$. Par conséquent, lorsque l'angle passe de 179° à 181° , cela correspond à passer de 179° à -179° .

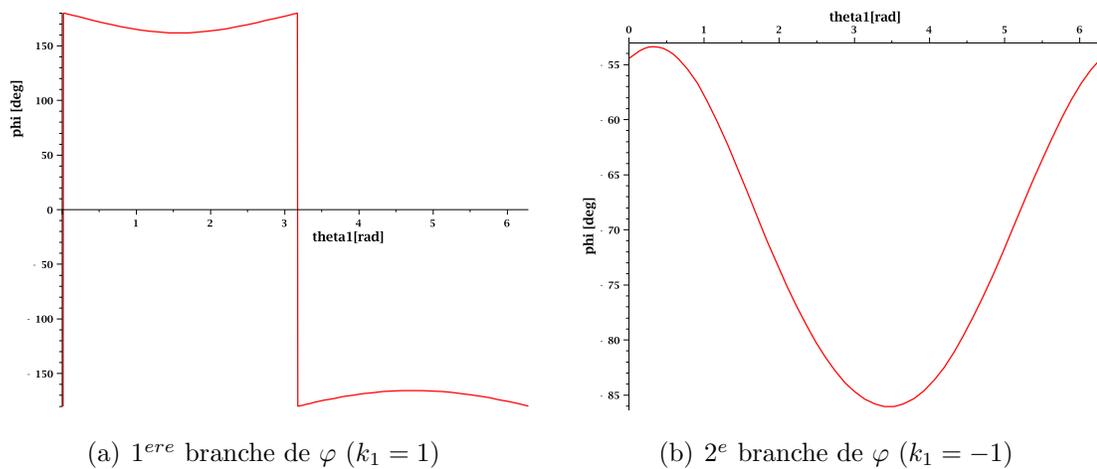


Figure 1.5: Angle φ en fonction de l'angle θ_1 selon les différentes branches de solution.

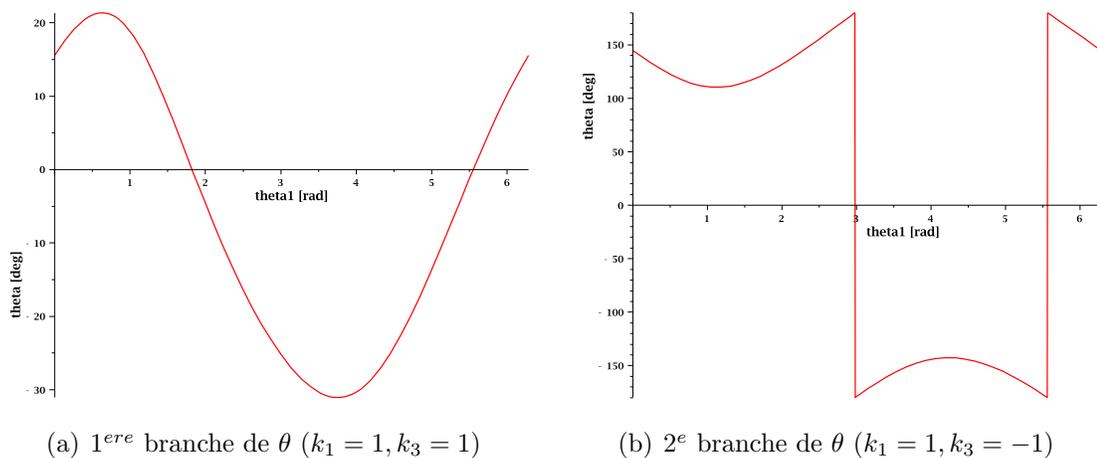


Figure 1.6: Angle θ en fonction de l'angle θ_1 selon les différentes branches de solution.

En souhaitant obtenir une configuration semblable à celle tracée dans la figure 1.4, nous devons nécessairement garder la branche de solution $k_1 = 1$ afin que la boucle EFGD puisse être assemblée, puis la branche $k_3 = 1$ afin que l'angle θ varie autour de 0° et non autour de 180° comme le fait la branche $k_3 = -1$. Maintenant, il est évident qu'une étude du dimensionnement des membrures s'impose afin d'obtenir les fonctions de sortie requises, soit des fonctions sinusoïdales tant pour l'angle de tangage de l'aile, θ , que pour l'angle de pilonnement, φ , car aucune des deux fonctions produites ne s'en approche pour l'instant (voir les figures 1.5(a) et 1.6(a)).

1.2 Étude du dimensionnement des membrures

Afin d'obtenir des fonctions s'approchant de sinusoïdes déphasées de 90° l'une de l'autre pour l'angle de tangage de l'aile, θ , et pour l'angle de pilonnement, φ , un programme *Matlab* a été conçu. Celui-ci modifie automatiquement la longueur des tiges du mécanisme d'aile oscillante à auto-compensation jusqu'à ce que l'erreur entre les fonctions demandées et celles obtenues atteigne un minimum. L'équation utilisée pour calculer l'erreur, μ , est la suivante :

$$\mu = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{h_i - h_{rep\ i}}{H_0} \right)^2 + \left(\frac{\theta_i - \theta_{rep\ i}}{\theta_0} \right)^2 \right]} \quad (1.29)$$

où h_i est la position de pilonnement demandée et $h_{rep\ i}$ est celle obtenue, alors que θ_i est la position de tangage demandée et celle obtenue est $\theta_{rep\ i}$. Tel que vu précédemment, l'amplitude de tangage est θ_0 et celle de pilonnement est H_0 .

Bien entendu, les résultats obtenus dépendent fortement des limites imposées à la longueur des membrures. Par exemple, si des contraintes très larges sont laissées à ces dernières, l'erreur obtenue sera plus faible, mais les résultats risquent d'être inapplicables en pratique. Par contre, si l'on veut pouvoir connaître l'erreur minimale possible pour une certaine amplitude de l'angle de tangage de l'aile, il est utile de laisser une plus grande marge de possibilité au calculateur. Ainsi, les erreurs notées dans le tableau 1.3 ont été calculées avec les contraintes maximales inscrites dans le tableau 1.2. Comme les limites inscrites dans le tableau 1.2 ont été posées suite à de nombreux essais, ce dernier permet de faire ressortir les dimensions devenant rapidement disproportionnées par rapport à l'amplitude du mouvement désiré, c'est-à-dire les grandeurs \overline{BD} , B_x ,

Segments	\overline{AC}	\overline{BD}	\overline{CD}	B_x	B_y	\overline{BG}	\overline{FG}	\overline{EF}	\overline{CH}	\overline{HE}
Dimension [m]	0,2	8	0,8	8	0,8	16	0,4	15	1	0,3

Tableau 1.2: Limite supérieure des dimensions pour connaître les erreurs minimales.

Amplitude de θ	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
Erreur obtenue	0,4307	0,5664	0,7131	0,9511	0,759	0,9586	—

Tableau 1.3: Erreur obtenue selon l'amplitude de tangage demandée.

\overline{BG} et \overline{EF} . De plus, une attention particulière doit être portée lors de la lecture du tableau 1.3. En effet, l'erreur obtenue pour l'amplitude de 70° n'a pas été indiquée puisqu'une partie de la courbe de la position angulaire de l'aile, θ , se trouve dans le domaine complexe. Suite à une étude plus poussée dans cette région d'amplitude, il a été déterminé que l'amplitude maximale pouvant être atteinte sans tomber dans le domaine complexe est de 62° . L'erreur obtenue est alors de 0,9075, ce qui ne diffère pas des erreurs obtenues depuis 40° . En effet, le tableau 1.3 révèle clairement que l'erreur entre les demandes et les réponses augmente lorsque l'amplitude de la courbe de l'orientation de l'aile augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne un plateau à partir de 40° . Les graphes de l'angle de tangage de l'aile, θ , de son angle de pilonnement, φ , de la position verticale de l'aile et de la position angulaire de la membrure \overline{AC} , θ_1 , ont d'ailleurs été placés dans l'annexe C.

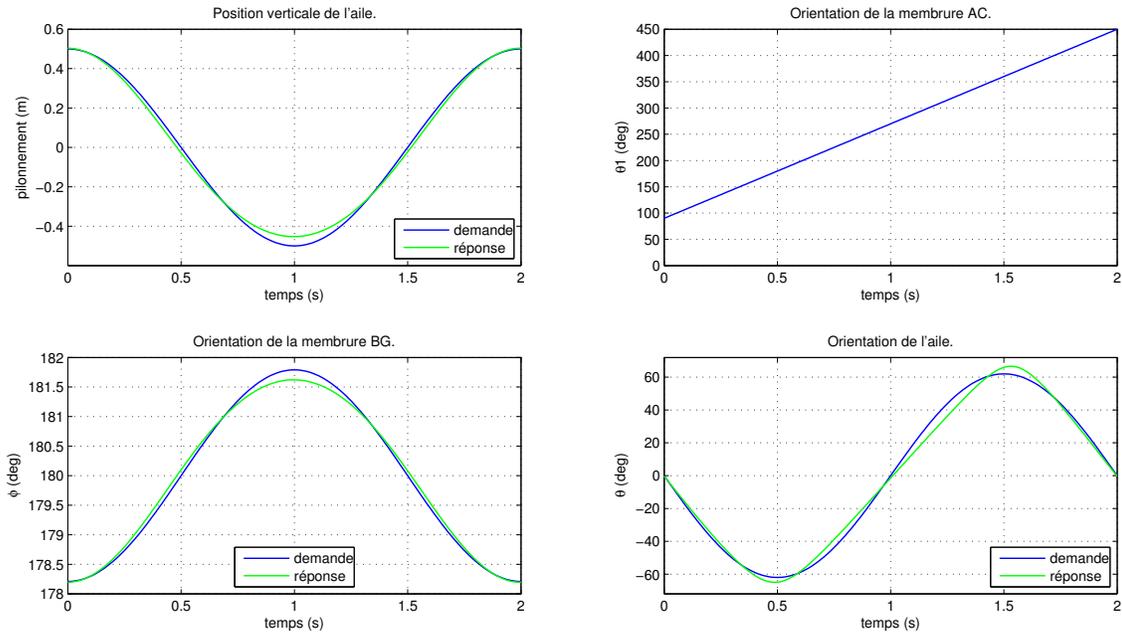
Maintenant que la plage d'amplitude admissible est connue ainsi que ses erreurs minimales associées, il est possible de calculer des dimensions plus acceptables pour les membrures ainsi que l'erreur qu'elles entraînent. Afin d'obtenir l'amplitude de la fonction θ la plus élevée possible, il est utile de vérifier premièrement l'angle de 62° avec les nouvelles contraintes tel qu'elles sont indiquées dans le tableau 1.4. Nous obtenons alors des dimensions pour le système d'aile oscillante à auto-orientation pouvant être utilisées physiquement. Les résultats obtenus sont d'ailleurs transcrits dans le tableau 1.5 et l'erreur calculée est maintenant de 1,825. En utilisant ces dimensions de membrures, il est possible d'obtenir les graphes présentant la position verticale et angulaire de l'aile de même que ceux indiquant la position de la membrure \overline{AC} et du levier \overline{BG} , tel que le montre la figure 1.7.

Segments	\overline{AC}	\overline{BD}	\overline{CD}	B_x	B_y	\overline{BG}	\overline{FG}	\overline{EF}	\overline{CH}	\overline{HE}
Dimension [m]	0,2	0,6	0,8	0,6	0,8	3	0,2	2	0,5	0,2

Tableau 1.4: Limite supérieure des dimensions pour obtenir des résultats applicables.

Segments	\overline{AC}	\overline{BD}	\overline{CD}	B_x	B_y
Dimension [m]	0,105	0,5977	0,1945	0,6	0,1784
Segments	\overline{BG}	\overline{FG}	\overline{EF}	\overline{CH}	\overline{HE}
Dimension [m]	2,622	0,02504	2	0,1538	0,02598

Tableau 1.5: Dimensions des membrures respectant les contraintes du tableau 1.4.

Figure 1.7: Graphes obtenus pour une amplitude de θ de 62° .

Afin de pouvoir visualiser le mécanisme d'aile oscillante à auto-compensation comportant les dimensions obtenues, le système a été modélisé dans *Pro-Engineer*. La figure 1.8 est d'ailleurs la vue de face de ce modèle. Il y est maintenant évident que les grandeurs \overline{BD} , B_x , \overline{BG} et \overline{EF} tel que définis dans la figure 1.4 sont celles que le programme *Matlab* a tendance à augmenter afin de diminuer l'erreur entre les fonctions demandées et obtenues. La longueur de la membrure \overline{BG} , 2,622 mètres, semble assez grande, toutefois nous la croyons acceptable puisque le système permet d'obtenir un pignonement total de 1 mètre. Il faut cependant se rappeler qu'il est possible d'obtenir des grandeurs différentes en modifiant les bornes supérieures des dimensions du système.

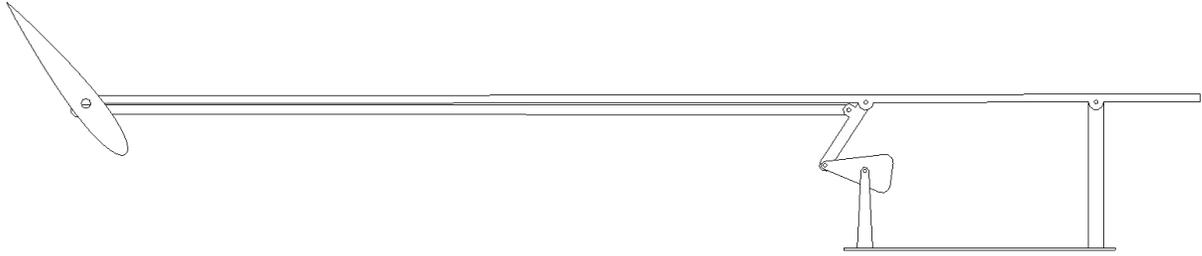


Figure 1.8: Mécanisme modélisé selon les dimensions du tableau 1.5.

1.3 Commentaires sur le système d'aile oscillante à auto-compensation

Ce chapitre nous a permis de survoler l'analyse de la cinématique du système d'aile oscillante à auto-orientation. L'architecture du mécanisme fut d'abord présentée en se basant sur les dessins techniques trouvés sur le site internet de l'Office de la propriété intellectuelle du Canada [3] et reproduits dans l'annexe A. Ensuite, des équations caractérisant ce système furent établies afin de déterminer les fonctions représentant la trajectoire suivie par l'aile ainsi que son orientation. Un programme a alors été mis au point pour trouver les dimensions à donner aux membrures afin d'obtenir les fonctions de sortie désirées.

Il a ainsi été établi qu'on ne pouvait pas obtenir d'angle de tangage de l'aile plus élevé que 62° si l'on veut garder une réponse se rapprochant d'une sinusoïde. De plus, les grandeurs \overline{BD} , B_x , \overline{BG} et \overline{EF} tendent à devenir rapidement disproportionnées lorsqu'on essaie de minimiser la différence entre la demande et la fonction obtenue. Il faut aussi prendre en compte que le système, une fois monté, ne peut effectuer d'autres trajectoires de pilonnement et de tangage que celle pour laquelle il a été conçu. Sa seule capacité d'adaptation aux propriétés du fluide l'entourant est la fréquence à laquelle il effectue son cycle. Cette lacune permet cependant de n'avoir recours qu'à un seul contrôleur, ce qui facilite grandement l'utilisation de ce système. L'aile oscillante à auto-compensation serait donc un principe intéressant pour les cas où l'amplitude de la fonction de tangage demandée serait fixe et plus basse que 62° . Aussi, comme l'erreur est plus importante lorsqu'on utilise des grandeurs plus applicables physiquement, il est fortement probable que ce système aurait une efficacité peu élevée en pratique. Il est donc recommandé de poursuivre l'investigation afin d'obtenir un mécanisme permettant de fortes amplitudes de tangage ainsi qu'une meilleure adaptabilité aux aléas de l'environnement.

Chapitre 2

Recherche de solutions

*Toute chose doit être faite aussi simple que possible,
mais pas plus simple.*

Albert Einstein

Suite à la constatation que le mécanisme d'Éolo [3] était déficient dans l'accomplissement de la tâche demandée, soit permettre une trajectoire sinusoïdale avec une amplitude de 75° pour l'angle de tangage de l'aile et de 0,5 mètre pour le pilonnement, une recherche de solution a dû être lancée. Différentes idées furent explorées et ce chapitre se veut une synthèse de celles-ci. Il y sera mentionné des façons de guider l'aile et de modifier son orientation d'une manière couplée ou non, c'est-à-dire d'obtenir un mécanisme à un ou à deux degrés de liberté.

2.1 Guidage de l'aile

Comme il a été demandé que l'aile suive une trajectoire la plus verticale possible, le dispositif de guidage de l'aile revêt une grande importance. Il n'est donc pas d'abord question de déterminer quelle idée utiliser, mais plutôt d'énumérer le plus grand éventail de solutions possibles, qu'elles soient simples comme dans le tableau 2.1 ou plus complexes comme dans le tableau 2.2.

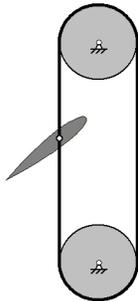
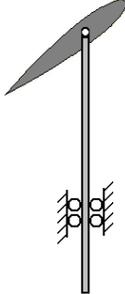
Nom	Schéma	Commentaires
Câble	 <p>Le schéma illustre un système de guidage à câble. Une aile est représentée par une forme allongée et pointue. Elle est suspendue à un câble qui passe à travers deux poulies (roues) alignées verticalement. Le câble est fixé à une tour au-dessus de la poulie supérieure et revient à la poulie inférieure, puis se fixe à une autre tour. L'aile est attachée au câble entre les deux poulies.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Câble, chaîne ou courroie ; + trajectoire verticale assurée ; – nécessite la présence d'une tour pour soutenir les 2 poulies \Rightarrow perturbation de l'écoulement accrue ; – sensible aux débris pouvant se coincer entre le câble et la poulie.
Glissière	 <p>Le schéma illustre un système à glissière. Une aile est fixée à une tige verticale. La tige est guidée par une glissière (un rail) qui est représentée par une série de lignes horizontales et verticales. L'aile est orientée vers le haut et à gauche.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Liaison prismatique ou vérin ; + peu de perturbation à l'aile ; + trajectoire verticale assurée ; – pertes par friction accrues ; – requiert beaucoup d'entretien.
Levier	 <p>Le schéma illustre un système à levier. Une aile est fixée à une tige qui pivote sur un point fixe. La tige est inclinée vers le bas et à droite. Le point de pivotement est représenté par un point noir sur la tige.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tige retenue par une liaison rotoïde ; + simple et économique ; + pertes par friction minimisées ; – nécessite la présence d'une tour jusqu'au point de rotation \Rightarrow perturbation de l'écoulement accrue ; – trajectoire circulaire \Rightarrow besoin d'un grand levier pour minimiser le déplacement horizontal.

Tableau 2.1: Mécanismes potentiels simples pour guider l'aile.

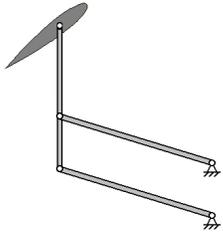
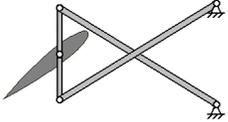
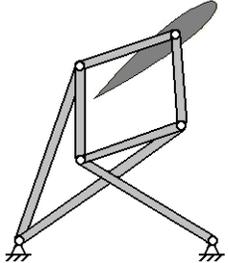
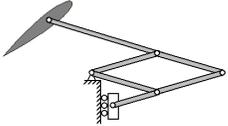
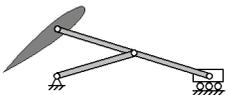
Nom	Schéma	Commentaires
Parallélogramme		<ul style="list-style-type: none"> • Composé de deux leviers en parallèle ; + peu de perturbation à l'aile ; + certaine simplicité ; – au moins deux fois plus cher que le levier ; – trajectoire circulaire \Rightarrow besoin de grands leviers pour minimiser le déplacement horizontal.
Tchébychev [19]		<ul style="list-style-type: none"> • Composé de deux leviers transversaux ; + trajectoire verticale approximée ; – au moins deux fois plus cher que le levier ; – certaine complexité de montage.
Peaucellier [19]		<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs tiges et liaisons rotoïdes ; + trajectoire verticale assurée ; – montage complexe et coûteux ; – risque de coincement accru.
Pantographe [11, 19]		<ul style="list-style-type: none"> • Liaison prismatique ou vérin ajouté à plusieurs tiges et liaisons rotoïdes ; + trajectoire verticale assurée ; – pertes en friction accrue ; – requiert beaucoup d'entretien.
Glissière-manivelle isocèles [11, 19]		<ul style="list-style-type: none"> • Liaison prismatique ou vérin avec levier ; + trajectoire verticale assurée ; – pertes en friction accrues ; – requiert beaucoup d'entretien ; – singularités potentielles.

Tableau 2.2: Mécanismes potentiels plus complexes pour guider l'aile.

2.2 Mécanismes à un degré de liberté

Les tableaux 2.1 et 2.2 nous permettront de choisir le mécanisme de guidage le plus approprié en fonction de la situation rencontrée. Il s'agit maintenant de déterminer le système d'orientation de l'aile qui viendra se greffer au mécanisme de guidage choisi. Tel qu'il a été mentionné auparavant, ce nouveau dispositif peut être contrôlé indépendamment ou encore être directement contraint par la position du mécanisme de guidage.

2.2.1 Ressort

Une des architectures les plus simples, comme montré à la figure 2.1, consiste à utiliser un ressort pour maintenir l'angle de l'aile en ajout au mécanisme de pilonnement. Lorsque l'aile atteint le bas ou le haut de sa trajectoire, elle frappe une butée, ce qui vient inverser son angle de tangage.

Cette simplicité peut sembler attrayante, mais la courbe ainsi obtenue pour le tangage est loin d'être une sinusoïde. De plus, les chocs répétés aux butées viennent déstabiliser l'écoulement autour de l'aile, ce qui diminuera certainement l'efficacité du système.

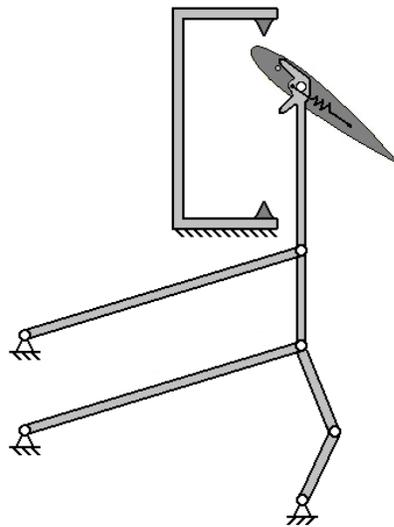


Figure 2.1: Mécanisme avec un ressort.

2.2.2 Valkyrie 1

De manière à éliminer les butées, on pourrait proposer de guider le tangage de l'aile avec le même système qui contrôle le pilonnement. Après tout, les deux courbes sont simplement des sinusoides qui sont déphasées une par rapport à l'autre. En utilisant la première barre, la manivelle, comme entrée pour le tangage, nous obtenons un mécanisme tel que celui présenté à la figure 2.2. Malheureusement, bien que ce type d'architecture puisse produire une courbe sinusoidale pour l'angle de tangage comme pour celui de pilonnement, l'amplitude obtenue pour une fonction acceptable est autour de 20° , bien en-dessous des 75° demandés.

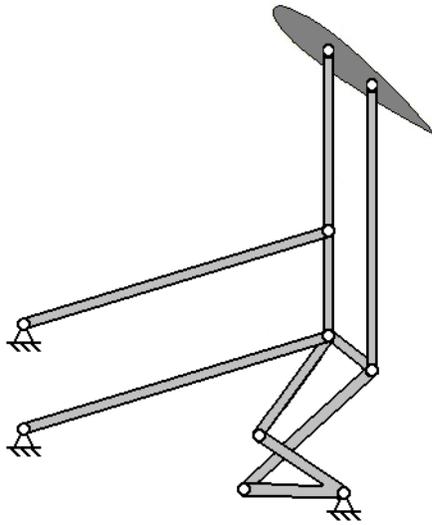


Figure 2.2: Mécanisme Valkyrie 1.

2.2.3 Parallélogramme double

Une architecture similaire peut être trouvée en utilisant la barre intermédiaire pour diriger le tangage, comme dans la figure 2.3. L'amplitude du mouvement de tangage obtenue est maintenant un peu plus grande, autour de 40° , mais pas encore satisfaisante.

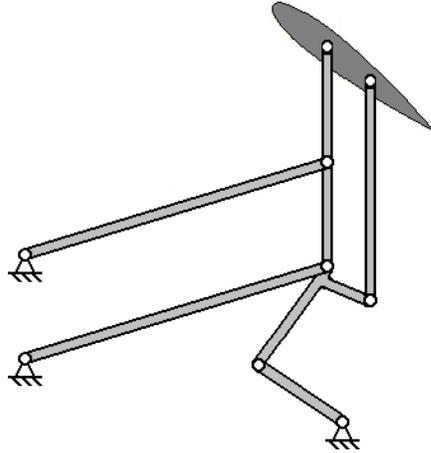


Figure 2.3: Mécanisme avec un parallélogramme double.

2.2.4 Engrenages

De manière à obtenir un mouvement de tangage similaire à celui prescrit, il a été proposé d'utiliser un arrangement d'engrenages entre le mécanisme de pilonnement et celui de tangage. Comme il peut être observé dans la figure 2.4, la barre intermédiaire est allongée pour permettre à son extrémité de glisser à travers une rainure pratiquée dans les engrenages placés de part et d'autre de la barre verticale. En faisant varier le pas des engrenages et la trajectoire de la rainure, il est possible d'obtenir la courbe de tangage désirée. Malheureusement, ce type d'architecture génère beaucoup de friction, donc son utilisation comme générateur d'énergie électrique n'est pas recommandée.

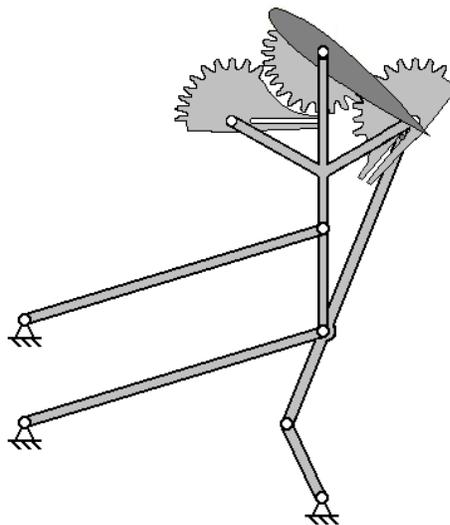


Figure 2.4: Mécanisme avec des engrenages.

2.3 Mécanismes à deux degrés de liberté

2.3.1 Câble en série

De manière à obtenir un meilleur contrôle de l'aile et pour garder la possibilité de modifier sa trajectoire, il a été proposé d'utiliser deux entrées : une pour diriger le pilonnement et l'autre pour le tangage. Ainsi, un mécanisme à deux degrés de liberté est requis.

La première architecture de ce type venant en tête est l'utilisation d'un actuateur linéaire, une glissière, pour diriger le pilonnement. Un actuateur rotatif serait ensuite installé sur celui-ci pour contrôler le tangage. Afin de diminuer l'inertie du système de manière à aider le changement de trajectoire de l'aile par l'actuateur linéaire, l'actuateur rotatif peut être fixé sur le sol. Des câbles de traction gainés doivent alors être utilisés pour transférer le mouvement de l'actuateur à l'aile tel que montré dans la figure 2.5.

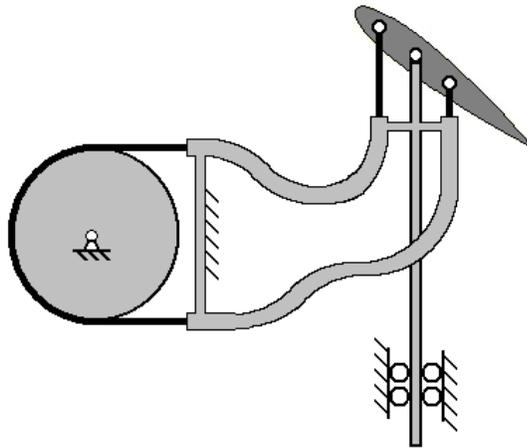


Figure 2.5: Mécanisme avec un câble en série.

Cette architecture peut alors produire théoriquement le tangage et le pilonnement demandé, mais trop de friction est impliquée. Aussi, l'utilisation d'un actuateur linéaire n'est pas recommandée dans un système de production d'électricité, car la production d'une sinusoïde par ce dernier n'est pas basée sur un cycle continu. Il faut donc freiner tout le système en bout de course pour l'accélérer ensuite dans le sens inverse. En tenant compte que le freinage peut se faire avec un alternateur, une certaine quantité

d'énergie électrique peut alors être extraite et utilisée ensuite durant l'accélération. Ce moyen n'atteindra pourtant jamais une efficacité de 100%, alors que ce sera le cas d'un mécanisme de tangage à cycle continu où le système n'a pas à être freiné. Les architectures subséquentes seront donc basées essentiellement sur des liaisons rotoïdes afin de permettre une continuité dans le cycle de tangage.

2.3.2 Câbles en parallèle

En remplaçant l'actuateur linéaire par un rotatif, nous obtenons une aile attachée à deux câbles, comme montré à la figure 2.6. Le pilonnement et le tangage sont maintenant totalement ajustables, mais, comme dans le cas de l'actuateur linéaire, le système doit être freiné à la fin de la trajectoire verticale, puis réaccélééré dans l'autre direction, ce qui vient diminuer l'efficacité du système tel qu'expliqué dans la précédente sous-section. De plus, la distance nécessaire entre les deux câbles varie en fonction de l'angle de tangage. Pour résoudre ce problème, le deuxième câble peut être allongé et, en utilisant un tensionneur, la tension dans le câble peut être gardée constante pour n'importe quel angle de l'aile. D'un autre côté, cette solution diminue la fiabilité du mécanisme déterminant l'angle de tangage. Il est donc préférable de rejeter ce mécanisme et d'étudier de nouvelles solutions.

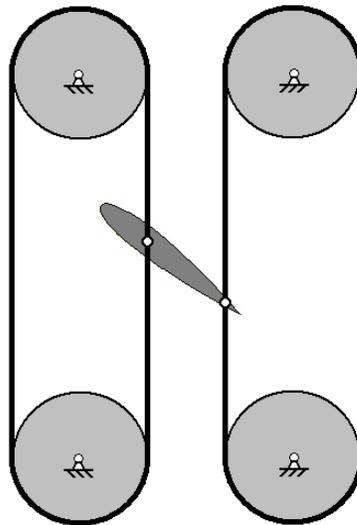


Figure 2.6: Mécanisme de câbles en parallèle.

2.3.3 Valkyrie 2

Puisque le mécanisme sera construit pour devenir un générateur électrique, les moteurs électriques seront massifs et doivent donc être placés sur le sol, comme dans les dernières architectures présentées ci-dessus. En outre, comme il a été exposé dans la définition du mécanisme de câble en série à la sous-section 2.3.1, l'utilisation d'un mécanisme à deux degrés de liberté est préférable. Un manipulateur parallèle est par conséquent la meilleure solution [15].

Une architecture répondant à ces critères fut alors proposée et dénommée Valkyrie 2, tel que montré à la figure 2.7. Des mécanismes semblables à celle-ci ont d'ailleurs été analysés dans la littérature [6, 7, 8, 10, 11, 15, 19]. Une architecture simplifiée mais équivalente peut alors être esquissée tel que montré à la figure 2.8 afin de mettre en évidence les liaisons contraignant la trajectoire de l'aile. En effet, puisque l'aile dans Valkyrie 2 est seulement décalée au-dessus du mécanisme principal par l'utilisation de parallélogrammes, les équations reliant le mouvement prescrit $h(t)$ et $\theta(t)$ avec les variables d'entrée $\theta_1(t)$ et $\theta_2(t)$ sont les mêmes pour ces deux architectures. Il est maintenant évident que nous avons obtenu un mécanisme semblable à ceux du groupe d'Assur qui est bien documenté dans la littérature [9, 12, 16, 17].

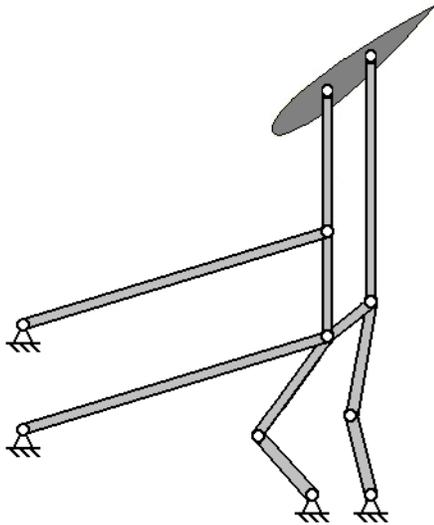


Figure 2.7: Mécanisme Valkyrie 2.

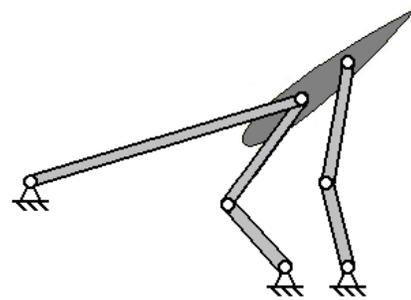


Figure 2.8: Mécanisme Valkyrie 2 simplifié.

2.3.4 AEGIR

Depuis Valkyrie 2, il est possible de créer un mécanisme plus facile à contrôler en découplant la fonction de contrôle du tangage de celle du pilonnement. Nous devons maintenant utiliser un câble et des poulies ou encore deux paires d'engrenages à 45° reliées par un arbre afin de contrôler l'angle de tangage de l'aile. Le mécanisme obtenu, nommé AEGIR, est montré à la figure 2.9.

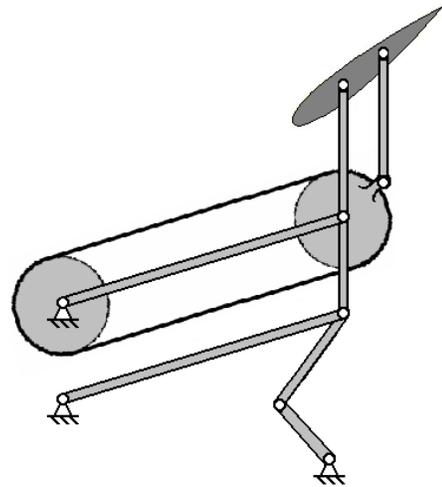


Figure 2.9: Mécanisme AEGIR.

2.4 Discussion sur la recherche de solutions

Comme il a été discuté précédemment, l'utilisation d'un actuateur linéaire n'est pas recommandée dans un système de production d'électricité, car la production d'une sinusoïde par ce dernier n'est pas basée sur un mouvement continu. Aussi, la production du mouvement désiré pour l'angle de tangage et pour le pilonnement avec un mécanisme à un degré de liberté nécessite l'utilisation d'engrenages, soit pour amplifier le mouvement obtenu avec une architecture à un degré de liberté, soit pour coupler le mouvement entre les deux entrées d'une architecture à deux degrés de liberté.

Si l'on utilise un mécanisme à deux degrés de liberté, les architectures Valkyrie 2 et AEGIR semblent prometteuses. La première permet d'utiliser seulement des barres pour contrôler l'aile, alors que la seconde permet un contrôle découplé pour le tangage et le pilonnement. Il est donc intéressant d'approfondir ces deux solutions afin de pouvoir décrire leur comportement cinématique et dynamique.

Chapitre 3

Étude du mécanisme Valkyrie 2

Science sans conscience n'est que ruine de l'âme.

Rabelais, Pantagruel

Dans ce chapitre, la cinématique et la dynamique du mécanisme Valkyrie 2 seront analysées. Un examen de l'appareil suggéré devra donc d'abord être présenté. Ensuite, les équations régissant la cinématique de celui-ci seront établies. Suivra alors l'établissement des expressions décrivant la dynamique du système Valkyrie 2. Une étude du dimensionnement des membrures pourra donc être accomplie afin de se rapprocher de la trajectoire et de la courbe d'orientation de l'aile prescrite. Les courbes des couples produits aux deux alternateurs seront par la suite tracées selon les longueurs de bielles obtenues. Finalement, des commentaires seront effectués sur les propriétés de cette solution.

3.1 Définition du mécanisme

L'architecture du mécanisme Valkyrie 2 fut trouvée durant la recherche de solutions, elle est d'ailleurs commentée dans la sous-section 2.3.3 du chapitre 2. À partir du mécanisme proposé, tel qu'il est représenté dans la figure 3.1, il est possible d'obtenir la figure 3.2 qui est cinématiquement équivalente, comme il a été prouvé dans la sous-section 2.3.3. Cette représentation peut alors être schématisée en la figure 3.3 afin de pouvoir déterminer les équations mathématiques décrivant les mouvements de ce système.

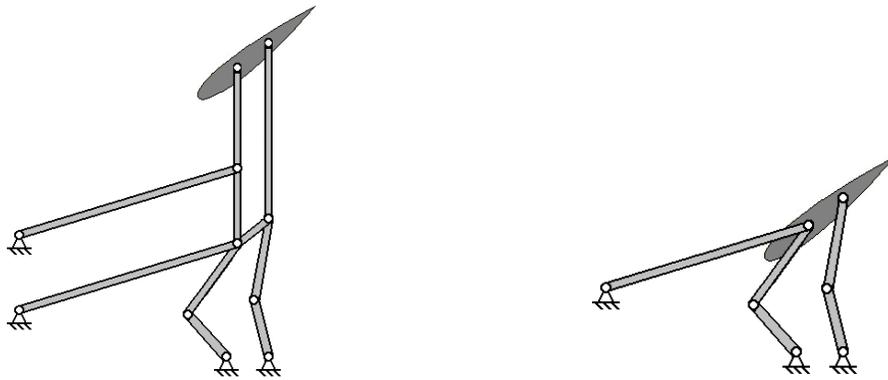


Figure 3.1: Mécanisme Valkyrie 2.

Figure 3.2: Mécanisme Valkyrie 2 simplifié.

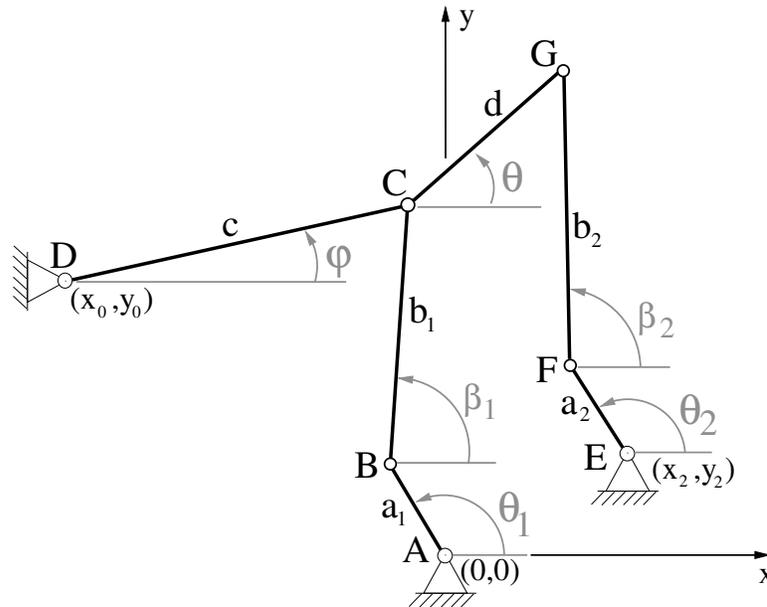


Figure 3.3: Schéma du mécanisme Valkyrie 2 simplifié.

3.2 Dérivation des équations cinématiques

En se basant sur la figure 3.3, nous pouvons distinguer deux boucles : la boucle ABCD et la boucle EFGCD. Chacune de ces boucles nous permet d'obtenir un angle directement relié à la cinématique de l'aile. La boucle ABCD nous donne l'angle φ qui permet d'obtenir la position de l'aile en fonction de la position de la bielle \overline{AB} , θ_1 , alors que la boucle EFGCD nous fait connaître la valeur de l'orientation de l'aile, θ , en fonction de la position de la bielle \overline{EF} , θ_2 .

3.2.1 Analyse de la boucle ABCD

La boucle ABCD est un mécanisme simple à quatre barres dont deux des articulations sont fixes. Les équations (3.1) et (3.2) peuvent donc être trouvées.

$$\text{EN X : } c \cos \varphi + x_0 = a_1 \cos \theta_1 + b_1 \cos \beta_1. \quad (3.1)$$

$$\text{EN Y : } c \sin \varphi + y_0 = a_1 \sin \theta_1 + b_1 \sin \beta_1. \quad (3.2)$$

En faisant passer les termes en θ_1 dans le membre de gauche de l'équation et en additionnant les carrés des équations membre à membre, on obtient :

$$b_1^2 = (c \cos \varphi + x_0 - a_1 \cos \theta_1)^2 + (c \sin \varphi + y_0 - a_1 \sin \theta_1)^2. \quad (3.3)$$

Nous pouvons développer l'équation (3.3) pour obtenir :

$$\begin{aligned} x_0^2 + y_0^2 + a_1^2 - b_1^2 + c^2 + 2c(x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi) = \\ 2a_1(x_0 + c \cos \varphi) \cos \theta_1 + 2a_1(y_0 + c \sin \varphi) \sin \theta_1, \end{aligned} \quad (3.4)$$

ce qui correspond à :

$$C_1 = A_1 \cos \theta_1 + B_1 \sin \theta_1 \quad \text{où : } \begin{cases} A_1 = 2a_1(x_0 + c \cos \varphi) \\ B_1 = 2a_1(y_0 + c \sin \varphi) \\ C_1 = x_0^2 + y_0^2 + a_1^2 - b_1^2 + c^2 \\ \quad + 2c(x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi). \end{cases} \quad (3.5)$$

On obtient finalement :

$$\cos \theta_1 = \frac{A_1 C_1 - k_1 B_1 \sqrt{\Delta_1}}{A_1^2 + B_1^2} \quad \text{où : } \begin{cases} k_1 = \pm 1 \text{ selon la branche choisie} \\ \Delta_1 = A_1^2 + B_1^2 - C_1^2 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{B_1 C_1 + k_1 A_1 \sqrt{\Delta_1}}{A_1^2 + B_1^2} \quad (3.7)$$

$$\cos \beta_1 = \frac{c \cos \varphi + x_0 - a_1 \cos \theta_1}{b_1} \quad (3.8)$$

$$\sin \beta_1 = \frac{c \sin \varphi + y_0 - a_1 \sin \theta_1}{b_1}. \quad (3.9)$$

Nous pouvons alors déterminer la valeur de θ_1 et de β_1 pour tout φ donné. Lors du dimensionnement des membrures, nous aurons aussi besoin de φ en fonction de θ_1 afin de connaître la position verticale de l'aile obtenue. De l'équation (3.3), nous pouvons aussi trouver :

$$C_2 = A_2 \cos \varphi + B_2 \sin \varphi \quad \text{où : } \begin{cases} A_2 = 2c(-x_0 + a_1 \cos \theta_1) \\ B_2 = 2c(-y_0 + a_1 \sin \theta_1) \\ C_2 = x_0^2 + y_0^2 + a_1^2 - b_1^2 + c^2 \\ \quad - 2a_1(x_0 \cos \theta_1 + y_0 \sin \theta_1). \end{cases} \quad (3.10)$$

On obtient donc :

$$\cos \varphi = \frac{A_2 C_2 - k_2 B_2 \sqrt{\Delta_2}}{A_2^2 + B_2^2} \quad \text{où : } \begin{cases} k_2 = \pm 1 \text{ selon la branche choisie} \\ \Delta_2 = A_2^2 + B_2^2 - C_2^2 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\sin \varphi = \frac{B_2 C_2 + k_2 A_2 \sqrt{\Delta_2}}{A_2^2 + B_2^2}. \quad (3.12)$$

3.2.2 Analyse de la boucle EFGCD

La boucle EFGCD représente un niveau de complexité supérieur à celui de la boucle ABCD, car il s'agit maintenant d'un mécanisme à cinq barres. Il s'ensuit que deux variables doivent être connues pour résoudre ce système, soit φ et θ_2 , soit φ et θ . Si nous imposons θ_1 , il faut alors résoudre premièrement la boucle ABCD afin de déterminer φ , puis nous pourrons résoudre la boucle EFGCD. À partir de la géométrie de cette boucle, il peut être prouvé que :

$$\text{EN X : } x_0 + c \cos \varphi + d \cos \theta = x_2 + a_2 \cos \theta_2 + b_2 \cos \beta_2. \quad (3.13)$$

$$\text{EN Y : } y_0 + c \sin \varphi + d \sin \theta = y_2 + a_2 \sin \theta_2 + b_2 \sin \beta_2. \quad (3.14)$$

En ne conservant que les termes en β_2 dans le membre de droite et en élevant les membres au carré puis en additionnant les deux équations, on obtient :

$$b_2^2 = (x_0 + c \cos \varphi + d \cos \theta - x_2 - a_2 \cos \theta_2)^2 + (y_0 + c \sin \varphi + d \sin \theta - y_2 - a_2 \sin \theta_2)^2. \quad (3.15)$$

Nous pouvons développer l'équation (3.15) pour obtenir :

$$\begin{aligned}
& (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + a_2^2 - b_2^2 + c^2 + d^2 + 2c((x_0 - x_2) \cos \varphi + (y_0 - y_2) \sin \varphi) \\
& + 2d((x_0 - x_2 + c \cos \varphi) \cos \theta + (y_0 - y_2 + c \sin \varphi) \sin \theta) \quad (3.16) \\
& = 2a_2(x_0 - x_2 + c \cos \varphi + d \cos \theta) \cos \theta_2 + 2a_2(y_0 - y_2 + c \sin \varphi + d \sin \theta) \sin \theta_2
\end{aligned}$$

ce qui correspond à :

$$C_3 = A_3 \cos \theta_2 + B_3 \sin \theta_2 \quad \text{où : } \begin{cases} A_3 = 2a_2(x_0 - x_2 + c \cos \varphi + d \cos \theta) \\ B_3 = 2a_2(y_0 - y_2 + c \sin \varphi + d \sin \theta) \\ C_3 = (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + a_2^2 - b_2^2 + c^2 + d^2 \\ \quad + 2c((x_0 - x_2) \cos \varphi + (y_0 - y_2) \sin \varphi) \\ \quad + 2d((x_0 - x_2 + c \cos \varphi) \cos \theta \\ \quad + (y_0 - y_2 + c \sin \varphi) \sin \theta). \end{cases} \quad (3.17)$$

On obtient donc :

$$\cos \theta_2 = \frac{A_3 C_3 - k_3 B_3 \sqrt{\Delta_3}}{A_3^2 + B_3^2} \quad \text{où : } \begin{cases} k_3 = \pm 1 \text{ selon la branche choisie} \\ \Delta_3 = A_3^2 + B_3^2 - C_3^2 \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{B_3 C_3 + k_3 A_3 \sqrt{\Delta_3}}{A_3^2 + B_3^2} \quad (3.19)$$

$$\cos \beta_2 = \frac{x_0 - x_2 + c \cos \varphi + d \cos \theta - a_2 \cos \theta_2}{b_2} \quad (3.20)$$

$$\sin \beta_2 = \frac{y_0 - y_2 + c \sin \varphi + d \sin \theta - a_2 \sin \theta_2}{b_2}. \quad (3.21)$$

Encore une fois, nous aurons besoin de θ en fonction de θ_2 et de φ afin de connaître la position angulaire de l'aile obtenue lors de l'étude du dimensionnement des membrures. De l'équation (3.15), nous pouvons aussi trouver :

$$C_4 = A_4 \cos \theta + B_4 \sin \theta \quad \text{où : } \begin{cases} A_4 = 2d(-x_0 + x_2 - c \cos \varphi + a_2 \cos \theta_2) \\ B_4 = 2d(-y_0 + y_2 - c \sin \varphi + a_2 \sin \theta_2) \\ C_4 = (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + a_2^2 - b_2^2 + c^2 + d^2 \\ \quad + 2c((x_0 - x_2) \cos \varphi + (y_0 - y_2) \sin \varphi) \\ \quad - 2a_2((x_0 - x_2 + c \cos \varphi) \cos \theta_2 \\ \quad + (y_0 - y_2 + c \sin \varphi) \sin \theta_2). \end{cases} \quad (3.22)$$

On obtient donc :

$$\cos \theta = \frac{A_4 C_4 - k_4 B_4 \sqrt{\Delta_4}}{A_4^2 + B_4^2} \quad \text{où : } \begin{cases} k_4 = \pm 1 \text{ selon la branche choisie} \\ \Delta_4 = A_4^2 + B_4^2 - C_4^2 \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\sin \theta = \frac{B_4 C_4 + k_4 A_4 \sqrt{\Delta_4}}{A_4^2 + B_4^2}. \quad (3.24)$$

3.2.3 Détermination des vitesses angulaires

Pour trouver les vitesses angulaires des différentes articulations, nous pouvons repartir des équations de contrainte des deux boucles de membrures, soit ABCD et EFGCD. En dérivant l'équation (3.1) et l'équation (3.2) par rapport au temps, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} a_1 \sin \theta_1 & b_1 \sin \beta_1 \\ a_1 \cos \theta_1 & b_1 \cos \beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\beta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \dot{\varphi} \sin \varphi \\ c \dot{\varphi} \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

Cette dernière équation peut être écrite sous forme matricielle comme :

$$\mathbf{D}_1 \dot{\mathbf{u}}_1 = \mathbf{e}_1 \quad (3.26)$$

où $\dot{\mathbf{u}}_1 = [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\beta}_1]^T$ et $\mathbf{e}_1 = [c \dot{\varphi} \sin \varphi \quad c \dot{\varphi} \cos \varphi]^T$, ce qui nous permet maintenant d'obtenir les vitesses angulaires $\dot{\theta}_1$ et $\dot{\beta}_1$. Ensuite, nous pouvons dériver l'équation (3.13) et l'équation (3.14) afin d'obtenir :

$$\begin{bmatrix} a_2 \sin \theta_2 & b_2 \sin \beta_2 \\ a_2 \cos \theta_2 & b_2 \cos \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\beta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \dot{\varphi} \sin \varphi + d \dot{\theta} \sin \theta \\ c \dot{\varphi} \cos \varphi + d \dot{\theta} \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (3.27)$$

Cette dernière équation peut être écrite sous forme matricielle comme :

$$\mathbf{D}_2 \dot{\mathbf{u}}_2 = \mathbf{e}_2 \quad (3.28)$$

où $\dot{\mathbf{u}}_2 = [\dot{\theta}_2 \quad \dot{\beta}_2]^T$ et $\mathbf{e}_2 = [c \dot{\varphi} \sin \varphi + d \dot{\theta} \sin \theta \quad c \dot{\varphi} \cos \varphi + d \dot{\theta} \cos \theta]^T$, ce qui nous donne donc les vitesses angulaires $\dot{\theta}_2$ et $\dot{\beta}_2$.

3.2.4 Détermination des accélérations angulaires

En suivant une démarche équivalente, nous pouvons maintenant déterminer les accélérations angulaires inconnues. En dérivant les équations (3.26) et (3.28) par rapport au temps, nous obtenons :

$$\mathbf{D}_1 \ddot{\mathbf{u}}_1 = \dot{\mathbf{e}}_1 - \dot{\mathbf{D}}_1 \dot{\mathbf{u}}_1 = \mathbf{h}_1 \quad \text{où : } \ddot{\mathbf{u}}_1 = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\beta}_1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$\mathbf{D}_2 \ddot{\mathbf{u}}_2 = \dot{\mathbf{e}}_2 - \dot{\mathbf{D}}_2 \dot{\mathbf{u}}_2 = \mathbf{h}_2 \quad \text{où : } \ddot{\mathbf{u}}_2 = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\beta}_2 \end{bmatrix}. \quad (3.30)$$

Nous pouvons donc obtenir les accélérations angulaires des différentes membrures $\ddot{\theta}_1$, $\ddot{\beta}_1$, $\ddot{\theta}_2$ et $\ddot{\beta}_2$ si nous avons les fonctions décrivant le mouvement de l'aile : φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$, θ , $\dot{\theta}$ et $\ddot{\theta}$.

3.3 Dérivation des équations dynamiques

3.3.1 Accélération du centre de masse des membrures

À partir des équations de la cinématique du mécanisme Valkyrie 2 déterminées dans la section précédente, nous pouvons trouver l'accélération du centre de masse des membrures. Les équations utiliseront la nomenclature représentée dans la figure 3.4.

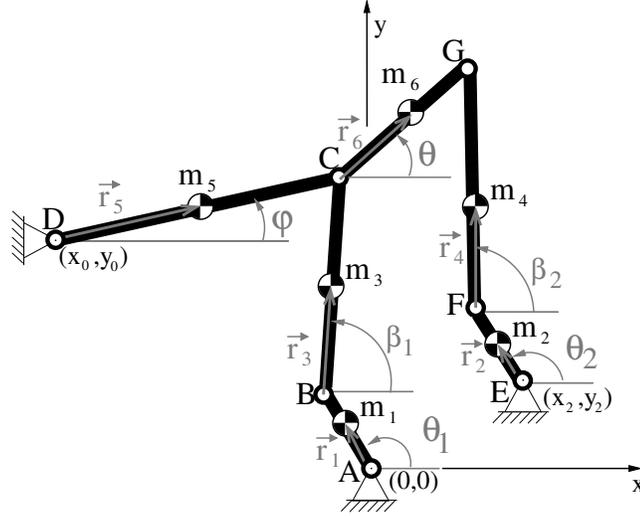


Figure 3.4: Schéma du mécanisme Valkyrie 2 avec le centre de masse des membrures.

Nous pouvons alors décrire les accélérations selon les formules suivantes :

$$\mathbf{a}_1 = \ddot{\theta}_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_1 - \dot{\theta}_1^2 \mathbf{r}_1 \quad (3.31)$$

$$\mathbf{a}_2 = \ddot{\theta}_2 \mathbf{E} \mathbf{r}_2 - \dot{\theta}_2^2 \mathbf{r}_2 \quad (3.32)$$

$$\mathbf{a}_3 = \ddot{\theta}_1 \mathbf{E} \mathbf{l}_1 - \dot{\theta}_1^2 \mathbf{l}_1 + \ddot{\beta}_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_3 - \dot{\beta}_1^2 \mathbf{r}_3 \quad (3.33)$$

$$\mathbf{a}_4 = \ddot{\theta}_2 \mathbf{E} \mathbf{l}_2 - \dot{\theta}_2^2 \mathbf{l}_2 + \ddot{\beta}_2 \mathbf{E} \mathbf{r}_4 - \dot{\beta}_2^2 \mathbf{r}_4 \quad (3.34)$$

$$\mathbf{a}_5 = \ddot{\varphi} \mathbf{E} \mathbf{r}_5 - \dot{\varphi}^2 \mathbf{r}_5 \quad (3.35)$$

$$\mathbf{a}_6 = \ddot{\varphi} \mathbf{E} \mathbf{l}_5 - \dot{\varphi}^2 \mathbf{l}_5 + \ddot{\theta} \mathbf{E} \mathbf{r}_6 - \dot{\theta}^2 \mathbf{r}_6 \quad (3.36)$$

avec $\mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} r_i \cos \theta_i \\ r_i \sin \theta_i \end{bmatrix}$, $\mathbf{l}_i = \begin{bmatrix} l_i \cos \theta_i \\ l_i \sin \theta_i \end{bmatrix}$, et $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

où r_i : distance entre le début de la membrure i et son centre de masse (c.d.m.),

l_i : longueur totale de la membrure i ,

θ_i : angle entre la membrure i et l'axe horizontale et

\mathbf{a}_i : accélération du centre de masse de la membrure i .

3.3.2 Forces et moments agissant aux centres de masse

Afin de pouvoir déterminer les équations dynamiques régissant le mécanisme Valkyrie 2, nous devons décrire mathématiquement les forces et moments agissant au centre de masse de chacune des membrures. D'abord, la formule qui sera utilisée pour calculer les forces est :

$$\mathbf{f}_i = -m_i \mathbf{a}_i + m_i \mathbf{g} \quad (3.37)$$

où \mathbf{g} est l'accélération gravitationnelle. Ensuite, il faut que l'expression du tenseur d'inertie de chacune des membrures soit connu. En faisant l'hypothèse que les membrures sont des barres longues et minces avec I_{xx} comme inertie de section, on a :

$$\mathbf{I}_{0i} = \mathbf{Q}_i \mathbf{I}_i \mathbf{Q}_i^T \text{ où } \mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{I}_{0i} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{12} m_i l_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{12} m_i l_i^2 \end{bmatrix}. \quad (3.38)$$

Nous pouvons maintenant définir la valeur des moments en supposant que les tiges du mécanisme ont toutes un tenseur d'inertie de cette forme. Bien entendu, l'inertie de l'aile pourra être ajoutée par la suite lorsque celle-ci sera connue, ce qui revient à modifier la valeur de \mathbf{I}_{06} , m_6 , \mathbf{a}_6 et \mathbf{r}_6 . Aussi, la valeur de l'inertie de chaque section des membrures, I_{xx} , n'a pas d'importance, puisqu'elle n'intervient plus dans le calcul du moment agissant au centre de masse de la membrure i , M_i .

On trouve donc :

$$\mathbf{M}_i = -\mathbf{I}_{0i} \dot{\omega}_i - \omega_i \times (\mathbf{I}_{0i} \omega_i) \quad (3.39)$$

$$\mathbf{M}_i = - \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{12} m_i l_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{12} m_i l_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_i \end{bmatrix} - \mathbf{0} \quad (3.40)$$

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{12} m_i l_i^2 \ddot{\theta}_i \end{bmatrix} \Rightarrow M_i = -\frac{1}{12} m_i l_i^2 \ddot{\theta}_i \quad (3.41)$$

3.3.3 Déplacements infinitésimaux

Les expressions des déplacements angulaires infinitésimaux seront nécessaires afin de déterminer les moments générés aux articulations 1 et 2 par les forces et moments engendrés par l'aile. Afin de déterminer leur expression, nous devons repartir, encore une fois, des équations de contrainte des deux boucles de membrures, soit ABCD et EFGCD. En prenant la dérivée des équations (3.1) et (3.2), de même que (3.13) et (3.14), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} -b_1 \sin \beta_1 & c \sin \varphi \\ -b_1 \cos \beta_1 & c \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\beta_1 \\ \delta\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \delta\theta_1 \sin \theta_1 \\ a_1 \delta\theta_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

c'est-à-dire,

$$\mathbf{G}_1 \delta\mathbf{u}_1 = \mathbf{v}_1 \quad (3.43)$$

et

$$\begin{bmatrix} -b_2 \sin \beta_2 & d \sin \theta \\ -b_2 \cos \beta_2 & d \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\beta_2 \\ \delta\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 \delta\theta_2 \sin \theta_2 - c \delta\varphi \sin \varphi \\ a_2 \delta\theta_2 \cos \theta_2 - c \delta\varphi \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

c'est-à-dire,

$$\mathbf{G}_2 \delta\mathbf{u}_2 = \mathbf{v}_2. \quad (3.45)$$

Ce qui nous donne les déplacements angulaires infinitésimaux $\delta\beta_1$, $\delta\beta_2$, $\delta\theta$ et $\delta\varphi$. Connaissant les déplacements angulaires infinitésimaux des membrures, nous pouvons maintenant calculer le déplacement de leur centre de masse et celui du pivot de l'aile (δ_C) en utilisant les formules suivantes :

$$\delta_1 = \delta\theta_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_1 \quad (3.46)$$

$$\delta_2 = \delta\theta_2 \mathbf{E} \mathbf{r}_2 \quad (3.47)$$

$$\delta_3 = \delta\theta_1 \mathbf{E} \mathbf{l}_1 + \delta\beta_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_3 \quad (3.48)$$

$$\delta_4 = \delta\theta_2 \mathbf{E} \mathbf{l}_2 + \delta\beta_2 \mathbf{E} \mathbf{r}_4 \quad (3.49)$$

$$\delta_5 = \delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{r}_5 \quad (3.50)$$

$$\delta_6 = \delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{l}_5 + \delta\theta \mathbf{E} \mathbf{r}_6 \quad (3.51)$$

$$\delta_C = \delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{l}_5. \quad (3.52)$$

3.3.4 Détermination des moments générés

Finalement, en utilisant le principe du travail virtuel [20], il est possible d'obtenir l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \tau_1 \delta\theta_1 + \tau_2 \delta\theta_2 = & M_1 \delta\theta_1 + M_2 \delta\theta_2 + M_3 \delta\beta_1 + M_4 \delta\beta_2 + M_5 \delta\varphi + M_6 \delta\theta + M \delta\theta \\ & + \mathbf{f}_1^T \boldsymbol{\delta}_1 + \mathbf{f}_2^T \boldsymbol{\delta}_2 + \mathbf{f}_3^T \boldsymbol{\delta}_3 + \mathbf{f}_4^T \boldsymbol{\delta}_4 + \mathbf{f}_5^T \boldsymbol{\delta}_5 + \mathbf{f}_6^T \boldsymbol{\delta}_6 + \mathbf{F}^T \boldsymbol{\delta}_C. \end{aligned} \quad (3.53)$$

La variable M est le moment de tangage s'appliquant sur l'aile autour du pivot, alors que la force aérodynamique créée à ce point est \mathbf{F} . Cette dernière a une composante horizontale et verticale, d'où sa forme vectorielle.

Puisqu'il faut déterminer deux inconnues, τ_1 et τ_2 , prenons deux cas simples possibles afin d'obtenir ainsi deux équations :

$$\begin{cases} 1^{er} \text{ cas : } & \delta\theta_1 = 1 \text{ et } \delta\theta_2 = 0 \\ 2^e \text{ cas : } & \delta\theta_1 = 0 \text{ et } \delta\theta_2 = 1. \end{cases} \quad (3.54)$$

Ces cas sont arbitraires, mais comme l'équation (3.53) doit toujours être valide, il est toujours préférable d'utiliser les cas les plus simples. En effectuant les substitutions, nous obtenons les moments nécessaires aux articulations 1 et 2 pour équilibrer les forces générées par l'aile, donc le couple produit aux alternateurs :

$$\begin{aligned} \tau_1 = & M_1 + M_3 \delta\beta_1 + M_4 \delta\beta_2 + M_5 \delta\varphi + M_6 \delta\theta + M \delta\theta \\ & + \mathbf{f}_1^T \boldsymbol{\delta}_1 + \mathbf{f}_3^T \boldsymbol{\delta}_3 + \mathbf{f}_4^T \boldsymbol{\delta}_4 + \mathbf{f}_5^T \boldsymbol{\delta}_5 + \mathbf{f}_6^T \boldsymbol{\delta}_6 + \mathbf{F}^T \boldsymbol{\delta}_C \end{aligned} \quad (3.55)$$

$$\tau_2 = M_2 + M_4 \delta\beta_2 + M_6 \delta\theta + M \delta\theta + \mathbf{f}_2^T \boldsymbol{\delta}_2 + \mathbf{f}_4^T \boldsymbol{\delta}_4 + \mathbf{f}_6^T \boldsymbol{\delta}_6. \quad (3.56)$$

3.4 Étude du dimensionnement des membrures

Une approche différente de celle de la section 1.2 a été utilisée ici. En effet, un programme *Matlab* a encore été conçu, mais cette fois il permet de visualiser les forces et moments s'appliquant sur l'aile ainsi que sa position verticale et angulaire, la position angulaire des deux moteurs et les couples qu'ils ressentent suivi de la puissance instantanée qui y est perçue. Les équations cinématiques et dynamiques trouvées précédemment y sont donc toutes utilisées. Une fonction de minimisation de l'erreur entre les courbes prescrites et obtenues n'a pas été mise en oeuvre puisque les contraintes

sont trop nombreuses, ce qui rend difficile la convergence de ce type d'algorithme. Une approche semi-itérative a donc été utilisée, conjointement avec une analyse théorique de certaines longueurs en se basant sur la figure 3.5. Les distances x_0 , y_0 , y_2 et b_2 ont donc été fixées par cette dernière méthode.

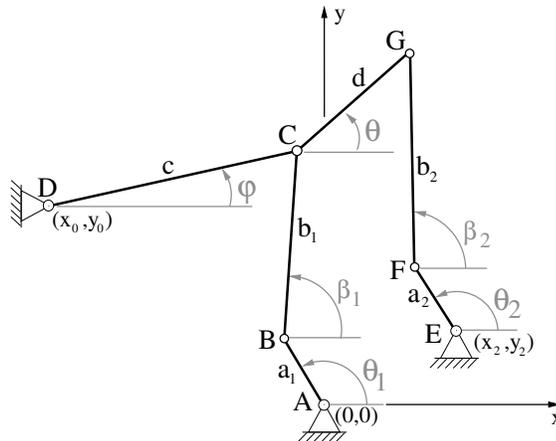


Figure 3.5: Schéma du mécanisme Valkyrie 2 simplifié.

D'abord, comme le temps de la trajectoire ascendante de l'aile doit être égal à celui de la trajectoire descendante et que nous souhaitons obtenir une vitesse constante à l'alternateur 1, les positions de la membrure a_1 produisant les extrêmes de la trajectoire verticale de l'aile doivent être séparées de 180° . En éloignant suffisamment la tige c de a_1 , nous pouvons poser que les positions extrêmes du point C doivent être horizontalement alignées avec le point A de sorte que l'amplitude de l'oscillation verticale du point B soit celle du point C. Il s'ensuit que :

$$x_0 = -\sqrt{c^2 - a_1^2} \quad (3.57)$$

$$y_0 = b_1. \quad (3.58)$$

D'une manière semblable, en souhaitant obtenir une fonction la plus symétrique possible pour θ_2 , il est préférable que le point E soit verticalement aligné avec le point A et que la membrure b_2 soit de même longueur que b_1 .

$$y_2 = 0 \quad (3.59)$$

$$b_2 = b_1 \quad (3.60)$$

Par la suite, des itérations ont été effectuées afin de minimiser les dimensions des membrures tout en effectuant le mouvement prescrit, soit :

$$\theta(t) = 75 \sin(\gamma t) \quad (3.61)$$

$$h(t) = 0,5 \sin(\gamma t + \pi/2). \quad (3.62)$$

Durant ces itérations, une attention particulière a été portée à la différence d'angle entre la membrure d et b_2 . En effet, il faut éviter que ces deux tiges ne deviennent parallèles, ce qui conduirait à une singularité, donc à un contrôle inadéquat de la position angulaire de l'aile. Les dimensions ainsi obtenues sont inscrites dans le tableau 3.1 et ont été utilisées pour modéliser le mécanisme dans *Pro-Engineer*, tel que présenté à la figure 3.6. L'angle minimal atteint entre d et b_2 est de $11,4^\circ$, ce qui est amplement acceptable puisqu'une butée peut ainsi être placée de manière à limiter mécaniquement l'angle à cette articulation.

Segments	x_0	y_0	a_1	b_1	c
Dimension [m]	-1,4142	2	0,5	2	1,5
Segments	x_2	y_2	a_2	b_2	d
Dimension [m]	1	0	0,95	2	0,65

Tableau 3.1: Dimensions proposées des membrures de Valkyrie 2.

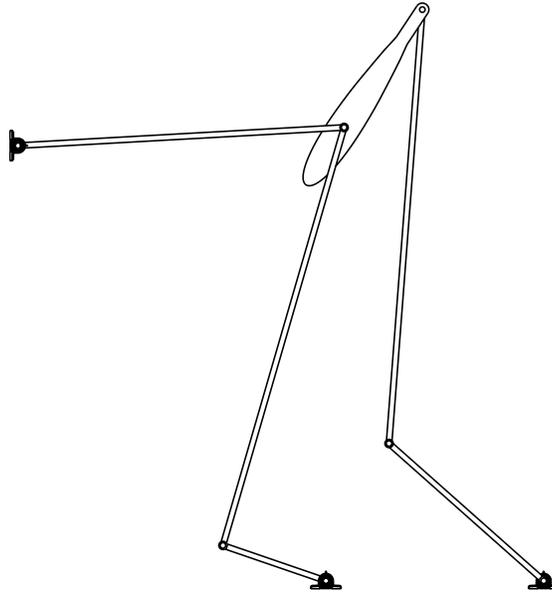


Figure 3.6: Mécanisme modélisé selon les dimensions du tableau 3.1.

3.5 Simulation

Maintenant qu'une architecture a été établie avec des dimensions réelles, il est possible d'utiliser le programme créé dans la précédente section afin d'obtenir les courbes de puissance instantanée des alternateurs. D'abord, les coefficients de pression calculés par le *Laboratoire de fluide numérique de l'Université Laval* seront convertis en forces et en moment agissant sur l'aile avec les paramètres transcrits dans le tableau 3.2 selon les équations (3.63), (3.64) et (3.65). Les données ainsi obtenues sont reproduites dans les graphes des figures 3.7 et 3.8.

$$F_x = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b' c' C_x \quad (3.63)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b' c' C_y \quad (3.64)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b' c'^2 C_M \quad (3.65)$$

Paramètre	U_∞	ρ_{eau}	f	envergure : b'	corde : c'
Valeur	1,5 m/s	1000 kg/m ³	0,42 Hz	2 m	0,5 m

Tableau 3.2: Paramètres utilisés pour la simulation numérique.

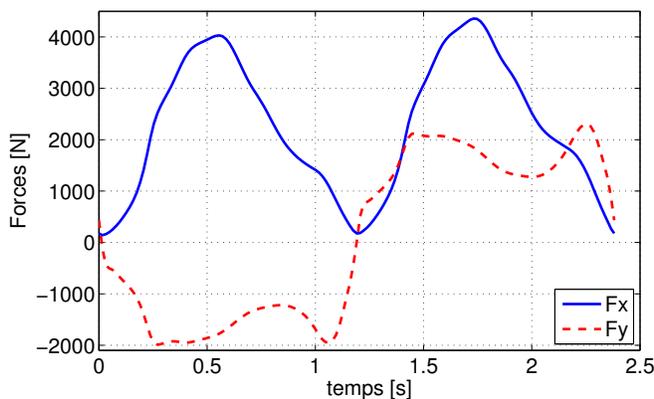


Figure 3.7: Forces agissant sur l'aile selon les paramètres du tableau 3.2.

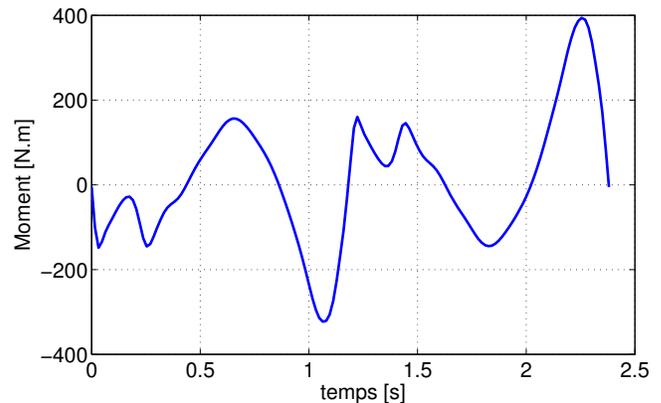


Figure 3.8: Moment agissant sur l'aile selon les paramètres du tableau 3.2.

Les positions angulaires θ_1 et θ_2 permettant de faire effectuer les trajectoires prescrites à l'aile sont ensuite calculées avec les équations (3.6), (3.7), (3.18) et (3.19), puis tracées dans la figure 3.9.

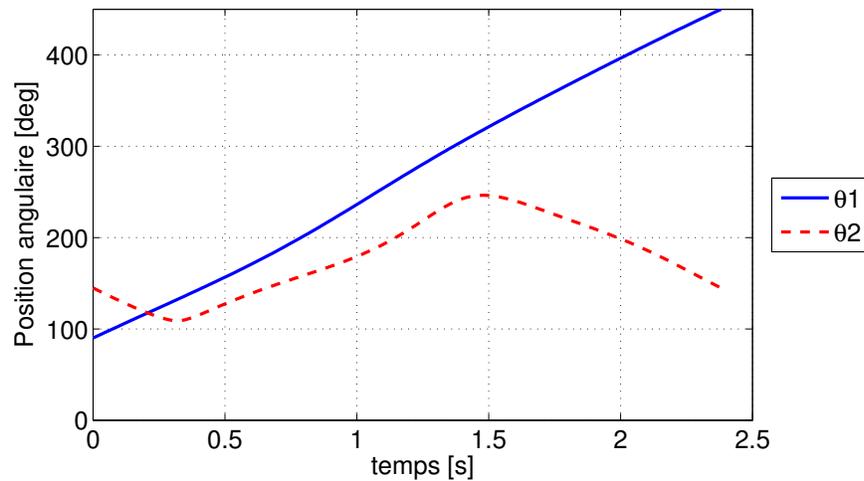


Figure 3.9: Position angulaires θ_1 et θ_2 du mécanisme Valkyrie 2.

Selon ces positions angulaires, il est possible de trouver les courbes de pilonnement et de tangage obtenues pour s'assurer qu'elles suivent celles prescrites, comme le montrent les figures 3.10 et 3.11. Les équations (3.11), (3.12), (3.23) et (3.24) ont maintenant été utilisées.

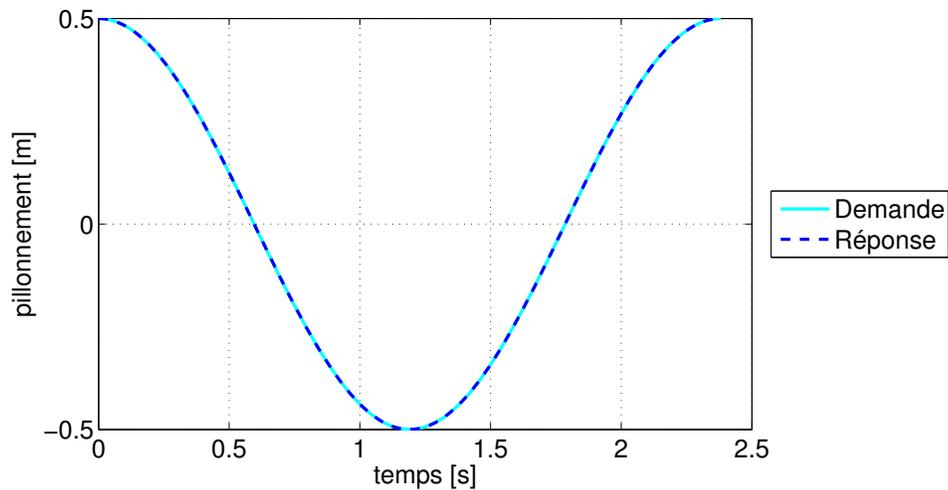


Figure 3.10: Pilonnement de l'aile obtenu avec le mécanisme Valkyrie 2.

En utilisant les équations (3.55) et (3.56), nous pouvons déterminer les couples générés aux deux alternateurs comme le montre la figure 3.12. On peut remarquer qu'au changement de branche de solution du mécanisme de pilonnement, à la moitié de la période, la singularité entraîne un pic de couple négatif pour le moteur 1. Par contre, celui-ci n'est pas assez long et important pour arrêter la rotation, l'inertie du système permettra donc la continuité du mouvement. En effet, le programme n'utilise

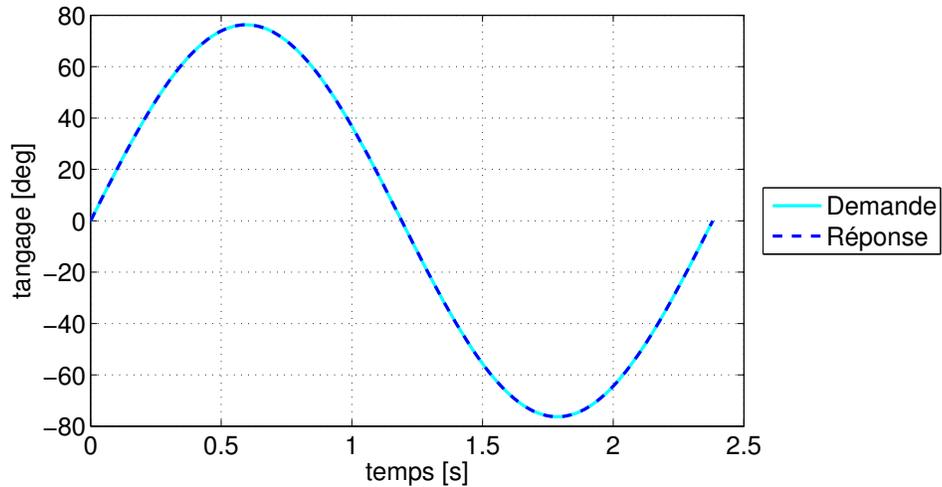


Figure 3.11: Tangage de l'aile obtenu avec le mécanisme Valkyrie 2.

pour l'instant qu'une approximation de l'inertie des membrures, tel que décrit dans l'équation 3.38. En prenant les inerties réelles et en ajoutant celles des alternateurs, on augmentera l'inertie totale du système. Les courbes de moments et de puissances seront donc modifiées, mais l'allure générale restera la même.

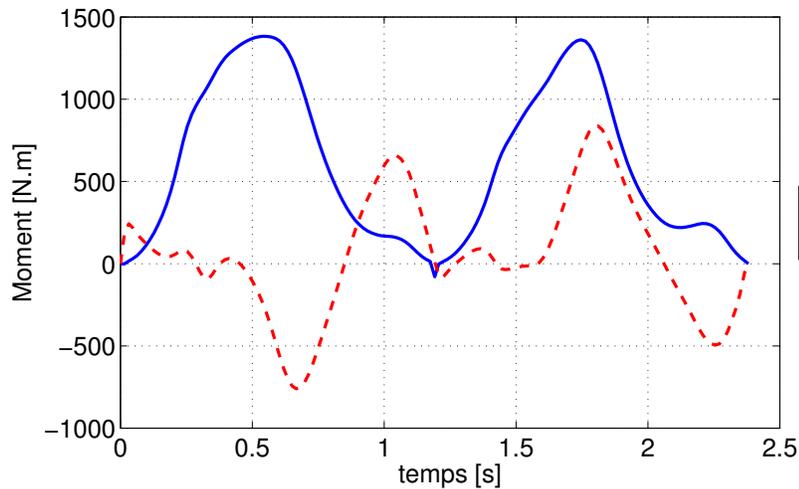


Figure 3.12: Couples générés aux alternateurs avec le mécanisme Valkyrie 2.

Finalement, en multipliant la vitesse des alternateurs par leur couple généré ou requis, il est possible d'obtenir la puissance instantanée produite ou requise tel que retrouvé dans la figure 3.13. Cette figure montre bien que l'alternateur 1 est le principal producteur d'énergie, alors que le second demande plus d'énergie qu'il n'en crée afin de contrôler l'orientation de l'aile.

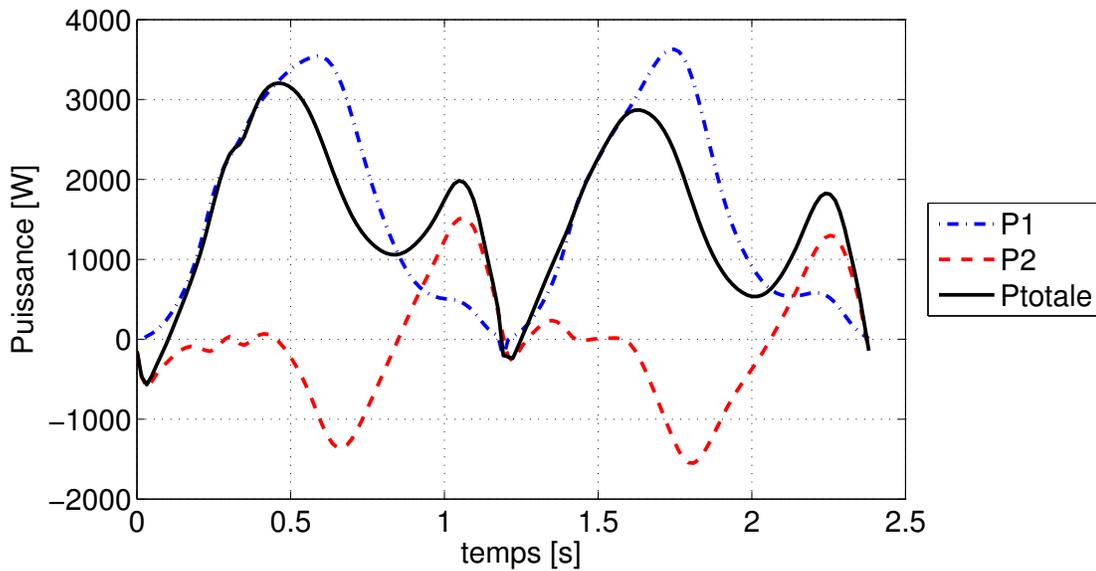


Figure 3.13: Puissances instantanées générées ou requises aux alternateurs.

3.6 Commentaires sur le mécanisme Valkyrie 2

Ce type d'architecture est intéressant, car il utilise presque exclusivement des membrures en traction ou en compression. De plus, puisque c'est un mécanisme à deux degrés de liberté, il permet la modification de la fonction de tangage de l'aile en gardant la même fonction pour le pilonnement. Par contre, le contrôle du tangage nécessite la lecture de la position verticale de l'aile en plus de son orientation et les mouvements admissibles ont une amplitude maximale contrainte par l'architecture choisie.

En effet, comme il a été expliqué dans la section 3.4, la détermination de la longueur des membrures est effectuée pour une amplitude donnée afin de s'assurer que le mécanisme de contrôle du tangage ne tombe pas dans une singularité. Il est alors possible d'effectuer des trajectoires différentes de celle pour laquelle il a été optimisé, cependant il reste une amplitude maximale à ne pas dépasser afin de garder un contrôle adéquat de l'orientation de l'aile.

Hormis l'existence d'une amplitude maximale de tangage et la nécessité de connaître la position de l'aile en plus de son orientation afin de calculer la position angulaire souhaitée pour θ_2 , ce système est intéressant par son usage exclusif de liaisons rotoïdes, plus adaptées à une utilisation sous-marine éventuelle.

Chapitre 4

Étude de systèmes Valkyrie tandem

*Étrange époque où il est plus facile de désintégrer l'atome
que de vaincre un préjugé.*

Albert Einstein

En plus de trouver un mécanisme pour contraindre une aile à effectuer des mouvements sinusoïdaux en position et en orientation, il a été demandé d'investiguer la possibilité d'ajouter une seconde aile en tandem. Celle-ci effectuerait aussi des mouvements sinusoïdaux, mais avec une avance de phase de 180° et une amplitude de tangage plus petite. Le système ainsi obtenu serait plus efficace que celui avec une seule aile pour une fenêtre de vent donnée.

4.1 Recherche d'architectures pour un système Valkyrie tandem

Afin de garder une architecture la plus simple possible, il est envisagé de garder un mécanisme à deux degrés de liberté où les deux ailes sont placées sur la même membrure de part et d'autre du pivot de pilonnement, tel que présenté dans la figure 4.1. Il s'agit donc de mettre au point un mécanisme pour coupler l'orientation des ailes afin qu'elles effectuent un mouvement de tangage inverse une par rapport à l'autre.

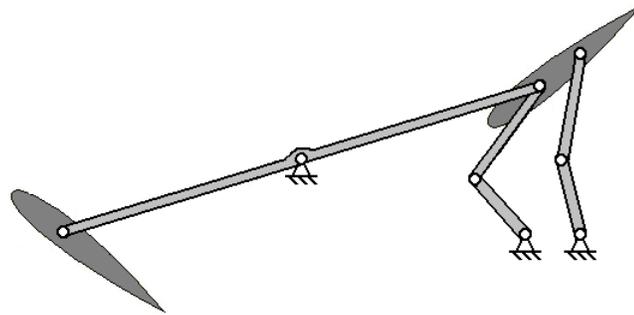


Figure 4.1: Montage tandem d'ailes oscillantes avec le mécanisme Valkyrie 2.

4.1.1 Système Valkyrie tandem avec une courroie

D'abord, puisque le mouvement de tangage est simplement inversé entre les deux ailes, il peut être effectué par une courroie croisée, comme vu dans la figure 4.2. Cette idée, assez simple, a pourtant de gros désavantages, tels les pertes importantes en friction associées à ce type de lien et la grande imprécision de l'orientation de l'aile menée.

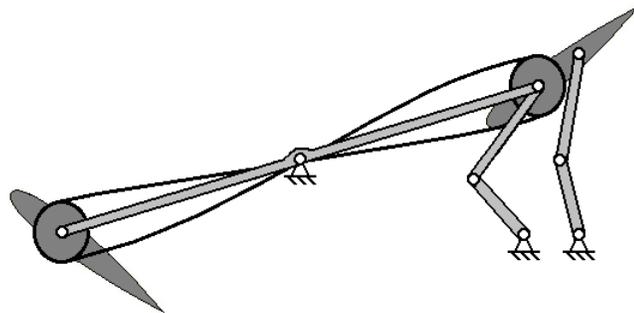


Figure 4.2: Mécanisme tandem avec une courroie.

4.1.2 Système Valkyrie tandem avec des engrenages

Afin de diminuer les pertes, il peut être proposé de renverser le sens de rotation à l'aide d'une paire d'engrenages, tel que vu dans la figure 4.3. Néanmoins, ce montage serait inefficace, puisque l'orientation de l'aile menée serait autant dépendante du tangage que du pilonnement. La fonction obtenue pour la position angulaire de l'aile serait alors totalement inadéquate. De manière à ce que le tangage de cette deuxième aile

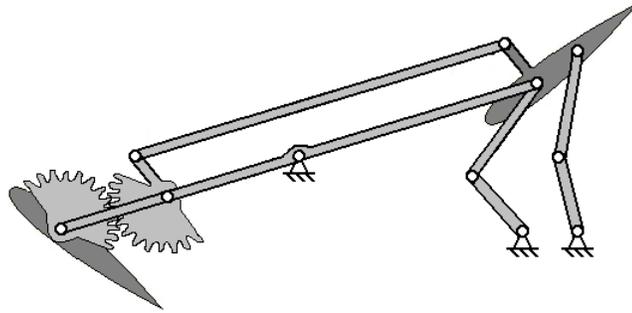


Figure 4.3: Montage inadéquat d'engrenages dans un mécanisme tandem.

ne soit pas influencé par le pilonnement, il est nécessaire d'utiliser un montage comme celui reproduit dans la figure 4.4, où l'engrenage mené est soutenu par une barre toujours horizontale. Une courroie crantée, une chaîne ou un mécanisme à quatre barres peuvent donc être utilisés pour transmettre le mouvement d'une aile à l'autre. L'angle de tangage obtenu pour la deuxième aile sera ainsi toujours l'inverse de celui imposé à la première, tel que stipulé au début de ce chapitre.

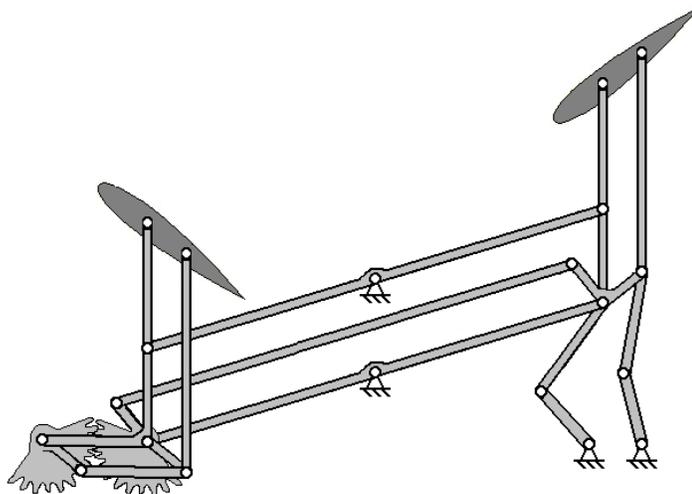


Figure 4.4: Montage adéquat d'engrenages dans un mécanisme tandem.

4.1.3 Système Valkyrie tandem avec seulement des barres

Puisque le montage présenté à la figure 4.4 utilise plusieurs barres en plus de deux engrenages, il est pertinent d'étudier un système n'utilisant que des membrures afin de pouvoir ensuite le comparer à celui de la section 4.1.2. De manière à ce que le pilonnement ne vienne pas influencer le tangage de la seconde aile et afin d'éviter la nécessité d'obtenir une barre toujours horizontale par l'usage d'un parallélogramme, le mécanisme de contrôle sera similaire à celui de la première aile et il sera installé sur le sol. Nous évitons ainsi d'ajouter inutilement de la masse sur le système mobile et simplifions la construction et l'entretien de ce dernier. Ce second mécanisme de contrôle du tangage pourra être actionné par un autre moteur afin de pouvoir modifier sa position angulaire indépendamment de celle de la première aile. Toutefois, il pourra aussi être couplé au premier mécanisme à l'aide d'une courroie, d'un arbre et des engrenages ou tout simplement d'un mécanisme à quatre barres tel que vu dans la figure 4.5. Cette

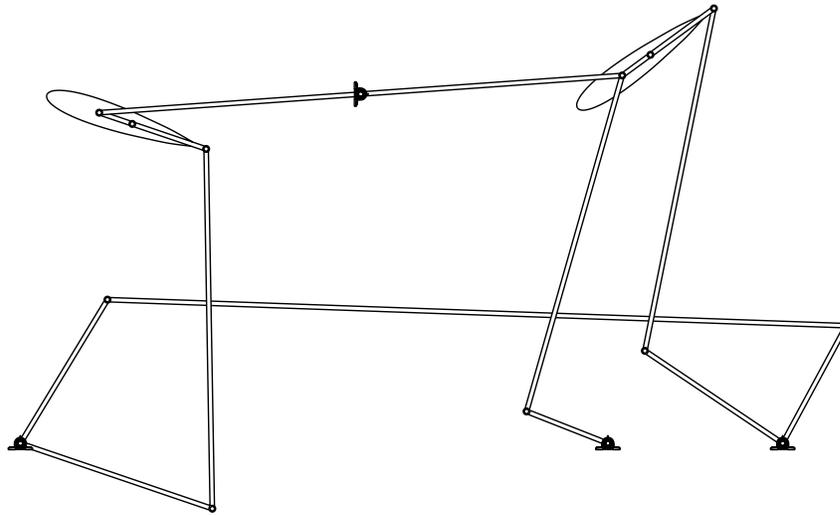


Figure 4.5: Mécanisme tandem avec seulement des membrures.

figure a été obtenue en modélisant le système dans *Pro-Engineer* avec des longueurs de membrures optimisées avec un programme *Matlab* pour donner une fonction similaire à celle recherchée. Nous pouvons en effet comparer le tangage obtenu pour cette dernière aile avec celui prescrit à l'aide de la figure 4.6. Le pilonnement est tracé dans la figure 4.7 et, comme nous pouvons le voir, la fonction de réponse est très semblable à celle demandée. Cette constatation est due au fait que l'aile se trouve sur la même membrure qui dirige le pilonnement de la première aile, elle suit donc son mouvement avec un retard de phase de 180° .

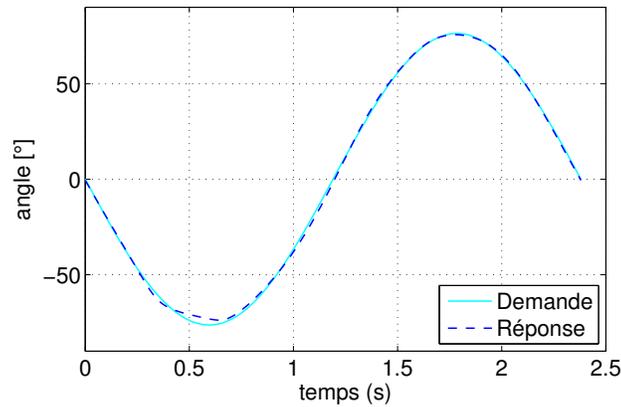


Figure 4.6: Tangage de la seconde aile.

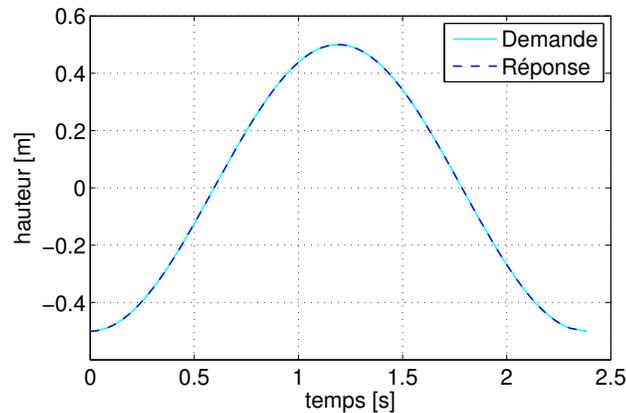


Figure 4.7: Pilonnement de la seconde aile.

4.2 Commentaires sur les mécanismes Valkyrie tandem

Les mécanismes investigués dans ce chapitre semblent être de bonnes pistes d'architectures de systèmes d'ailes oscillantes en tandem. En misant sur la simplicité, le mécanisme avec une courroie croisée pourrait être intéressant si l'efficacité du système n'est pas primordial, car des pertes sont attribuables à la friction de la courroie et à l'imprécision du contrôle de l'orientation de l'aile. À l'opposé, le mécanisme avec engrenages donnera exactement la fonction de tangage pour laquelle il a été conçu, néanmoins il est plus complexe et donc plus sujet à des bris. La solution avec seulement des barres s'avère donc un juste compromis entre l'optimisation de la fonction de tangage obtenue et la simplicité du mécanisme. Elle permet aussi d'utiliser un autre moteur afin d'obtenir un système à trois degrés de liberté si l'application le nécessite.

Chapitre 5

Étude du mécanisme AEGIR

*Beaucoup d'hommes naissent aveugles et ils ne s'en aperçoivent
que le jour où une bonne vérité leur crève les yeux.*

La Machine infernale

Dans ce chapitre, la cinématique et la dynamique du mécanisme AEGIR seront analysées. Les différentes étapes effectuées au chapitre 3 pour le mécanisme Valkyrie 2 seront donc réalisées de nouveau. Un examen de l'appareil suggéré devra ainsi être présenté. Ensuite, les formules régissant la cinématique de celui-ci seront établies. Suivra alors l'établissement des expressions décrivant la dynamique du système AEGIR. Une étude du dimensionnement des membrures pourra donc être accomplie afin de se rapprocher de la trajectoire et de la courbe d'orientation de l'aile prescrite. Les courbes des couples produits aux deux alternateurs seront par la suite tracées selon les longueurs de bielles obtenues. Enfin, des recommandations seront faites pour l'utilisation de ce mécanisme.

5.1 Définition du mécanisme

L'architecture du mécanisme AEGIR fut elle aussi trouvée durant la recherche de solutions, elle est quant à elle commentée dans la sous-section 2.3.4 du chapitre 2. Tel qu'il avait été établi, ce système permet un contrôle découplé pour le tangage et le pilonnement, ce qui peut être avantageux en opposition à Valkyrie 2. Il est donc utile d'analyser AEGIR d'une manière similaire à Valkyrie 2 de façon à faire ressortir leurs similitudes et leurs différences, ainsi leur comparaison en sera facilitée.

Débutons d'abord avec le mécanisme proposé, tel qu'il est représenté à la figure 5.1. Il est alors possible d'obtenir la figure 5.2, cinématiquement équivalente à la précédente, car les équations reliant le mouvement prescrit $h(t)$ et $\theta(t)$ avec les variables d'entrée θ_1 et θ_2 sont les mêmes pour ces deux architectures. Cette représentation peut alors être schématisée en la figure 5.3, où l'aile est vis-à-vis la membrure \overline{CG} . Nous pouvons ainsi déterminer les équations mathématiques décrivant les mouvements du système.

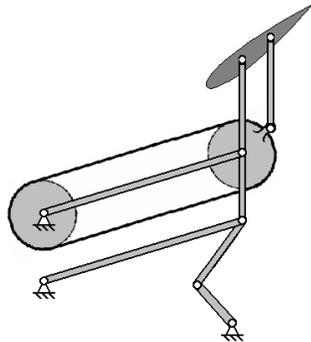


Figure 5.1: Mécanisme AEGIR.

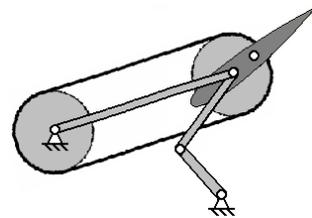


Figure 5.2: Mécanisme AEGIR simplifié.

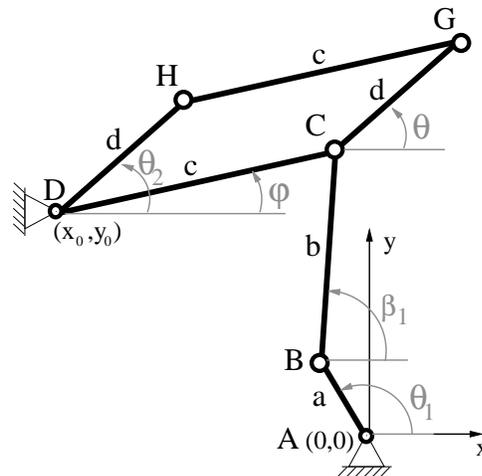


Figure 5.3: Schéma du mécanisme AEGIR simplifié.

5.2 Dérivation des équations cinématiques

En se basant sur la figure 5.3, nous pouvons distinguer deux boucles : la boucle ABCD qui contrôle le pilonnement et la boucle de contrôle du tangage, DCGH. Chacune de ces boucles nous permet d'obtenir un angle directement relié à la cinématique de l'aile. La boucle ABCD nous donne l'angle φ qui permet d'obtenir la position de l'aile en fonction de la position de la bielle \overline{AB} , θ_1 , alors que la boucle DCGH nous donne directement la valeur de l'orientation de l'aile, θ , en fonction de la position du moteur 2, θ_2 .

5.2.1 Analyse de la boucle de pilonnement

La boucle ABCD est un mécanisme simple à quatre barres dont deux des articulations sont fixes. Comme pour Valkyrie 2, les équations suivantes peuvent être trouvées :

$$\text{EN X : } c \cos \varphi + x_0 = a \cos \theta_1 + b \cos \beta_1 \quad (5.1)$$

$$\text{EN Y : } c \sin \varphi + y_0 = a \sin \theta_1 + b \sin \beta_1 \quad (5.2)$$

En faisant passer les termes en θ_1 dans le membre de gauche de l'équation et en additionnant les carrés des équations membre à membre, on obtient :

$$b^2 = (c \cos \varphi + x_0 - a \cos \theta_1)^2 + (c \sin \varphi + y_0 - a \sin \theta_1)^2. \quad (5.3)$$

Nous pouvons développer l'équation (5.3) pour obtenir :

$$\begin{aligned} x_0^2 + y_0^2 + a^2 - b^2 + c^2 + 2c(x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi) = \\ 2a_1(x_0 + c \cos \varphi) \cos \theta_1 + 2a_1(y_0 + c \sin \varphi) \sin \theta_1, \end{aligned} \quad (5.4)$$

ce qui correspond à :

$$C_1 = A_1 \cos \theta_1 + B_1 \sin \theta_1 \quad \text{où : } \begin{cases} A_1 = 2a_1(x_0 + c \cos \varphi) \\ B_1 = 2a_1(y_0 + c \sin \varphi) \\ C_1 = x_0^2 + y_0^2 + a^2 - b^2 + c^2 \\ \quad + 2c(x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi). \end{cases} \quad (5.5)$$

On obtient donc :

$$\cos \theta_1 = \frac{A_1 C_1 - k_1 B_1 \sqrt{\Delta_1}}{A_1^2 + B_1^2} \quad \text{où : } \begin{cases} k_1 = \pm 1 \text{ selon la branche choisie} \\ \Delta_1 = A_1^2 + B_1^2 - C_1^2 \end{cases} \quad (5.6)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{B_1 C_1 + k_1 A_1 \sqrt{\Delta_1}}{A_1^2 + B_1^2} \quad (5.7)$$

$$\cos \beta_1 = \frac{c \cos \varphi + x_0 - a \cos \theta_1}{b} \quad (5.8)$$

$$\sin \beta_1 = \frac{c \sin \varphi + y_0 - a \sin \theta_1}{b}. \quad (5.9)$$

Nous pouvons alors déterminer la valeur de θ_1 et de β_1 pour tout φ donné. Lors du dimensionnement des membrures, nous aurons aussi besoin de φ en fonction de θ_1 afin de connaître la position verticale de l'aile obtenue. De l'équation (5.3), nous pouvons aussi trouver :

$$C_2 = A_2 \cos \varphi + B_2 \sin \varphi \quad \text{où : } \begin{cases} A_2 = 2c(-x_0 + a_1 \cos \theta_1) \\ B_2 = 2c(-y_0 + a_1 \sin \theta_1) \\ C_2 = x_0^2 + y_0^2 + a^2 - b^2 + c^2 \\ \quad - 2a_1(x_0 \cos \theta_1 + y_0 \sin \theta_1). \end{cases} \quad (5.10)$$

On obtient donc :

$$\cos \varphi = \frac{A_2 C_2 - k_2 B_2 \sqrt{\Delta_2}}{A_2^2 + B_2^2} \quad \text{où : } \begin{cases} k_2 = \pm 1 \text{ selon la branche choisie} \\ \Delta_2 = A_2^2 + B_2^2 - C_2^2 \end{cases} \quad (5.11)$$

$$\sin \varphi = \frac{B_2 C_2 + k_2 A_2 \sqrt{\Delta_2}}{A_2^2 + B_2^2}. \quad (5.12)$$

5.2.2 Analyse de la boucle de tangage

La boucle de tangage est beaucoup plus simple que la boucle de pilonnement. En effet, nous pouvons simplifier cinématiquement le mécanisme utilisé pour contrôler le tangage de l'aile comme un parallélogramme, donc l'angle de sortie est égal à l'angle d'entrée.

$$\theta_2 = \theta \quad (5.13)$$

5.2.3 Détermination des vitesses angulaires

Pour trouver les vitesses angulaires des différentes articulations, nous pouvons repartir des équations de contrainte de chacune des boucles. En dérivant l'équation (5.1)

et l'équation (5.2) par rapport au temps, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} a \sin \theta_1 & b \sin \beta_1 \\ a \cos \theta_1 & b \cos \beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\beta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \dot{\varphi} \sin \varphi \\ c \dot{\varphi} \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Cette dernière équation peut être écrite sous forme matricielle comme :

$$\mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{e} \quad (5.15)$$

où $\dot{\mathbf{u}} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\beta}_1]^T$ et $\mathbf{e} = [c\dot{\varphi} \sin \varphi \ c\dot{\varphi} \cos \varphi]^T$, ce qui nous permet maintenant de trouver les vitesses angulaires $\dot{\theta}_1$ et $\dot{\beta}_1$. Ensuite, nous pouvons dériver l'équation (5.13) afin d'obtenir :

$$\dot{\theta}_2 = \dot{\theta}, \quad (5.16)$$

ce qui, comme prévu, indique que la vitesse angulaire $\dot{\theta}_2$ est égale à la vitesse de tangage.

5.2.4 Détermination des accélérations angulaires

En suivant une démarche équivalente, nous pouvons maintenant déterminer les accélérations angulaires inconnues. En dérivant les équations (5.15) et (5.16) par rapport au temps, nous obtenons :

$$\mathbf{D}\ddot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{e}} - \dot{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{h} \quad \text{où : } \ddot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\beta}_1 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \ddot{\theta}. \quad (5.18)$$

Nous pouvons donc obtenir les accélérations angulaires des différentes membrures $\ddot{\theta}_1$, $\ddot{\beta}_1$ et $\ddot{\theta}_2$ si nous avons les fonctions décrivant le mouvement de l'aile : φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$, θ , $\dot{\theta}$ et $\ddot{\theta}$.

5.3 Dérivation des équations dynamiques

5.3.1 Accélération du centre de masse des membrures

À partir des équations de la cinématique du mécanisme AEGIR déterminées dans la section précédente, nous pouvons trouver l'accélération du centre de masse des membrures. Les équations utiliseront la nomenclature représentée dans la figure 5.4.

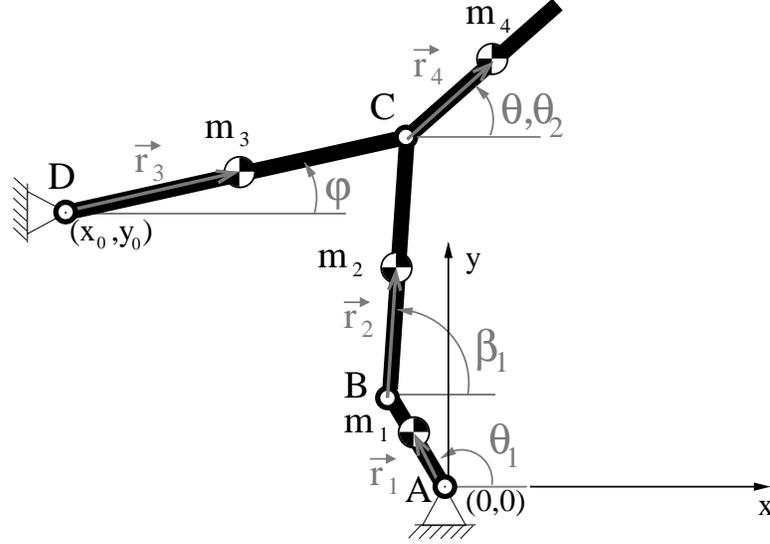


Figure 5.4: Schéma du mécanisme AEGIR avec le centre de masse des membrures.

Nous pouvons alors décrire les accélérations selon les formules suivantes :

$$\mathbf{a}_1 = \ddot{\theta}_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_1 - \dot{\theta}_1^2 \mathbf{r}_1 \quad (5.19)$$

$$\mathbf{a}_2 = \ddot{\theta}_1 \mathbf{E} \mathbf{l}_1 - \dot{\theta}_1^2 \mathbf{l}_1 + \ddot{\beta}_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_2 - \dot{\beta}_1^2 \mathbf{r}_2 \quad (5.20)$$

$$\mathbf{a}_3 = \ddot{\varphi} \mathbf{E} \mathbf{r}_3 - \dot{\varphi}^2 \mathbf{r}_3 \quad (5.21)$$

$$\mathbf{a}_4 = \ddot{\varphi} \mathbf{E} \mathbf{l}_3 - \dot{\varphi}^2 \mathbf{l}_3 + \ddot{\theta} \mathbf{E} \mathbf{r}_4 - \dot{\theta}^2 \mathbf{r}_4 \quad (5.22)$$

avec $\mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} r_i \cos \theta_i \\ r_i \sin \theta_i \end{bmatrix}$, $\mathbf{l}_i = \begin{bmatrix} l_i \cos \theta_i \\ l_i \sin \theta_i \end{bmatrix}$, et $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

où r_i : distance entre le début de la membrure i et son centre de masse,

l_i : longueur totale de la membrure i ,

θ_i : angle entre la membrure i et l'axe horizontal et

\mathbf{a}_i : accélération du centre de masse de la membrure i .

5.3.2 Forces et moments agissant aux centres de masse

Afin de pouvoir déterminer les équations dynamiques régissant le mécanisme AEGIR, nous devons décrire mathématiquement les forces, f_i , et moments, M_i , agissant au centre de masse de chacune des membrures. D'abord, la formule qui sera utilisée pour calculer les forces est :

$$\mathbf{f}_i = -m_i \mathbf{a}_i + m_i \mathbf{g} \quad (5.23)$$

où \mathbf{g} est l'accélération gravitationnelle. Ensuite, il faut que l'expression du tenseur d'inertie de chacune des bielles soit connu. En faisant l'hypothèse que les membrures sont des barres longues et minces avec I_{xx} comme inertie de section, tel qu'il avait été posé dans le chapitre 3, on a :

$$\mathbf{I}_{0i} = \mathbf{Q}_i \mathbf{I}_i \mathbf{Q}_i^T \text{ où } \mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{I}_{0i} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{12} m_i l_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{12} m_i l_i^2 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

Nous pouvons maintenant définir la valeur des moments en supposant que les tiges du mécanisme ont toutes un tenseur d'inertie de cette forme. On trouve :

$$\mathbf{M}_i = -\mathbf{I}_{0i} \dot{\omega}_i - \omega_i \times (\mathbf{I}_{0i} \omega_i) \quad (5.25)$$

$$\mathbf{M}_i = - \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{12} m_i l_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{12} m_i l_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_i \end{bmatrix} - \mathbf{0} \quad (5.26)$$

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{12} m_i l_i^2 \ddot{\theta}_i \end{bmatrix} \Rightarrow M_i = -\frac{1}{12} m_i l_i^2 \ddot{\theta}_i \quad (5.27)$$

5.3.3 Déplacements infinitésimaux

Les expressions des déplacements angulaires infinitésimaux seront nécessaires afin de déterminer les moments générés aux articulations 1 et 2 par les forces et moments engendrés par l'aile. Afin de déterminer leur expression, nous devons repartir, encore une fois, des équations de contrainte des deux boucles de membrures. En prenant la dérivée des équations (5.1) et (5.2) de même que (5.13), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} -b \sin \beta_1 & c \sin \varphi \\ -b \cos \beta_1 & c \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \beta_1 \\ \delta \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \delta \theta_1 \sin \theta_1 \\ a \delta \theta_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

c'est-à-dire,

$$\mathbf{G} \delta \mathbf{u} = \mathbf{v} \quad (5.29)$$

et

$$\delta \theta = \delta \theta_2, \quad (5.30)$$

ce qui nous donne les déplacements angulaires infinitésimaux $\delta \beta_1$, $\delta \varphi$ et $\delta \theta$. Connaissant les déplacements angulaires infinitésimaux des membrures, nous pouvons maintenant

calculer le déplacement de leur centre de masse en utilisant les formules suivantes :

$$\boldsymbol{\delta}_1 = \delta\theta_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_1 \quad (5.31)$$

$$\boldsymbol{\delta}_2 = \delta\theta_1 \mathbf{E} \mathbf{l}_1 + \delta\beta_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_2 \quad (5.32)$$

$$\boldsymbol{\delta}_3 = \delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{r}_3 \quad (5.33)$$

$$\boldsymbol{\delta}_4 = \delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{l}_3 + \delta\theta \mathbf{E} \mathbf{r}_4 \quad (5.34)$$

$$\boldsymbol{\delta}_C = \delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{l}_3 \quad (5.35)$$

où $\boldsymbol{\delta}_C$ est le déplacement linéaire infinitésimal du point C, le pivot de l'aile.

5.3.4 Détermination des moments générés

Finalement, en utilisant le principe du travail virtuel [20], il est possible de prouver que l'équation (5.36) peut s'employer. \mathbf{F} est alors le vecteur de force aérodynamique ayant une composante horizontale et verticale s'appliquant à l'axe de tangage de l'aile oscillante, alors que M est le moment engendré autour de cet axe.

$$\begin{aligned} \tau_1 \delta\theta_1 + \tau_2 \delta\theta_2 = & M_1 \delta\theta_1 + M_2 \delta\beta_1 + M_3 \delta\varphi + M_4 \delta\theta + M \delta\theta \\ & + \mathbf{f}_1^T \boldsymbol{\delta}_1 + \mathbf{f}_2^T \boldsymbol{\delta}_2 + \mathbf{f}_3^T \boldsymbol{\delta}_3 + \mathbf{f}_4^T \boldsymbol{\delta}_4 + \mathbf{F}^T \boldsymbol{\delta}_C \end{aligned} \quad (5.36)$$

Puisqu'il faut déterminer deux inconnues, τ_1 et τ_2 , utilisons deux cas simples afin d'obtenir par la suite deux équations. Ces cas sont arbitraires, mais comme l'équation (5.36) doit toujours être valide, il est préférable d'utiliser les cas les plus simples possibles. En effectuant les substitutions, nous obtenons les moments nécessaires aux articulations 1 et 2 pour équilibrer les forces générées par l'aile, donc le couple produit aux alternateurs.

1^{er} cas : $\delta\theta_1 = 1$ et $\delta\theta_2 = 0$.

$$\tau_1 = M_1 + M_2 \delta\beta_1 + M_3 \delta\varphi + \mathbf{f}_1^T \boldsymbol{\delta}_1 + \mathbf{f}_2^T \boldsymbol{\delta}_2 + \mathbf{f}_3^T \boldsymbol{\delta}_3 + \mathbf{f}_4^T \boldsymbol{\delta}_4 + \mathbf{F}^T \boldsymbol{\delta}_C \quad (5.37)$$

$$\tau_1 = M_1 + \mathbf{f}_1^T \mathbf{E} \mathbf{r}_1 + \mathbf{f}_2^T \mathbf{E} \mathbf{l}_1 + (M_2 + \mathbf{f}_2^T \mathbf{E} \mathbf{r}_2) \delta\beta_1 + (M_3 + \mathbf{f}_3^T \mathbf{E} \mathbf{r}_3 + (\mathbf{f}_4 + \mathbf{F})^T \mathbf{E} \mathbf{l}_3) \delta\varphi \quad (5.38)$$

2^e cas : $\delta\theta_1 = 0$ et $\delta\theta_2 = 1$.

$$\tau_2 = M_4 + M + \mathbf{f}_4^T \boldsymbol{\delta}_4 \quad (5.39)$$

$$\tau_2 = M_4 + M + \mathbf{f}_4^T \mathbf{E} \mathbf{r}_4 \quad (5.40)$$

5.4 Étude du dimensionnement des membrures

En reprenant le travail effectué dans la section 3.4 lors de l'étude du dimensionnement des membrures de Valkyrie 2, nous pouvons établir les longueurs de membrures d'AEGIR produisant le pilonnement adéquat, tel que présenté dans le tableau 5.1 et à la figure 5.5. En effet, le mécanisme AEGIR reprend la même architecture que Valkyrie 2 pour contrôler la position de l'aile comme nous avons pu le voir dans les sections 3.2 et 5.2, car les équations cinématiques de la boucle de pilonnement sont identiques (voir les équations (3.5) et (5.5)). Quant aux dimensions propres à la boucle de contrôle du tangage de l'aile, nous pouvons conclure que le mécanisme doit être semblable à un parallélogramme de telle sorte que l'angle θ soit égal à l'angle θ_2 . Il peut donc s'agir d'un système de poulies et courroie, de pignons et chaîne, d'un mécanisme parallélogramme à quatre barres ou encore d'une tige terminée par des liaisons à 90° afin de relier les deux axes et de s'assurer qu'ils effectuent tous deux le même déplacement angulaire.

Segments	x_0	y_0	a_1	b_1	c
Dimension [m]	-1,4142	2	0,5	2	1,5

Tableau 5.1: Dimensions proposées des membrures d'Aegir.

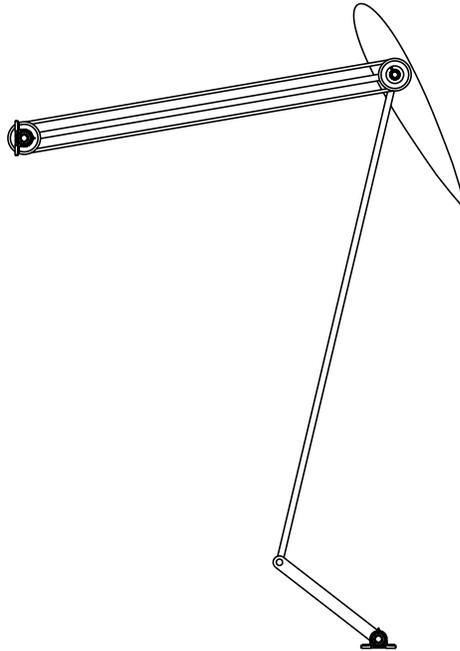


Figure 5.5: Mécanisme modélisé selon les dimensions du tableau 5.1.

5.5 Simulation

Les données numériques des forces et moment s'appliquant sur l'aile reproduites dans les figures 3.7 et 3.8 sont utilisées de nouveau afin de pouvoir comparer les mécanismes entre eux. Pour la même raison, un programme similaire à celui utilisé pour l'analyse de Valkyrie 2 a été construit pour AEGIR et les résultats seront présentés dans le même ordre que pour la section 3.5. Les positions angulaires θ_1 et θ_2 permettant de faire effectuer les trajectoires prescrites à l'aile sont donc calculées avec les équations (5.6), (5.7) et (5.13), puis tracées dans la figure 5.6.

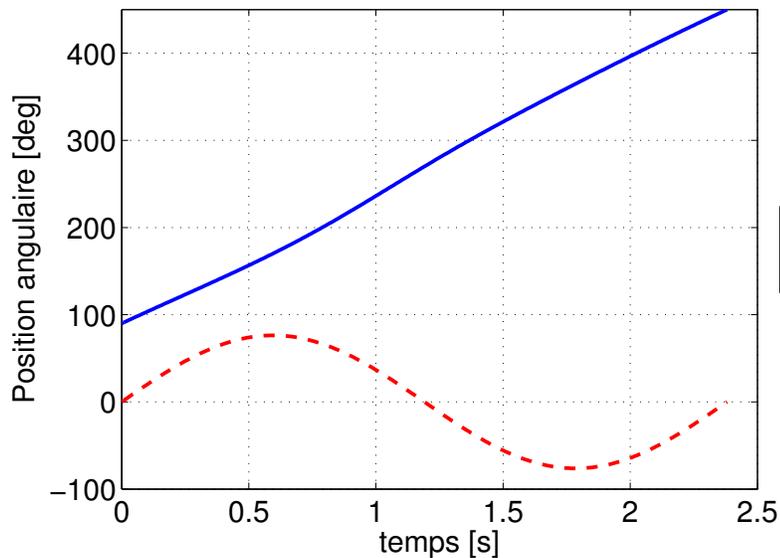


Figure 5.6: Positions angulaires θ_1 et θ_2 du mécanisme AEGIR.

Selon ces positions angulaires, il est possible de trouver les courbes de pignonement et de tangage obtenues pour s'assurer qu'elles suivent celles prescrites, comme le montrent les figures 5.7 et 5.8. Les équations (5.11), (5.12) et (5.13) ont maintenant été utilisées.

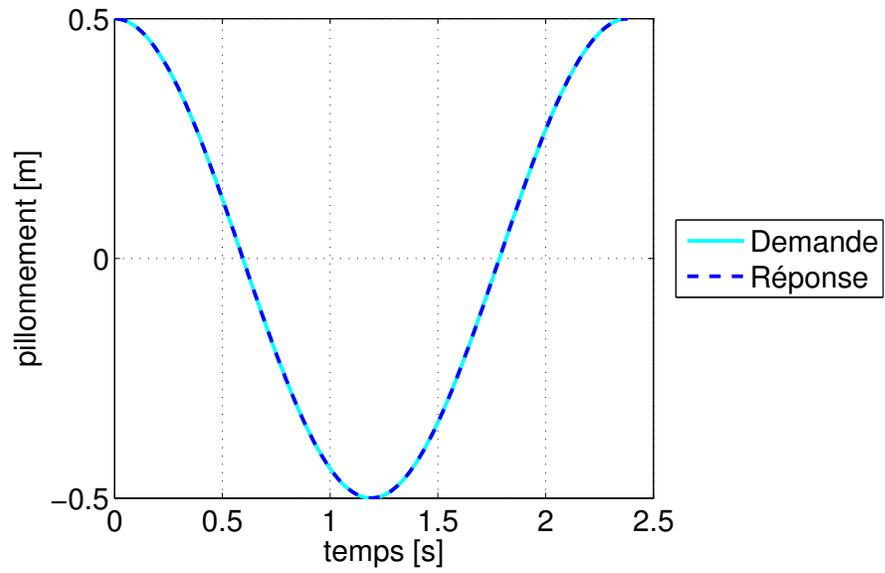


Figure 5.7: Pilonnement de l'aile obtenu avec le mécanisme AEGIR.

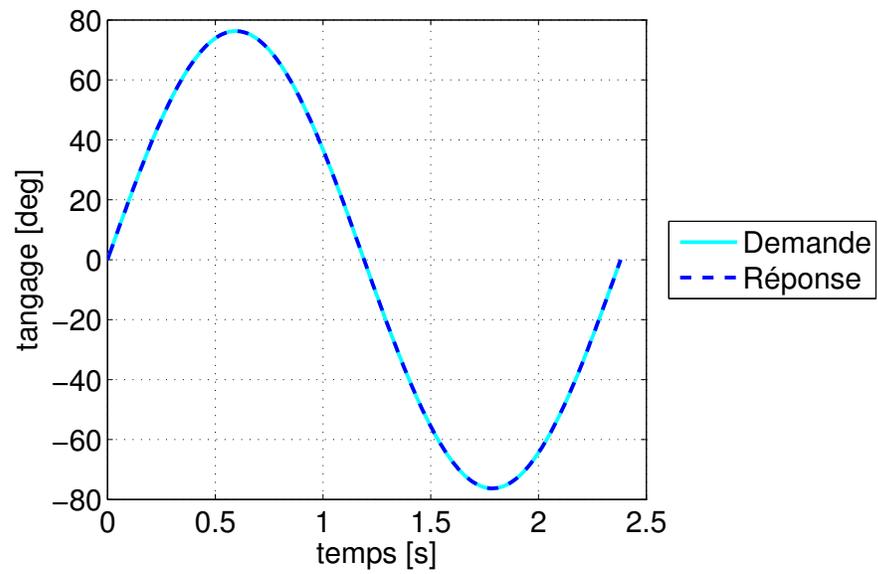


Figure 5.8: Tangage de l'aile obtenu avec le mécanisme AEGIR.

En utilisant les équations (5.38) et (5.40), nous pouvons déterminer les couples générés aux deux alternateurs comme le montre la figure 5.9.

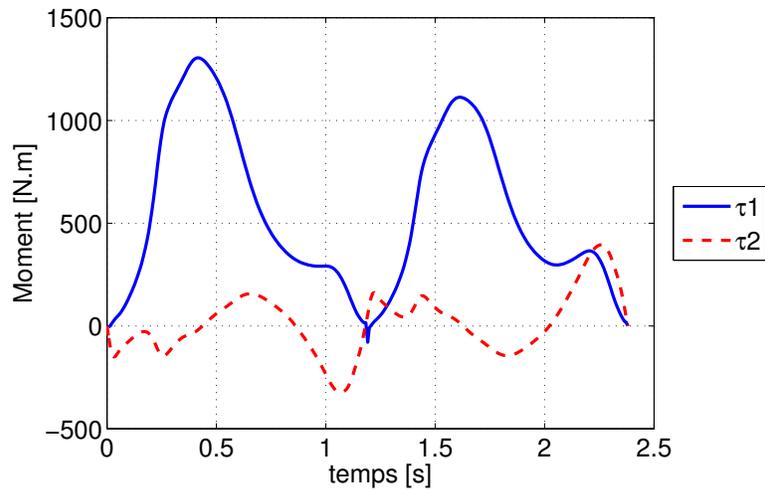


Figure 5.9: Couples générés aux alternateurs avec le mécanisme AEGIR.

Finalement, en multipliant la vitesse des alternateurs par leur couple généré ou requis, il est possible d'obtenir la puissance instantanée produite ou requise tel que retrouvé dans la figure 5.10. Cette figure montre bien que l'alternateur 1 est le principal producteur d'énergie, alors que le second n'en génère que très peu en contrôlant l'orientation de l'aile.

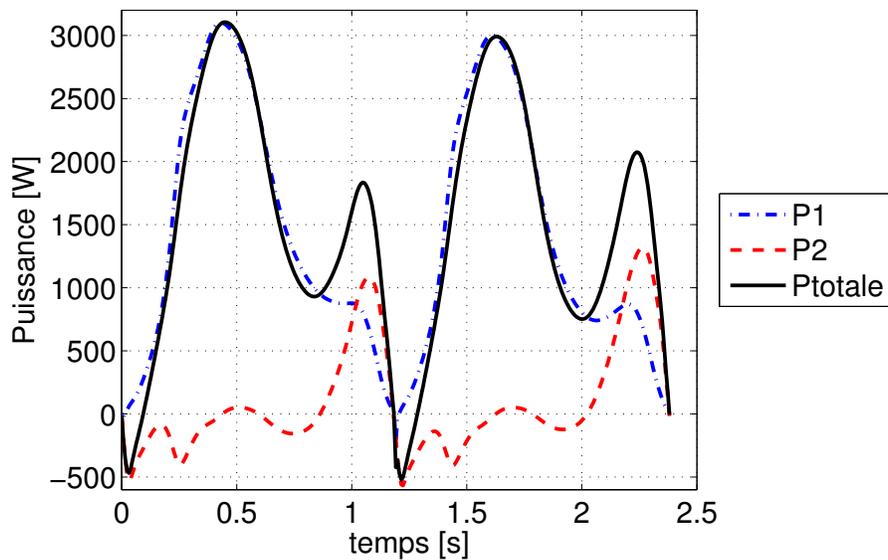


Figure 5.10: Puissances instantanées générées ou requises aux alternateurs.

5.6 Commentaires sur le mécanisme AEGIR

En utilisant une approche d'analyse similaire à celle utilisée pour Valkyrie 2, nous pouvons plus facilement comparer ces deux architectures. Il était d'abord évident qu'AEGIR permettait un contrôle découplé du tangage et du pilonnement, en opposition à Valkyrie 2. Aussi, ces deux architectures utilisent presque exclusivement des membrures en traction ou en compression, ce qui permet de maximiser la résistance de celles-ci pour un poids donné. De plus, puisque ce sont des mécanismes à deux degrés de liberté, ils permettent la modification de la fonction de tangage de l'aile en gardant la même fonction pour le pilonnement. Par ailleurs, AEGIR permet une rotation complète de l'aile pour toutes les positions verticales. Il est donc envisageable d'utiliser ce mécanisme à un endroit subissant des marées quotidiennes, car, lorsque le sens du courant s'inverse, AEGIR peut faire pivoter l'aile de 180° afin d'orienter celle-ci dans la bonne direction.

Par contre, l'utilisation d'une courroie ou d'une chaîne dans le fond marin peut être incommodant en comparaison à l'utilisation exclusive de liaisons rotoïdes pour Valkyrie 2. Il est cependant possible d'utiliser un arbre de transmission aux bouts duquel on place des paires d'engrenages coniques. On peut ainsi utiliser un arbre de transmission coulissant faisant office de liaison prismatique. Ce soin additionnel permettrait de faire coulisser l'aile sur la membrure effectuant le pilonnement, ce qui viendrait augmenter l'amplitude du mouvement vertical effectué par l'aile tout en ne modifiant pas le contrôle du tangage.

Finalement, comme nous avons pu le constater avec les figures 3.13 et 5.10, le contrôle du tangage demande plus de puissance pour Valkyrie 2 que pour AEGIR. Ce dernier nécessite en effet un plus petit moteur à la seconde liaison fixe, ce qui représente de plus faibles coûts de construction et d'entretien ainsi qu'une efficacité accrue puisque moins d'énergie est transmise dans le système. De plus, les figures 3.9 et 5.6 montrent bien que la fonction demandée au deuxième moteur est plus simple pour AEGIR que pour Valkyrie 2, ce qui vient faciliter son contrôle et donc optimiser l'algorithme associé. Pour toutes ces raisons, il est intéressant de poursuivre l'analyse du mécanisme AEGIR en étudiant son utilisation pour contrôler un système d'ailes oscillantes en tandem.

Chapitre 6

Étude du système AEGIR tandem

*Ce qui est aujourd'hui un paradoxe pour nous
sera pour la postérité une vérité démontrée.*

Denis Diderot

Comme pour le chapitre 4, nous allons étudier la possibilité d'ajouter une seconde aile en tandem qui effectuerait aussi des mouvements sinusoïdaux avec une avance de phase de 180° . Bien entendu, les mécanismes de la section 4.1 ne seront pas investigués à nouveau, bien qu'ils puissent aussi être applicables pour un système AEGIR tandem. Cette étude se base plutôt sur la spécificité d'AEGIR, soit le contrôle de l'orientation des ailes par l'axe de rotation central. De plus, comme dans les chapitres 3 et 5, une analyse dynamique du système proposé sera effectuée de manière à prévoir les puissances extraites aux alternateurs. Par contre, les données numériques utilisées pour calculer les forces aérodynamiques ne seront pas celles reproduites au début de la section 3.5, mais sont plutôt celles d'un cas concret où un éventuel prototype de système d'ailes oscillantes en tandem sera placé. Les spécifications de ce cas particulier sont reproduites dans l'annexe D.

6.1 Définition du mécanisme

Lors de la définition du mécanisme AEGIR dans la section 5.1, il a été mentionné que le contrôle du tangage est découplé de celui du pilonnement. En effet, puisque le pivot de la membrure c reliant directement l'aile au sol et l'actuateur 2 sont coaxiaux, nous pouvons conclure qu'une rotation de la membrure c n'entraîne pas de modification de l'angle de tangage de l'aile. Cela est dû au fait que le mécanisme dirigeant le tangage peut être comparé à un parallélogramme : peu importe l'angle de la membrure intermédiaire, c'est seulement la rotation de l'actuateur 2 qui modifiera l'orientation de l'aile, d'où sa qualification de contrôle découplé. Il est donc souhaitable de concevoir une architecture pour le système AEGIR tandem utilisant le même stratagème afin de préserver ce contrôle découplé. Un montage utilisant deux systèmes de courroie et poulies pourrait ressembler à celui illustré à la figure 6.1. À partir de cette architecture proposée, nous pouvons schématiser le système comme dans la figure 6.2 afin d'établir les équations gouvernant ce mécanisme.

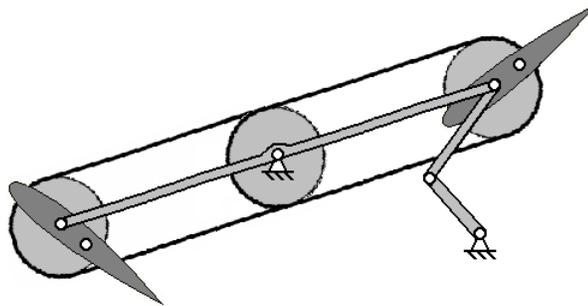


Figure 6.1: Montage tandem d'ailes oscillantes avec le mécanisme AEGIR.

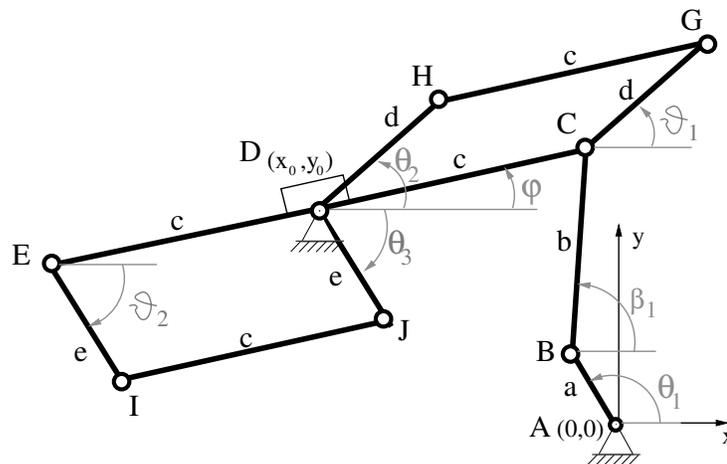


Figure 6.2: Schéma du mécanisme AEGIR tandem simplifié.

Puisque deux angles de tangage sont maintenant imposés, nous utiliserons les symboles ϑ_1 et ϑ_2 pour désigner l'orientation de l'aile aval et de l'aile amont afin de ne pas les confondre avec les symboles définissant l'orientation des actionneurs, θ_1 , θ_2 et θ_3 . En effet, comme trois fonctions doivent être reproduites, $h(t)$, $\vartheta_1(t)$ et $\vartheta_2(t)$, nous utiliserons d'abord un système à trois degrés de liberté, donc avec trois actionneurs. Ceux-ci pourront ensuite être couplés si l'application envisagée le demande, mais toujours de façon à obtenir les mêmes mouvements pour θ_1 , θ_2 et θ_3 . De plus, comme pour le cas avec une aile, chacune des paires poulies-courroie pourrait être remplacée par une chaîne et des pignons ou encore par un arbre de transmission avec des paires d'engrenages coniques. En fait, elles pourraient être remplacées par tout système transmettant la rotation d'un arbre à un second placé parallèlement sur une même membrure de longueur fixe, comme le ferait un parallélogramme.

6.2 Dérivation des équations cinématiques

Puisque le système de contrôle du pilonnement d'AEGIR tandem est le même que celui d'AEGIR, l'équation (5.5) est reprise ici (voir l'équation (6.1)). De plus, comme deux parallélogrammes sont utilisés pour contrôler l'orientation des ailes, les angles de tangage d'entrée sont égaux aux angles de sortie, ce qui donne les équations (6.2) et (6.3).

$$C_1 = A_1 \cos \theta_1 + B_1 \sin \theta_1 \quad \text{où : } \begin{cases} A_1 = 2 a_1 (x_0 + c \cos \varphi) \\ B_1 = 2 a_1 (y_0 + c \sin \varphi) \\ C_1 = x_0^2 + y_0^2 + a^2 - b^2 + c^2 \\ \quad + 2 c (x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi) . \end{cases} \quad (6.1)$$

$$\theta_2 = \vartheta_1 \quad (6.2)$$

$$\theta_3 = \vartheta_2 \quad (6.3)$$

Comme dans la section 5.2, il est possible d'établir les équations de vitesse et d'accélération des coordonnées articulaires.

$$\mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{e} \quad \text{où } \dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\beta}_1 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} a \sin \theta_1 & b \sin \beta_1 \\ a \cos \theta_1 & b \cos \beta_1 \end{bmatrix}, \mathbf{e} = \begin{bmatrix} c \dot{\varphi} \sin \varphi \\ c \dot{\varphi} \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$\dot{\theta}_2 = \dot{\vartheta}_1 \quad (6.5)$$

$$\dot{\theta}_3 = \dot{\vartheta}_2 \quad (6.6)$$

$$\mathbf{D}\ddot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{e}} - \dot{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{u}} \quad \text{où : } \ddot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\beta}_1 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \ddot{\vartheta}_1 \quad (6.8)$$

$$\ddot{\theta}_3 = \ddot{\vartheta}_2 \quad (6.9)$$

6.3 Dérivation des équations dynamiques

À partir des équations de la cinématique du mécanisme AEGIR tandem déterminées dans la section précédente, nous pouvons trouver l'accélération du centre de masse des membrures. Les équations utiliseront la nomenclature représentée dans la figure (6.3). Nous pouvons alors décrire les accélérations selon les formules suivantes :

$$\mathbf{a}_1 = \ddot{\theta}_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_1 - \dot{\theta}_1^2 \mathbf{r}_1 \quad (6.10)$$

$$\mathbf{a}_2 = \ddot{\theta}_1 \mathbf{E} \mathbf{l}_1 - \dot{\theta}_1^2 \mathbf{l}_1 + \ddot{\beta}_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_2 - \dot{\beta}_1^2 \mathbf{r}_2 \quad (6.11)$$

$$\mathbf{a}_3 = \ddot{\varphi} \mathbf{E} \mathbf{r}_3 - \dot{\varphi}^2 \mathbf{r}_3 \quad (6.12)$$

$$\mathbf{a}_4 = \ddot{\varphi} \mathbf{E} \mathbf{l}_3 - \dot{\varphi}^2 \mathbf{l}_3 + \ddot{\vartheta}_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_4 - \dot{\vartheta}_1^2 \mathbf{r}_4 \quad (6.13)$$

$$\mathbf{a}_5 = -\ddot{\varphi} \mathbf{E} \mathbf{l}_3 + \dot{\varphi}^2 \mathbf{l}_3 + \ddot{\vartheta}_2 \mathbf{E} \mathbf{r}_5 - \dot{\vartheta}_2^2 \mathbf{r}_5 \quad (6.14)$$

$$\mathbf{a}_6 = \ddot{\vartheta}_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_6 - \dot{\vartheta}_1^2 \mathbf{r}_6 \quad (6.15)$$

$$\mathbf{a}_7 = \ddot{\vartheta}_2 \mathbf{E} \mathbf{r}_7 - \dot{\vartheta}_2^2 \mathbf{r}_7 \quad (6.16)$$

$$\text{avec } \mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} r_i \cos \theta_i \\ r_i \sin \theta_i \end{bmatrix}, \mathbf{l}_i = \begin{bmatrix} l_i \cos \theta_i \\ l_i \sin \theta_i \end{bmatrix}, \text{ et } \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

où r_i : distance entre le début de la membrure i et son centre de masse,

l_i : longueur totale de la membrure i , sauf pour l_3 qui vaut $l_3 = \overline{CD} = \overline{DE}$,

θ_i : angle entre la membrure i et l'axe horizontale et

\mathbf{a}_i : accélération du centre de masse de la membrure i .

De même, les forces, \mathbf{f}_i , et moments, M_i , agissant au centre de masse de chacune des membrures sont calculés avec les équations suivantes :

$$\mathbf{f}_i = -m_i \mathbf{a}_i + m_i \mathbf{g} \quad (6.17)$$

$$M_i = -I_i \ddot{\theta}_i = -\frac{1}{12} m_i l_i^2 \ddot{\theta}_i \quad \text{dans le cas de longue bielle mince.} \quad (6.18)$$

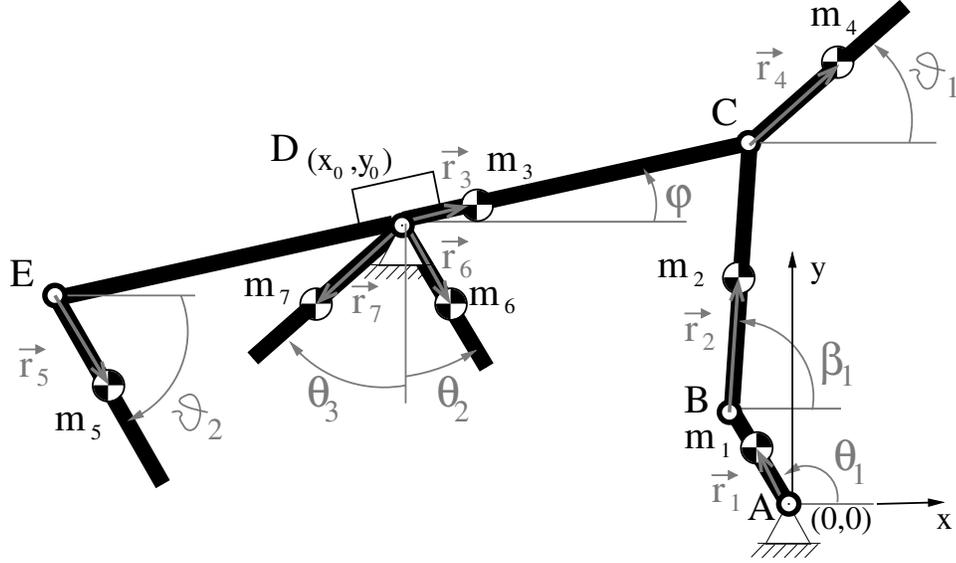


Figure 6.3: Schéma du système AEGIR tandem avec le centre de masse des membrures.

Les expressions des déplacements infinitésimaux des centres de gravité seront aussi nécessaires pour déterminer les moments générés aux liaisons 1, 2 et 3 par les forces et moments engendrés par les ailes.

$$\boldsymbol{\delta}_1 = \delta\theta_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_1 \quad (6.19)$$

$$\boldsymbol{\delta}_2 = \delta\theta_1 \mathbf{E} \mathbf{l}_1 + \delta\beta_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_2 \quad (6.20)$$

$$\boldsymbol{\delta}_3 = \delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{r}_3 \quad (6.21)$$

$$\boldsymbol{\delta}_4 = \delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{l}_3 + \delta\vartheta_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_4 \quad (6.22)$$

$$\boldsymbol{\delta}_5 = -\delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{l}_3 + \delta\vartheta_2 \mathbf{E} \mathbf{r}_5 \quad (6.23)$$

$$\boldsymbol{\delta}_6 = \delta\vartheta_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_6 \quad (6.24)$$

$$\boldsymbol{\delta}_7 = \delta\vartheta_1 \mathbf{E} \mathbf{r}_7 \quad (6.25)$$

$$\boldsymbol{\delta}_C = \delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{l}_3 \quad (6.26)$$

$$\boldsymbol{\delta}_E = -\delta\varphi \mathbf{E} \mathbf{l}_3. \quad (6.27)$$

Les déplacements angulaires infinitésimaux $\delta\beta_1$, $\delta\varphi$, $\delta\vartheta_1$ et $\delta\vartheta_2$ peuvent être mis en fonction de $\delta\theta_1$, $\delta\theta_2$ et $\delta\theta_3$:

$$\begin{bmatrix} -b \sin \beta_1 & c \sin \varphi \\ -b \cos \beta_1 & c \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\beta_1 \\ \delta\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \delta\theta_1 \sin \theta_1 \\ a \delta\theta_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

c'est-à-dire,

$$\mathbf{G} \delta \mathbf{u} = \mathbf{v} \quad (6.29)$$

et

$$\delta\vartheta_1 = \delta\theta_2 \quad (6.30)$$

$$\delta\vartheta_2 = \delta\theta_3 \quad (6.31)$$

Finalement, en utilisant le principe du travail virtuel [20], il est possible de prouver que l'équation (6.32) peut s'employer. \mathbf{F}_{A1} et \mathbf{F}_{A2} sont alors les vecteurs de forces aérodynamiques ayant des composantes horizontales et verticales s'appliquant respectivement aux axes de tangage de l'aile oscillante aval et amont, alors que M_{A1} et M_{A2} sont les moments ressentis par les ailes autour de ces axes.

$$\begin{aligned} \tau_1 \delta\theta_1 + \tau_2 \delta\theta_2 + \tau_3 \delta\theta_3 &= M_1 \delta\theta_1 + M_2 \delta\beta_1 + M_3 \delta\varphi + M_4 \delta\vartheta_1 \\ &+ M_5 \delta\vartheta_2 + M_6 \delta\theta_2 + M_7 \delta\theta_3 + \mathbf{f}_1^T \boldsymbol{\delta}_1 \\ &+ \mathbf{f}_2^T \boldsymbol{\delta}_2 + \mathbf{f}_3^T \boldsymbol{\delta}_3 + \mathbf{f}_4^T \boldsymbol{\delta}_4 + \mathbf{f}_5^T \boldsymbol{\delta}_5 + \mathbf{f}_6^T \boldsymbol{\delta}_6 + \mathbf{f}_7^T \boldsymbol{\delta}_7 \\ &+ M_{A1} \delta\vartheta_1 + M_{A2} \delta\vartheta_2 + \mathbf{F}_{A1}^T \boldsymbol{\delta}_C + \mathbf{F}_{A2}^T \boldsymbol{\delta}_E \end{aligned} \quad (6.32)$$

Comme pour le chapitre 5, utilisons des cas simples de manière à poser des équations gouvernant les différents couples ressentis aux actionneurs.

1^{er} cas : $\delta\theta_1 = 1$, $\delta\theta_2 = 0$ et $\delta\theta_3 = 0$.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= M_1 + M_2 \delta\beta_1 + M_3 \delta\varphi + \mathbf{f}_1^T \boldsymbol{\delta}_1 + \mathbf{f}_2^T \boldsymbol{\delta}_2 + \mathbf{f}_3^T \boldsymbol{\delta}_3 + \mathbf{f}_4^T \boldsymbol{\delta}_4 \\ &+ \mathbf{f}_5^T \boldsymbol{\delta}_5 + \mathbf{F}_{A1}^T \boldsymbol{\delta}_C + \mathbf{F}_{A2}^T \boldsymbol{\delta}_E \end{aligned} \quad (6.33)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= M_1 + \mathbf{f}_1^T \mathbf{E} \mathbf{r}_1 + \mathbf{f}_2^T \mathbf{E} \mathbf{l}_1 + (M_2 + \mathbf{f}_2^T \mathbf{E} \mathbf{r}_2) \delta\beta_1 \\ &+ (M_3 + \mathbf{f}_3^T \mathbf{E} \mathbf{r}_3 + (\mathbf{f}_4 + \mathbf{F}_{A1} - \mathbf{f}_5 - \mathbf{F}_{A2})^T \mathbf{E} \mathbf{l}_3) \delta\varphi \end{aligned} \quad (6.34)$$

2^e cas : $\delta\theta_1 = 0$, $\delta\theta_2 = 1$ et $\delta\theta_3 = 0$.

$$\tau_2 = M_4 + M_6 + \mathbf{f}_4^T \boldsymbol{\delta}_4 + \mathbf{f}_6^T \boldsymbol{\delta}_6 + M_{A1} \quad (6.35)$$

$$\tau_2 = M_4 + M_6 + \mathbf{f}_4^T \mathbf{E} \mathbf{r}_4 + \mathbf{f}_6^T \mathbf{E} \mathbf{r}_6 + M_{A1} \quad (6.36)$$

3^e cas : $\delta\theta_1 = 0$, $\delta\theta_2 = 0$ et $\delta\theta_3 = 1$.

$$\tau_3 = M_5 + M_7 + \mathbf{f}_5^T \boldsymbol{\delta}_5 + \mathbf{f}_7^T \boldsymbol{\delta}_7 + M_{A2} \quad (6.37)$$

$$\tau_3 = M_5 + M_7 + \mathbf{f}_5^T \mathbf{E} \mathbf{r}_5 + \mathbf{f}_7^T \mathbf{E} \mathbf{r}_7 + M_{A2} \quad (6.38)$$

6.4 Étude du dimensionnement des membrures

Tel qu'il est spécifié dans l'annexe D, la distance c entre les ailes et le pivot de pilonnement doit être de 1 mètre. Un programme *Matlab* a donc été créé afin de trouver les dimensions du mécanisme de pilonnement permettant d'effectuer une sinusoïdale ayant une amplitude de 0,37 mètre pour le déplacement vertical du point C , donc une amplitude φ_0 de $21,7156^\circ$. La longueur de la membrure \overline{CD} est imposée à 1 mètre et la bielle \overline{AB} doit tourner à vitesse constante, tel que représenté dans la figure 6.4 et dans les équations (6.39) et (6.40). Aussi, le mécanisme de tangage n'est pas étudié, puisqu'il s'agit d'utiliser un système semblable à un parallélogramme pour contrôler l'orientation de l'aile, tel un assemblage de poulies et courroie.

$$\varphi(t) = \varphi_0 \sin(2\pi t) \quad (6.39)$$

$$\theta_1(t) = 2\pi t + \theta_{10} \quad (6.40)$$

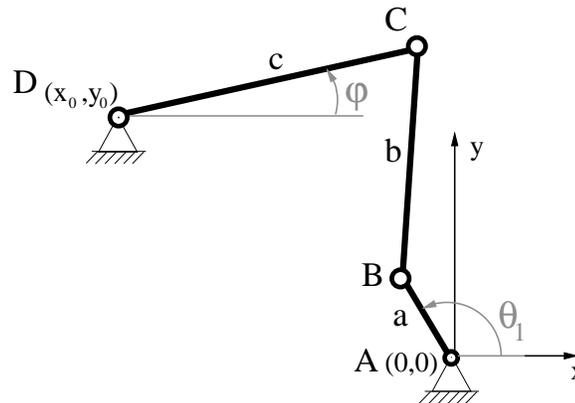


Figure 6.4: Schéma du mécanisme de pilonnement.

Les résultats obtenus avec ce programme d'optimisation sont inscrits dans le tableau 6.1 ci-dessous. Ces dimensions peuvent maintenant être utilisées pour effectuer des simulations dynamiques du système, puisqu'il reproduit assez bien la fonction de pilonnement demandée.

Variable	x_0	y_0	a	b	c	θ_{10}
Dimension	$-1,4316 \text{ m}$	$1,7704 \text{ m}$	$0,358 \text{ m}$	$1,85 \text{ m}$	1 m	$0,243 \text{ rad}$

Tableau 6.1: Dimensions proposées des membrures du mécanisme de pilonnement.

6.5 Simulation

6.5.1 Programme *Matlab*

Un programme *Matlab* a été développé afin de simuler numériquement le comportement dynamique du système AEGIR tandem. D'abord, les nouveaux coefficients de pression calculés par le *Laboratoire de mécanique des fluides numérique de l'Université Laval* seront convertis en forces et en moments agissant sur les ailes avec les paramètres donnés dans le tableau 6.2 et les équations (6.41) à (6.46).

Paramètre	U_∞	ρ_{eau}	envergure : b'	corde : c'
Valeur	1,5 m/s	999 kg/m ³	2 m	0,37 m

Tableau 6.2: Paramètres utilisés dans la simulation du système AEGIR tandem.

$$F_{x1} = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b' c' C_{x1} \quad (6.41)$$

$$F_{y1} = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b' c' C_{y1} \quad (6.42)$$

$$M_1 = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b' c'^2 C_{M1} \quad (6.43)$$

$$F_{x2} = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b' c' C_{x2} \quad (6.44)$$

$$F_{y2} = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b' c' C_{y2} \quad (6.45)$$

$$M_2 = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b' c'^2 C_{M2} \quad (6.46)$$

Les données obtenues avec ces paramètres et équations sont reproduites dans les graphes des figures 6.5 et 6.6. L'aile 1 a été posée comme l'aile en aval, alors que l'aile 2 est celle en amont. C'est d'ailleurs cette dernière qui débute son mouvement à sa position verticale maximale, alors que l'aile 1 commence à sa position minimale, comme le montre la figure 6.8.

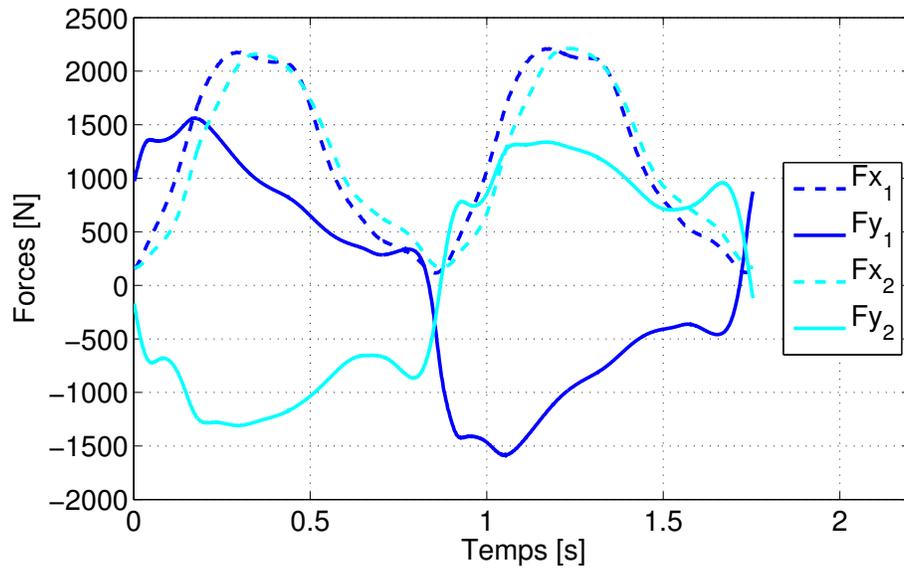


Figure 6.5: Forces agissant sur les ailes selon les paramètres du tableau 6.2.

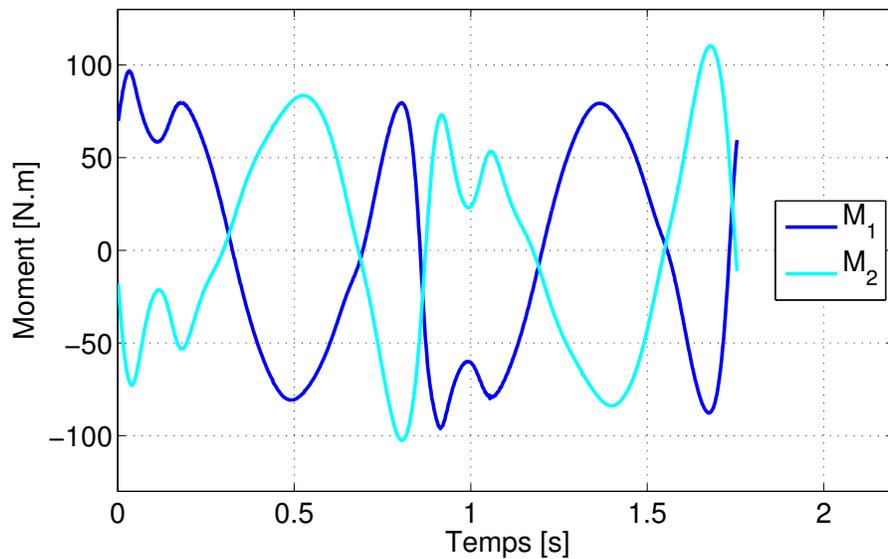


Figure 6.6: Moments agissant sur les ailes selon les paramètres du tableau 6.2.

Les positions angulaires θ_1 , θ_2 et θ_3 permettant de faire effectuer des trajectoires similaires à celles prescrites à l'aile sont ensuite calculées avec les équations (6.40), (6.2) et (6.3) respectivement, puis tracées dans la figure 6.7. Cette fois, plutôt que de trouver la position du moteur 1 donnant exactement le pilonnement demandé avec l'équation (6.1), nous utiliserons l'équation (6.40) afin d'obtenir une vitesse constante pour l'actuateur du pilonnement, θ_1 , à l'instar du fonctionnement d'un éventuel système réel.

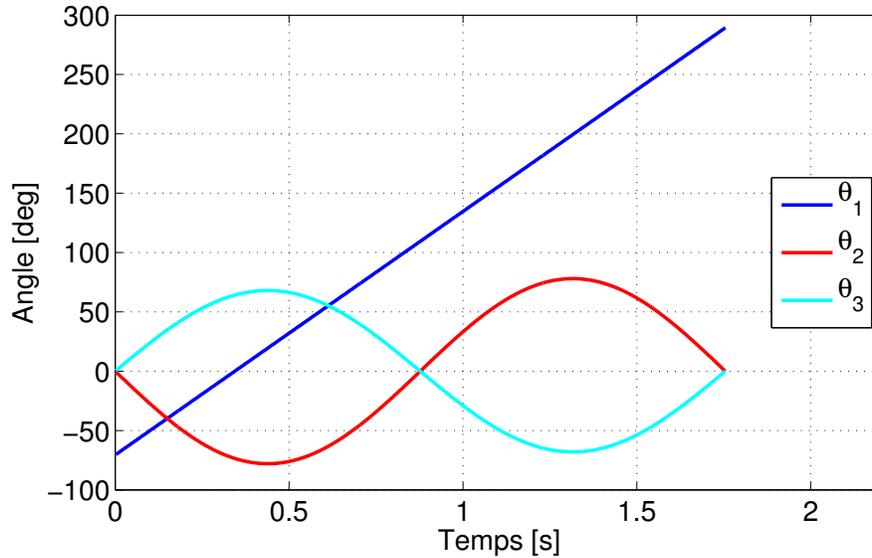


Figure 6.7: Position angulaires θ_1 , θ_2 et θ_3 du système AEGIR tandem.

Selon ces positions angulaires, il est possible de trouver les courbes de pilonnement et de tangage obtenues pour s'assurer qu'elles suivent celles prescrites, comme le montrent les figures 6.8 et 6.9. Les équations (5.11), (5.12), (6.2) et (6.3) ont maintenant été utilisées. Nous pouvons alors voir que les courbes de pilonnement des ailes ne suivent plus parfaitement celles prescrites, mais que cette différence est acceptable compte tenu qu'elle permet une rotation avec une vitesse constante de l'alternateur principal, θ_1 . Pour ce qui est du tangage, il est bien entendu évident que les courbes obtenues suivent celles prescrites, car θ_2 et θ_3 ont été pris afin d'obtenir les valeurs de ϑ_1 et ϑ_2 imposées.

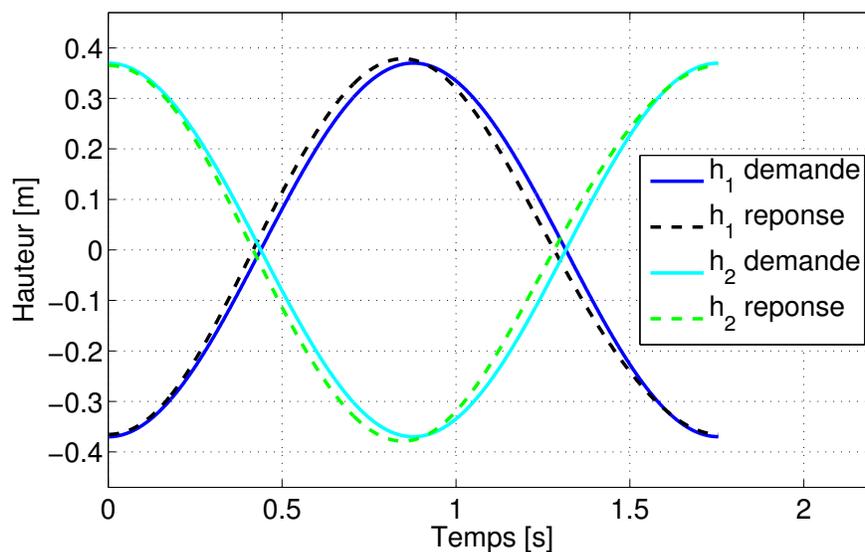


Figure 6.8: Pilonnement des ailes obtenu avec le système AEGIR tandem.

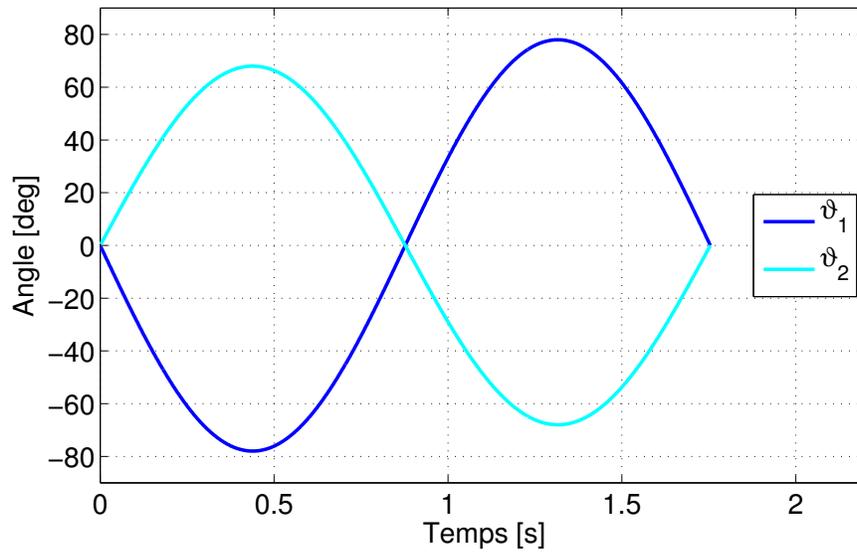


Figure 6.9: Tangage des ailes obtenu avec le système AEGIR tandem.

En utilisant les équations (6.34), (6.36) et (6.38), nous pouvons déterminer les couples générés aux trois alternateurs comme le montre la figure 6.10. On peut maintenant remarquer qu'il n'y a plus de pic de couple négatif pour le moteur 1 au changement de branche de solution du mécanisme de pilonnement, c'est-à-dire à la moitié de la période. En effet, on impose maintenant la rotation constante de l'alternateur 1 plutôt que l'obtention d'une fonction de pilonnement égale à celle demandée, ce qui entraînait justement cet appel à un pic de couple négatif dans les figures 3.12 et 5.9.

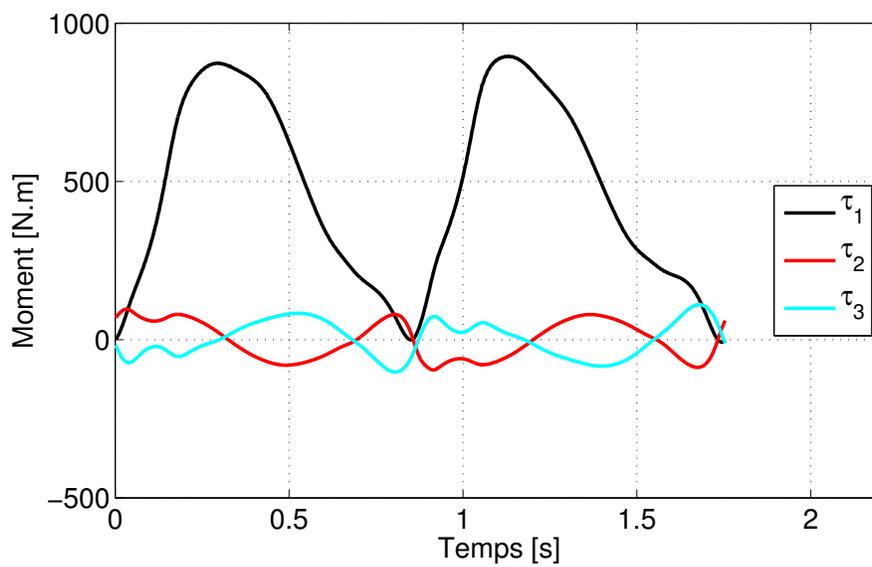


Figure 6.10: Couples générés aux alternateurs avec le système AEGIR tandem.

La figure 6.10 a été obtenue en posant les inerties et les masses des membrures comme étant nulles afin d’observer uniquement les contributions des forces et moments agissant sur les ailes. Finalement, en multipliant la vitesse des alternateurs par leur couple généré ou requis, il est possible d’obtenir la puissance instantanée produite ou requise tel que retrouvé dans la figure 6.11. Cette figure montre bien que l’alternateur 1 est le principal producteur d’énergie, alors que les deux autres demandent un peu d’énergie afin de contrôler l’orientation des ailes.

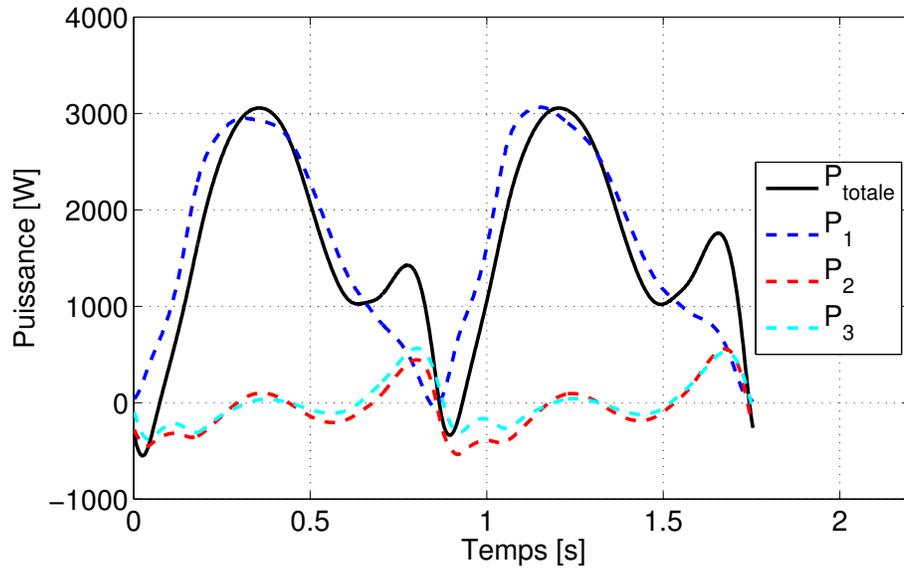


Figure 6.11: Puissances instantanées générées ou requises aux alternateurs.

Les résultats de cette simulation sont reproduits dans le tableau 6.3, où \bar{P}_i est la puissance moyenne de l’actuateur i et P_{dispo} est la puissance totale disponible pour la fenêtre d’écoulement donnée et calculée avec l’équation (6.47). La fenêtre d’écoulement est trouvée avec la hauteur d' , c’est-à-dire la distance entre les deux positions verticales extrêmes d’un des bords de fuite, tel que vu dans la figure 1. Finalement, l’efficacité est trouvée en divisant la puissance totale moyenne par la puissance disponible sur un cycle.

$$P_{dispo} = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 b' d' \quad (6.47)$$

Résultats	\bar{P}_1	\bar{P}_2	\bar{P}_3	\bar{P}_{totale}	P_{dispo}	d'	efficacité
Valeur	1,62 kW	-75,4 W	-10,5 W	1,54 kW	3,25 kW	0,964 m	47,3 %

Tableau 6.3: Résultats de la simulation dynamique du système AEGIR tandem.

6.5.2 Validation avec *ADAMS*

Puisque toutes les simulations dynamiques effectuées jusqu'à présent utilisaient différents programmes *Matlab* basés sur un même algorithme, il est maintenant opportun de valider cette méthode avec un autre type de calculateur, soit le logiciel *ADAMS*. Nous pourrions ainsi confirmer les résultats des précédents chapitres si cette nouvelle simulation donne des courbes similaires à celles obtenues avec l'algorithme implanté en *Matlab*.

Le système AEGIR tandem a donc été modélisé dans *ADAMS/View* en se basant sur la figure 6.3 ainsi qu'en utilisant les dimensions trouvées lors de l'étude du dimensionnement des membrures effectuée au cours de la section 6.4 et transcrites dans le tableau 6.1. Ce modèle est d'ailleurs reproduit dans la figure 6.12.

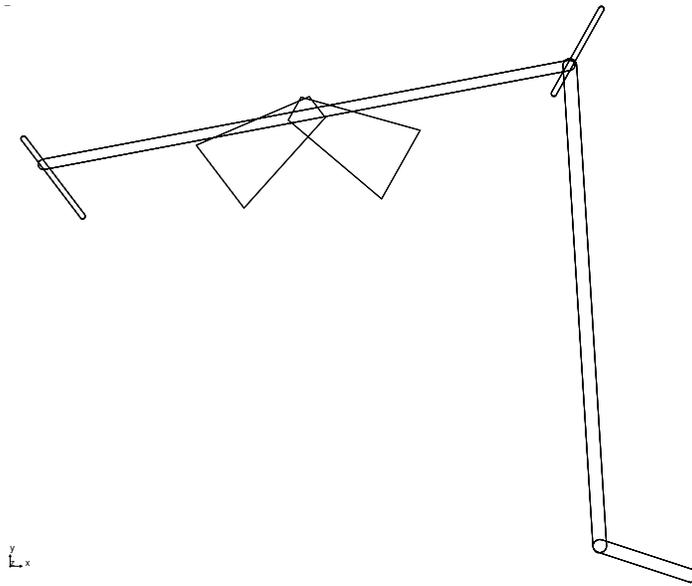


Figure 6.12: Système AEGIR tandem modélisé avec *ADAMS/View*.

À l'instar de la simulation dynamique effectuée avec *Matlab*, les inerties et les masses des membrures et des ailes ont été mises à 0 afin d'obtenir des courbes identiques. Aussi, les coefficients de forces et de moments s'appliquant sur les ailes pour chaque pas de temps ont été importés dans *ADAMS*, puis convertis en force et moment avec les paramètres du tableau 6.2 ainsi qu'avec les équations (6.41) à (6.46). Des splines cubiques ont ensuite été créées à partir des courbes de forces et de moments ainsi obtenues afin de pouvoir imposer celles-ci sur le modèle.

D'abord, les courbes des positions angulaires θ_1 , θ_2 et θ_3 ont été comparées avec celles obtenues précédemment, comme le montre la figure 6.13. Encore cette fois, l'équation (6.40) a été utilisée pour imposer une vitesse constante à l'actuateur du pilonnement, θ_1 . Les fonctions (6.2) et (6.3) ont aussi été imposées aux actuateurs de tangage, donc leur position était gouvernée par une sinusoïde. Il est donc normal d'obtenir exactement les mêmes courbes pour les positions angulaires des alternateurs.

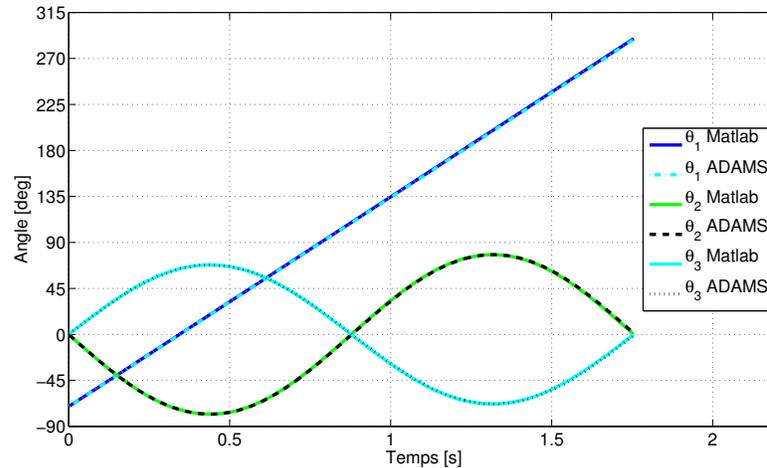


Figure 6.13: Comparaison des positions angulaires obtenues avec *Matlab* et *ADAMS*.

Les courbes de pilonnement et de tangage obtenues sont elles aussi identiques, comme le montrent les figures 6.14 et 6.15.

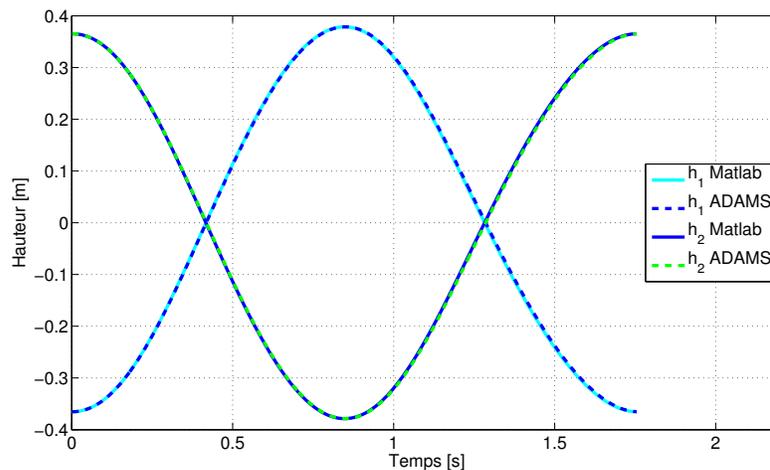


Figure 6.14: Comparaison des pilonnements obtenus avec *Matlab* et *ADAMS*.

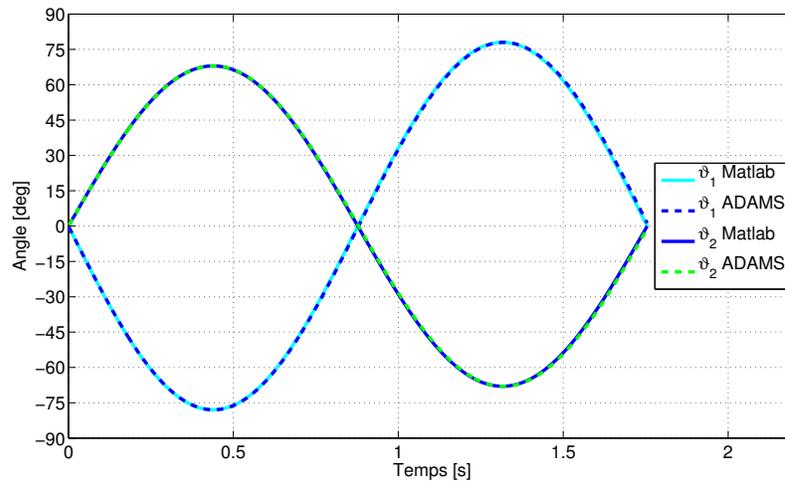


Figure 6.15: Comparaison des tangages obtenus avec *Matlab* et *ADAMS*.

La figure 6.16 démontre quant à elle que les couples générés aux trois alternateurs sont équivalents pour les deux méthodes utilisées. Dans le logiciel *ADAMS*, le couple généré peut facilement être trouvé en prenant l'inverse du couple requis pour produire un mouvement à un actionneur.

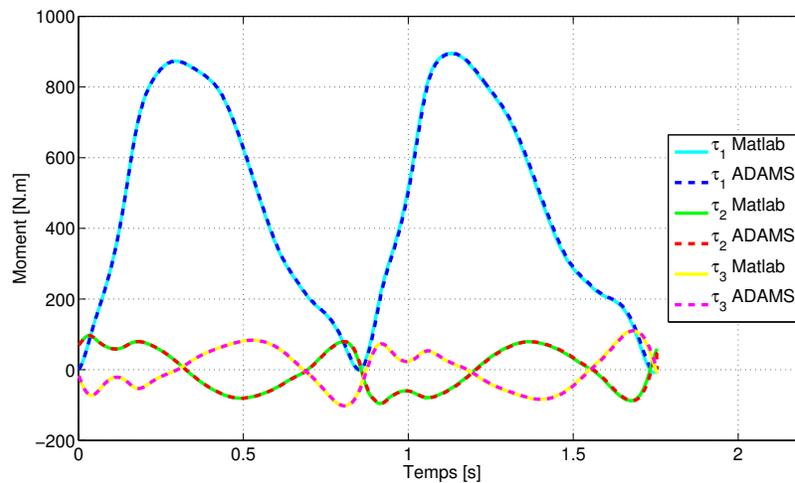


Figure 6.16: Comparaison des couples obtenus avec *Matlab* et *ADAMS*.

Finalement, en utilisant l'inverse de la puissance nécessaire aux moteurs, il est possible d'obtenir la puissance instantanée produite tel que retrouvé dans la figure 6.17. Cette figure montre bien que les puissances obtenues sont analogues dans les deux cas.

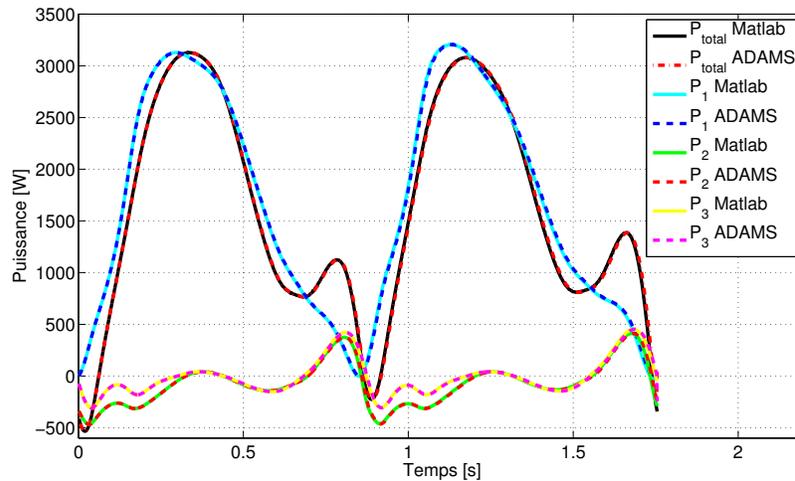


Figure 6.17: Comparaison des puissances instantanées obtenues avec *Matlab* et *ADAMS*.

Étant donné que le modèle *ADAMS* donne les mêmes résultats que le programme *Matlab*, nous pouvons conclure que la méthode utilisée jusqu'à présent se basant sur l'approche du travail virtuel mise en oeuvre dans *Matlab* est correcte. La modélisation du système AEGIR tandem dans *ADAMS* peut donc autant être utilisée que le programme *Matlab* pour observer les conséquences des modifications apportées au mécanisme.

6.5.3 Amélioration de la courbe de puissance produite

En tenant désormais compte de l'inertie et de la masse de chacune des membrures du système AEGIR tandem, on vient déstabiliser la symétrie de la courbe de puissance instantanée produite par l'alternateur 1 tout en obtenant la même puissance moyenne sur un cycle, comme on peut le voir dans la figure 6.18. Il est alors possible d'effectuer une redistribution de la masse des membrures afin de modifier la position de leur centre de gravité. Les courbes de puissances obtenues peuvent donc être un peu plus symétriques, comme le montre la figure 6.19.

Comme ces modifications doivent tenir compte de la masse et de l'inertie de toutes les tiges du système, aucune dimension ne sera transcrite ici. En effet, une analyse de la résistance des membrures à l'effort soumis devra être effectuée afin de déterminer les dimensions adéquates de celles-ci. Suite à cette analyse, une étude des dispositions

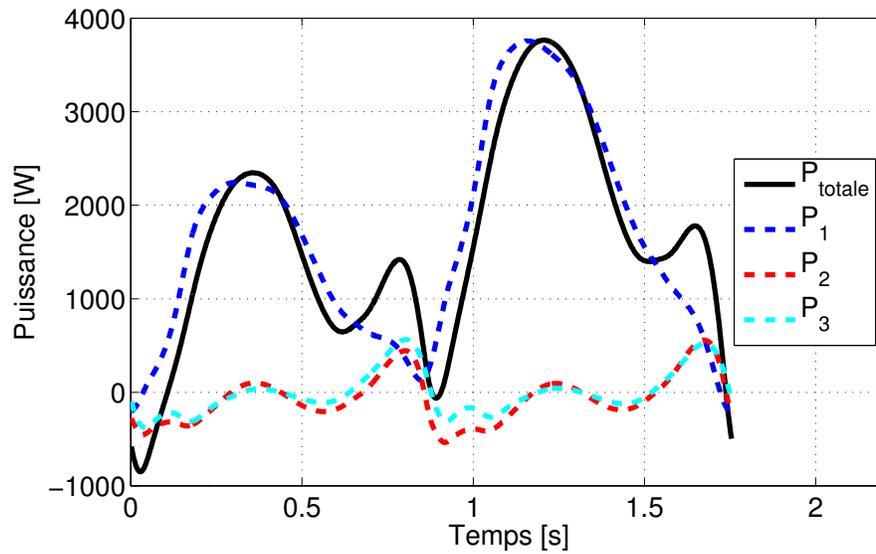


Figure 6.18: Puissances instantanées générées aux alternateurs avec une distribution courante de l'inertie et de la masse des membrures.

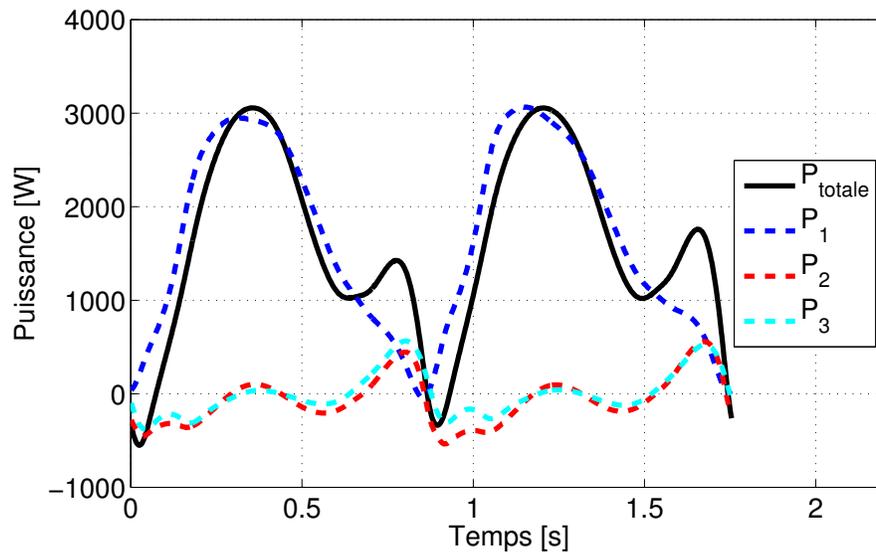


Figure 6.19: Puissances instantanées générées aux alternateurs avec une distribution modifiée de l'inertie et de la masse des membrures.

des centres de masse des bielles et de leur moment d'inertie pourra être conduite. Les figures 6.18 et 6.19 ne sont donc mises ici qu'à titre démonstratif pour illustrer l'effet d'une disposition adéquate en opposition à une disposition inadéquate de la masse des membrures. Pour aller encore plus loin, il pourrait être intéressant de modifier la courbe de la puissance totale produite de manière à ce qu'elle ne soit jamais négative.

Un stratagème efficace consisterait à ajouter une masse, désaxée par rapport à son centre de gravité et couplée à l'alternateur 1, mais tournant deux fois plus vite que θ_1 , comme le montre la figure 6.20. Celle-ci monterait donc lorsque les ailes produiraient le plus d'énergie et descendrait lorsque le système serait à son point mort, jouant le rôle d'un stockage potentiel. La figure 6.21 illustre bien la différence entre les puissances produites dans le cas utilisé jusqu'à maintenant, c'est-à-dire où il n'y a aucune inertie et masse aux membrures, et le cas où une masse tournante désaxée est ajoutée au système et qu'on tient compte de l'inertie et des masses des bielles.

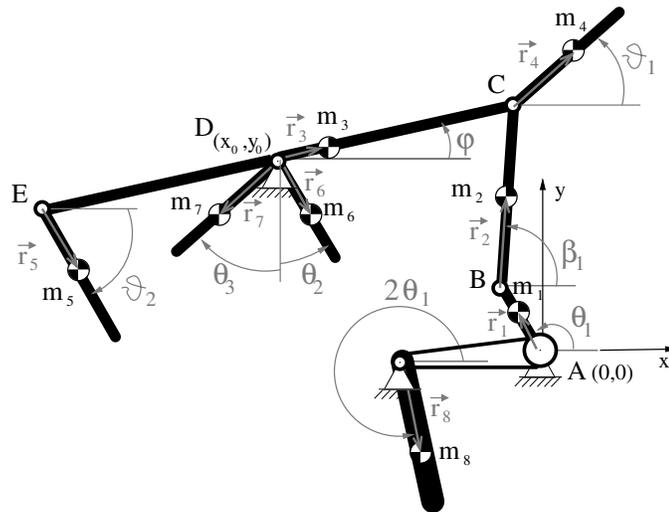


Figure 6.20: Système AEGIR tandem amélioré avec une masse désaxée.

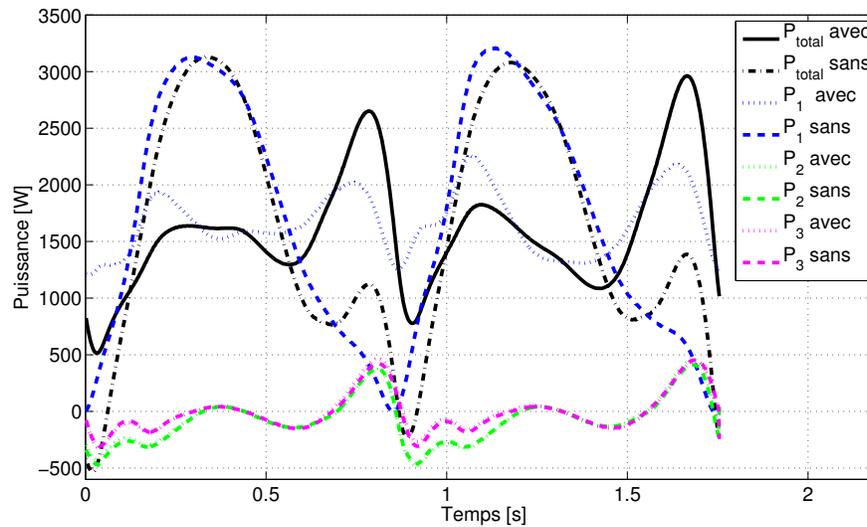


Figure 6.21: Puissances instantanées générées en ajoutant un stockage potentiel.

6.6 Commentaires sur le système AEGIR tandem

Nous avons pu observer que le système AEGIR tandem était le plus approprié des systèmes tandem en comparaison à ceux proposés dans le chapitre 4 , puisqu'il est simple et compact. De plus, comme les actionneurs contrôlant l'angle de tangage des ailes sont coaxiaux, plusieurs techniques sont utilisables pour coupler leur mouvement afin de réduire le nombre de degrés de liberté du mécanisme. Par exemple, les axes peuvent être reliés par trois engrenages coniques comme dans la figure 6.22 ou par des engrenages droits comme dans la figure 6.23. De plus, le système peut être réduit à un seul degré

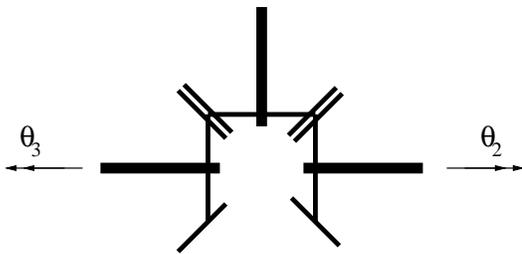


Figure 6.22: Inversion du sens de rotation avec des engrenages coniques.

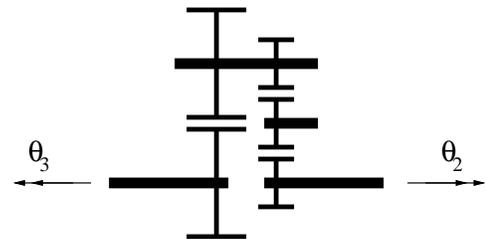


Figure 6.23: Inversion du sens de rotation avec des engrenages droits.

de liberté en couplant l'actionneur du tangage restant à celui contrôlant le pilonnement à l'aide d'un mécanisme à quatre barres, comme présenté dans la figure 6.24.

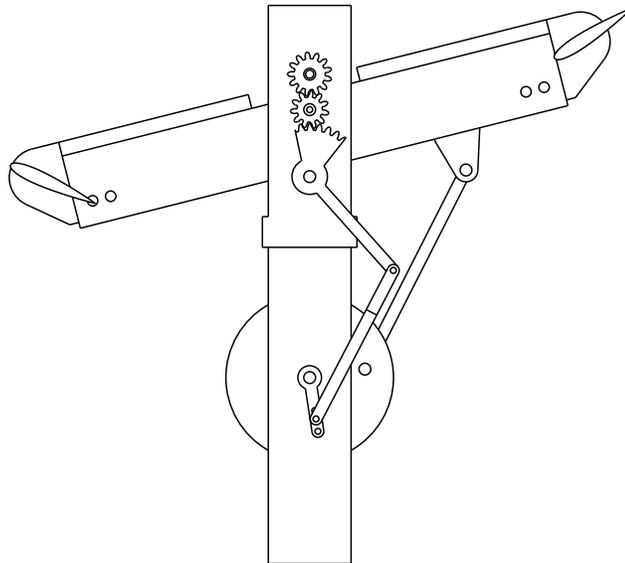


Figure 6.24: Système AEGIR tandem à un ddl.

De manière à condenser le système, il est possible de réduire le mécanisme de pilonnement en rétrécissant les bielles par un facteur commun. Par contre, la distance entre le point de pivot de l'aile et l'axe de rotation de la membrure c devra rester inchangé de sorte que l'amplitude de pilonnement ne soit pas affectée, comme on peut le voir dans la figure 6.25. On peut aussi modifier l'orientation de ce mécanisme par rapport au système en entier, de sorte que l'actionneur 1 soit aligné avec le pivot de la membrure c et puisse donc être supporté par la même tour, tel que vu à la figure 6.26.

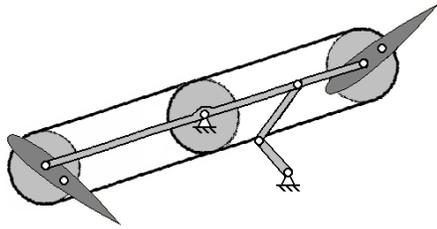


Figure 6.25: Système AEGIR tandem avec un mécanisme de pilonnement raccourci.

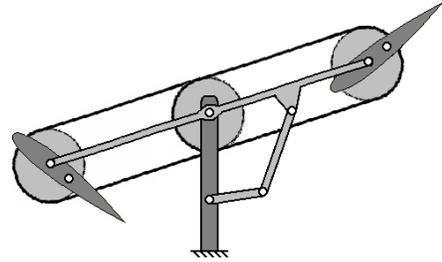


Figure 6.26: Système AEGIR tandem avec un mécanisme incliné.

Finalement, il est aussi possible d'utiliser le système AEGIR tandem pour ajouter des ailes en parallèle à celles en tandem, comme le présente la figure 6.27. Pour une amplitude de pilonnement et une dimension d'aile donnée, cette façon de faire permettra d'augmenter la quantité d'énergie extraite du fluide. Aussi, comme tous les autres systèmes présentés dans ce travail, les pales pourraient autant être utilisées à l'horizontale (figure 6.28) qu'à la verticale (figure 6.29), donc le système peut être adapté à l'application voulue.

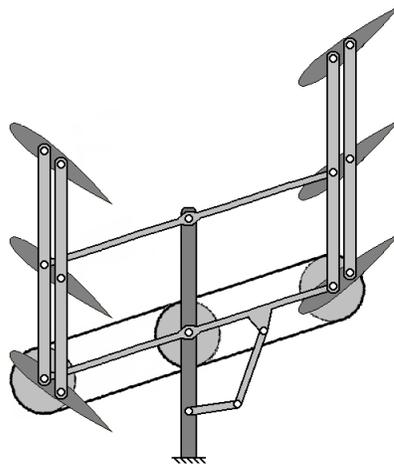


Figure 6.27: Système AEGIR tandem avec des ailes en parallèle.

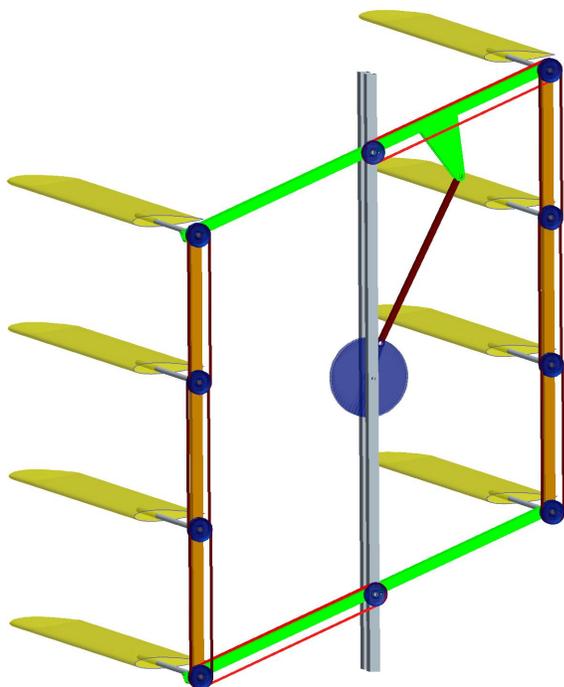


Figure 6.28: Système AEGIR tandem avec des pales horizontales.

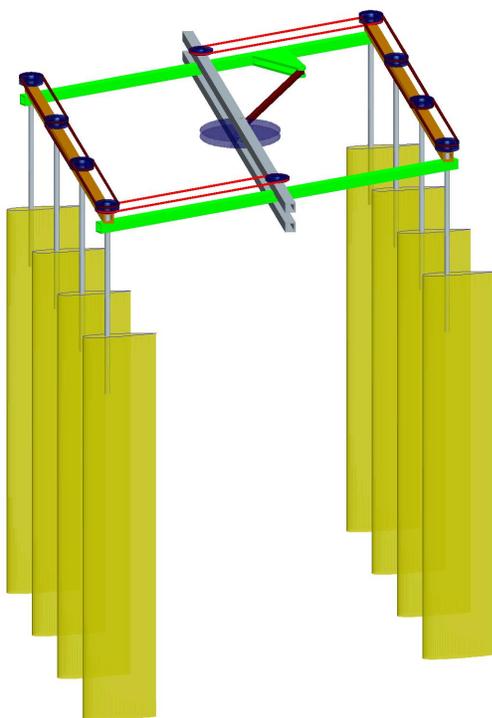


Figure 6.29: Système AEGIR tandem avec des pales verticales.

Conclusion

*Chaque fois que la science avance d'un pas,
c'est qu'un imbécile la pousse, sans le faire exprès.*

Émile Zola

Ce mémoire constitue un résumé des démarches entreprises dans la synthèse de mécanismes pour une génératrice éolienne/hydrolienne à ailes oscillantes. D'abord, il a permis d'exposer les étapes de l'analyse de la cinématique du système d'aile oscillante à auto-orientation. Il a ainsi été établi que ce système ne pouvait pas produire de fonction de tangage de l'aile ayant une amplitude plus élevée que 62° si l'on veut garder une réponse se rapprochant d'une sinusoïde. De plus, en souhaitant obtenir une telle fonction de sortie, certaines de ses membrures deviennent rapidement très longues. Comme il s'agit d'un mécanisme à un degré de liberté, il ne nécessite qu'un contrôleur, ce qui réduit les coûts de construction. Par contre, il ne peut effectuer que la trajectoire pour laquelle il a été conçu en ne pouvant modifier que sa vitesse de rotation. Il a donc été conclu que l'aile oscillante à auto-compensation serait un principe intéressant pour les cas où l'amplitude de la fonction de tangage demandée serait fixe et bien plus basse que 62° .

Ensuite, afin de concevoir un mécanisme pouvant reproduire les fonctions de sortie souhaitées, une recherche de solution a été menée. Une attention particulière a été portée

au mécanisme dirigeant le mouvement de pilonnement, car c'est celui-ci qui extrait le plus d'énergie du cycle oscillant. Il a donc été convenu que l'utilisation d'un actuateur linéaire est à proscrire, puisque la trajectoire de pilonnement produite par ce dernier n'est pas basée sur un mouvement continu. Par contre, en utilisant un mécanisme à quatre barres pour diriger le pilonnement, on obtient un mécanisme simple et très efficace, ce qui a conduit à l'élaboration des architectures Valkyrie 2 et AEGIR. Celles-ci ont alors été analysées cinématiquement et dynamiquement, ce qui permet maintenant à un utilisateur d'utiliser le système le plus adapté à ses besoins. Valkyrie 2 est un mécanisme utilisant seulement des barres et des liaisons rotoïdes, ce qui peut être plus pratique pour une application sous-marine nécessitant peu d'entretien. D'un autre point de vue, le mécanisme de contrôle du tangage d'AEGIR peut être dissimulé à l'intérieur de la poutre principale, ce qui permet ainsi de diminuer le risque de bris dû aux objets pouvant être en suspension dans un milieu marin. Valkyrie 2 nécessite aussi la lecture de la position verticale de l'aile en plus de son orientation afin de diriger ce dernier, car les deux contrôles sont couplés. De plus, l'angle de tangage de l'aile a des limites contraintes par l'architecture choisie, tandis qu'AEGIR a un contrôle découplé permettant une rotation complète de l'aile. Finalement, comme nous avons pu le constater avec les figures 3.13 et 5.10, la direction du tangage demande moins de puissance pour AEGIR que pour Valkyrie 2 et il nécessite un algorithme de contrôle plus simple, puisque sa fonction demandée n'est qu'une sinusoïde, tel que vu dans les figures 3.9 et 5.6.

Pour ces deux systèmes, des architectures d'ailes en tandem ont aussi été présentées. Puisqu'AEGIR tandem était le plus simple et compact des systèmes en comparaison à ceux proposés dans le chapitre 4, ce fut celui-ci qui fut analysé en profondeur. Diverses propositions furent alors émises afin d'adapter le mécanisme à l'utilisation choisie, tel que diminuer le nombre de degrés de liberté en couplant le contrôle du tangage avec des engrenages coniques ou droits et même coupler l'actionneur du tangage restant à celui contrôlant le pilonnement à l'aide d'un mécanisme à quatre barres. Il est aussi possible de mettre des ailes en parallèle, aussi bien à l'horizontale qu'à la verticale, afin de maximiser l'extraction d'énergie pour un système donné. En dernier lieu, il a été proposé d'améliorer la courbe de puissance en sortie en ajoutant une masse décentrée, puis couplée au moteur contrôlant le pilonnement, réduisant ainsi les pics et les chutes de puissance. Ce mécanisme est donc considéré comme un candidat très intéressant pour le contrôle d'ailes oscillantes dans le but d'extraire de l'énergie de courants marins ou aériens.

Il serait maintenant intéressant d'approfondir le cas du prototype d'un kilowatt décrit dans l'annexe D afin de déterminer les dimensions exactes des membrures permettant de supporter les forces impliquées et ainsi de pouvoir calculer l'inertie de celles-ci. Les alternateurs à utiliser pourraient donc être choisis, de même que l'addition d'une masse d'inertie désaxée pour améliorer l'allure de la courbe de puissance en sortie du mécanisme de pilonnement. L'analyse des courbes obtenues en pratique serait finalement très instructive, tant celles de pilonnement et de tangage que celles des puissances instantanées afin de pouvoir les comparer finalement avec celles prédites théoriquement dans ce mémoire.

Bibliographie

- [1] Brakez, A., Zrikem, Z. et Mir, A. "Modélisation de l'extraction de l'énergie éolienne par une aile oscillante", *Procédé du Forum Internationale sur les Energies Renouvelables (FIER) 2002*, p. 369–375, Tétouan, Maroc, Mai, 2002.
- [2] Bryans, A.G., Fox, B., Crossley, P. et Whittaker, T.J.T. "Tidal Energy Resource Assessment for the Irish Grid", *Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International*, Vol. 2, p. 614–617, septembre, 2004.
- [3] CANADA. OFFICE DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE DU CANADA. *Base de données sur les brevets canadiens*, 5 août 2006, réf. du 11 août 2006, http://patents1.ic.gc.ca/details-f?patent_number=2365650.
- [4] Jones, K.D., Davids, S. et Platzler, M.F. "Oscillating-Wing Power Generation", *ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, San Francisco, CA, Juillet, 1999.
- [5] Kinsey, T. et Dumas, G. "Parametric Study of an Oscillating Airfoil in Power Extraction Regime", *24th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, San Francisco, CA, USA, Juin, 2006.
- [6] Gosselin, C. "Kinematische und statische Analyse eines ebenen parallelen Manipulators mit dem Freiheitsgrad Zwei", *Mech. Mach. Theory*, Vol. 31, No. 2, p. 149–160, 1996.

- [7] Gosselin, C. et Merlet, J.-P. "The Direct Kinematics of Planar Parallel Manipulators : Special Architectures and Number of Solutions", *Mech. Mach. Theory*, Vol. 29, No. 8, p. 1083–1097, 1994.
- [8] Gosselin, C., Sefrioui, J. et Richard, M. J. "Solutions polynomiales au problème de la cinématique directe des manipulateurs parallèles plans à trois degrés de liberté", *Mech. Mach. Theory*, Vol. 27, No. 2, p. 107–119, 1992.
- [9] Innocenti, C. " Position Analysis in Analytical Form of the 7-link Assur Kinematic Chain Featuring One Ternary Link Connected to Ternary Links Only", *Mech. Mach. Theory*, Vol. 32, No. 4, p. 501–509, Mai, 1997.
- [10] Jean, M. et Gosselin, C. "Static Balancing of Planar Parallel Manipulators", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, p. 3732–3737, Avril, 1996.
- [11] Jensen, P. W. "Classical and Modern Mechanisms for Engineers and Inventors", *Marcel Dekker, Inc.*, New York, 1991.
- [12] Kong, X. et Gosselin, C. "Generation and Forward Displacement Analysis of RPR-PR-RPR Analytic Planar Parallel Manipulators", *Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design*, Vol. 124, p. 294–300, Juin, 2002.
- [13] Martin, J. "Énergie éolienne", *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique*, Vol. B8585, 1997, http://www.techniques-ingenieur.fr/dossier/energies_eoliennes/B8585 .
- [14] McKinney, W. et DeLaurier, J. "The Wingmill : An Oscillating-Wing Windmill", *Journal of Energy*, Vol. 5, No. 2, p. 109–115, 1981.
- [15] Merlet, J.P. "Les robots parallèles", *Hermès*, Paris, France, 1997.
- [16] Mitsi, S., Bouzakis, K. -D., Mansour, G. et Popescu, I. "Position Analysis in Polynomial Form of Planar Mechanisms with Assur Groups of Class 3 Including Revolute and Prismatic Joints", *Mech. Mach. Theory*, Vol. 38, No. 12, p. 1325–1344, 2003.
- [17] Peysah, E. E. "Determination of the Position of the Member of Three-joint and Two-joint Four Member Assur Groups with Rotational Pairs" (en Russe), *Maschinowedenie*, No. 5, p. 55–61, 1985.

- [18] United States Patent and Trademark Office. *Patent Application Information Retrieval*, réf. du 11 août 2006, <http://patft1.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?patentnumber=6652232>.
- [19] Waldron, K. J. et Kinzel, G. L. "Kinematics, Dynamics and Design of Machinery", *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 1999.
- [20] Wang, J. et Gosselin, C. "A New Approach for the Dynamic Analysis of Parallel Manipulators", *Multibody System Dynamics*, **2** : p. 317–334, 1998.

Annexe A

Copie de la demande de brevet de l'aile oscillante à auto-compensation

Cette copie de la demande de brevet de Maxime Lambert Bolduc a été prise sur le site internet de l'Office de la propriété intellectuelle du Canada [3]. Elle a permis de mettre au point le premier mécanisme testé dans cette étude. Il est à noter que l'utilisation de cette idée fait suite à la suggestion émise par le groupe Éolo, le demandeur du dit brevet, d'analyser l'éventuelle utilisation de leur mécanisme.



(22) Date de dépôt/Filing Date: 2001/12/20

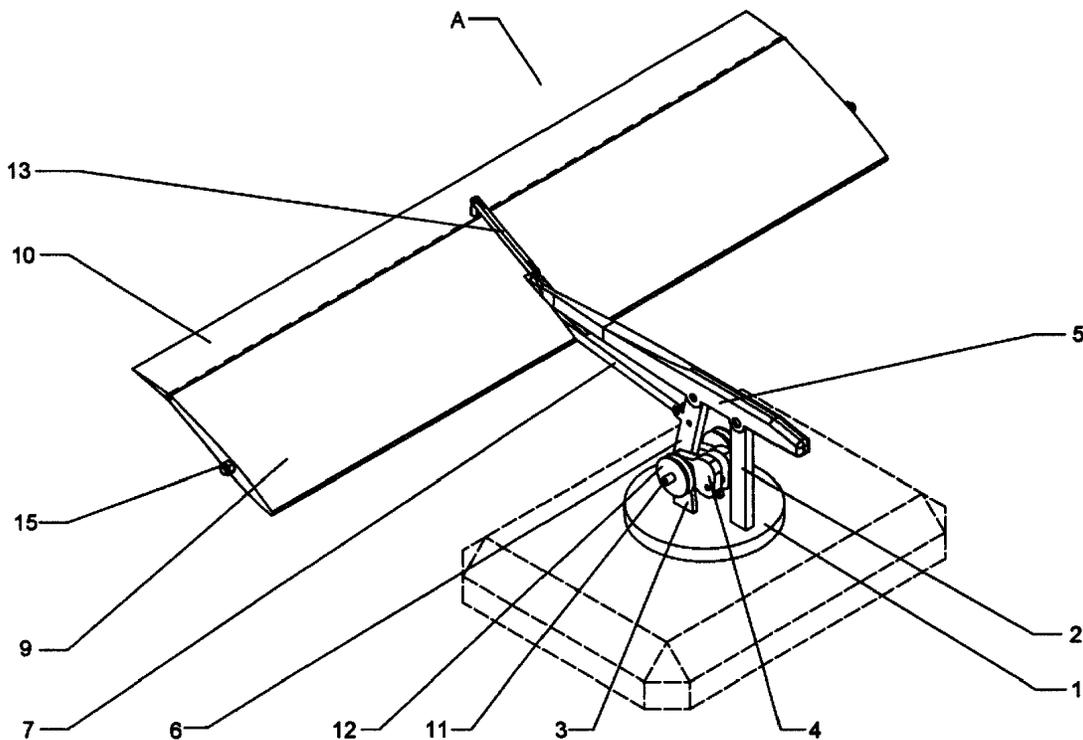
(41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2003/06/20

(51) Cl.Int.⁷/Int.Cl.⁷ F03B 13/14, F03D 5/00

(71) Demandeur/Applicant:
LAMBERT BOLDOC, MAXIME, CA

(72) Inventeur/Inventor:
LAMBERT BOLDOC, MAXIME, CA

(54) Titre : AILE OSCILLANTE A AUTO-COMPENSATION
(54) Title: SELF-TRIMMING OSCILLATING WING SYSTEM



(57) Abrégé/Abstract:

The present invention is an oscillating wing system like lifting surface featuring a symmetrical profile mounted free to rotate over a fixation point located ahead neutral point and self trimming at angle of attack in the flow by adjustment of a trailing edge elevon, and whose the system is actuated by linear lateral or vertical movement allowing to produce electrical energy with the wind flow or water flow of a deep river or at flood/ebb tide.

Self-trimming oscillating wing system

ABSTRACT OF THE DISCLOSURE:

The present invention is an oscillating wing system like lifting surface featuring a symmetrical profile mounted free to rotate over a fixation point located ahead neutral point and self-trimming at angle of attack in the flow by adjustment of a trailing edge elevon, and whose the system is actuated by linear lateral or vertical movement allowing to produce electrical energy with the wind flow or water flow of a deep river or at flood/ebb tide.

Self-trimming oscillating wing system

BACKGROUND OF THE INVENTION:

Field of the invention:

The present invention relates to a self-trimming oscillating wing system allowing to produce electrical energy with the wind flow or water flow of a deep river or at flood/ebb tide.

Description of the related art:

A search of prior art records has unveiled the following patents:

1. No CA 1,336,481 issued in 1995 to Wayne;
2. No CA 555,128 issued in 1958 to Budig;
3. A whale tail ship propulsion system invented by Fowles in 1848; and
4. A whale tail ship propulsion system invented by Johnson in 1862.

The patent to Fowles is probably the most relevant. As can be seen, the patent to Fowles shows a whale tail ship propulsion system, which the whale tail moving up and down at angle of attack, but at a low speed the up and down movement creates an incoming flow perpendicular to the tail plan. The excessive flow separations destroy the lifting while that the engines are overloaded, and by imposing mechanically the incidence to the tail profile, it makes that for many conditions there is the flow separations. The conditions are not the same with a spinning propeller where its rotation normally induces an incoming flow facing the blade leading edge.

The research and development works from "Voith-Schneider" were to adapt the existing cycloidal systems by modifying the blade incidence mechanical linkage. All approaches considered up to now were to force mechanically the blade incidence against flow. The "Voith-Schneider" company and associated scientists or contractors were interested to adapt the whale tail propulsion system implicating some form of blade translation like the sweep of a whale tail to development of their cycloidal propulsion system, but after several years of research no achievement had been realized.

With the proposed system, it is no necessary to use a mechanism rotating in winding for adjust the wing facing the flow because the wing in swivelling can take a reversed flow, so long as the sequence of control movement from the elevon being reversed.

Seeing that the self-trimming oscillating wing system gets its high efficiency from a very large rectangular projected area in the flow, it is more easy to install it into a deep river, and that, because the system uses the flow dynamic pressure of the river, therefore it is no necessary to build the water dams to raise the static pressure.

In the case of tidesmills and permanent installations in the deep rivers, the system will be installed so as to allow at the wing to be raised and blocked over the water-area up to underneath the portal. Too, it depends of the deep-water in function of tides, the amplitude and phase middle will be adjusted so as to that the wing does not going out from the water while its operating all in working the maximum of sweeping area totally free.

The self-trimming oscillating wing system is more interesting compared to that of a wind turbine because the heavy alternator and relevant equipments are laid on the ground. These conditions simplify a lot of maintenance, assembling, disassembling operations, compared to the problems associated with a nacelle containing 25 tons of equipment located in a tower at hundred feet over the ground, or of an horizontal axis wind turbine suspended hundred feet in the air.

Alternatively, the oscillating up and down support arrangement is mounted so that each wing can be put down at ground level for the assembling or maintenance. The self-trimming oscillating wing system does not have the aeroelastic and gyroscopic problems of a spinning wind turbine, therefore there is no need to balance the wing with precision. Seeing that the oscillating wing profile configuration is thick and large compared to high technology fabrication of large wind turbine blade, the wings can be made of a light material still very robust comprising the large hollows covered with a thin plastic material partly inflated to maintain the rigidity.

Summary of the invention:

The present invention shows an oscillating wing system like lifting surface featuring a symmetrical profile mounted free to rotate over a fixation point located ahead neutral point and self-trimming at angle of attack in the flow by adjustment of a trailing edge elevon, and whose the system is actuated by linear lateral or vertical movement allowing to produce electrical energy with the wind flow or water flow of a deep river or at flood/ebb tide.

The oscillating wing system moving up and down in a linear translation but not in a cycloidal trajectory.

The self-stabilizing wing trims always at same angles of attack related to elevon angles of incidences, whatever the dynamic pressure, the velocity or the direction of incoming flow. Once are determined the wing profile, the chord ratio of elevon, the static margin (distance between the wing pivot point and its profile aerodynamic neutral point), there is a predetermined relation almost linear between the elevon angle and the state of equilibrium at which the wing trims.

The oscillating wing profile is totally free to rotate around of its fixation point while that the elevon deflection angle is kept constant with respect to the profile base line. In this case, seeing that the profile is symmetrical, the camber line will be a straight line. The projected area against wind of the oscillating wing has the shape of a large flat rectangle, therefore, the ratio of projected area is larger than that of a wind turbine. It results a lower aerodynamic loading whose the effects combined with the benefits of bidimensional flow provide an efficiency of 20% to 30% higher compared to that of a wind turbine.

Advantages of the invention:

Minimum noise and erosion;

It is no necessary to build the water dams to raise the static pressure because the system uses the water flow dynamic pressure;

The installation of the oscillating wing system can be made simply by laying and anchoring the system at the bottom of along of a deep river;

High efficiency at high speed;

The self-trimming oscillating wing system can be installed vertically or horizontally; and

The self-trimming oscillating wing system is very promising and competitive compared to that of a wind turbine.

Brief description of the several views of the drawing(s):

Figure 1 shows a rear perspective view of a self-trimming oscillating wing system installed onto a base.

Figure 2 shows a rear perspective view of self-trimming oscillating wing system blocked in position, and installed onto a base.

Figure 3 shows a front perspective view of self-trimming oscillating wing system installed onto a base.

Figure 4 shows a side view of self-trimming oscillating wing system installed onto a base.

Figure 5 shows a rear view of self-trimming oscillating wing system installed onto a base.

Figure 6 shows a top view of self-trimming oscillating wing system installed onto a base.

Figure 7 shows an exploded view of self-trimming oscillating wing system.

Figure 8 shows a view of the oscillating wing trimming and stability.

Figure 9 shows a view of the oscillating wing electrical energy production with the wind flow.

Figure 10 shows a view of the oscillating wing electrical energy production, wind variation of profile and elevon incidence with respect to cycle phase.

Figure 11 shows a view of the oscillating wing electrical energy production with the water flow.

Figure 12 shows a view of the oscillating wing electrical energy production, water variation of profile and elevon incidence with respect to cycle phase.

Detailed description of the invention:

The self-trimming oscillating wing system (A) illustrated in figures 1 to 7 comprises a revolving base (1) swivelling according to the direction of the wind, is connected to support (2) of lever (5) joined to the oscillating wing (9) by a fore rod (14) blocked by the locknuts (15), and which the other fore rod (17) blocked by the locknuts (18) joins the elevon (10) to the oscillating wing (9).

The supports (3) connected to the revolving base (1) allow to join the driving shaft (11) to the tree (6) and counterbalances (4), which activate the driving shaft (11) making rotate the feeding pulleys (12). The counterbalances (4) and tree (6) are blocked by a locking means (16) that set the self-trimming oscillating wing system (A) completely inoperational.

The stabilizing bar (7) connected to the tree (6) and fixing means (8), is joined to lever (5) by the fore rod (14) joining the oscillating wing (9), and an arm (13) connected to fixing means (8) and elevon (10), activates the elevon (10) joined to the oscillating wing (9) by the fore rod (17) blocked by the locknuts (18).

As illustrated in figure 8, the oscillating wing profile is totally free to rotate around of its fixation point while that the elevon deflection angle is kept constant with respect to the profile base line. In this case, seeing that the profile is symmetrical, the camber line will be a straight line.

The elevon produces a control moment that counterbalances the control moment generated by the lift. If an aerodynamic perturbation increases the angle of attack, the control moment increases also, which makes to pivot the profile and move back to its original state of equilibrium. If a perturbation decreases the angle of attack, the control moment decreases also, which results into an unbalanced state with the control moment from the elevon, makes to rotate the profile and move back to its original state of equilibrium.

As illustrated in figures 9 and 10, the oscillating wing system producing electrical energy with the wind flow.

As illustrated in figures 11 and 12, the oscillating wing system producing electrical energy with the water flow.

Although only a single embodiment of the present invention has been described and illustrated, the present invention is not limited to the features of this embodiment, but includes all variations and modifications within the scope of claims.

Legend:

- 1: Revolving base
- 2: Support of lever
- 3: Supports of driving shaft
- 4: Counterbalances
- 5: Lever
- 6: Tree
- 7: Stabilizing bar
- 8: Fixing means
- 9: Oscillating Wing
- 10: Elevon
- 11: Driving shaft
- 12: Feeding pulleys
- 13: Arm activating the elevon
- 14: Fore rod
- 15: Locknuts

16: Locking means

17: Fore rod

18: Locknuts

CLAIM:

The embodiments of the invention for which an exclusive property or privilege is claimed, are defined as follows:

1. Self-trimming oscillating wing system being used for produce electrical energy with the wind flow or water flow of a deep river or at flood/ebb tide, comprising a revolving base swivelling according to the direction of wind, said revolving base is connected to support of lever joining said oscillating wing by means of a first fore rod blocked by the locknuts; a second fore rod blocked by the locknuts joins the elevon to said oscillating wing; the supports connected to said revolving base allow to join the driving shaft to a tree and counterbalances, which activate said driving shaft making rotate the feeding pulleys, and when said counterbalances and said tree are blocked by a locking means, said self-trimming oscillating wing system is completely inoperational; a stabilizing bar connected to said tree and fixing means, joins the lever by said first fore rod blocked by said locknuts joining said oscillating wing to said elevon; and an arm connected to said fixing means and said elevon, activates said elevon joined to said oscillating wing by said second fore rod blocked by said locknuts.

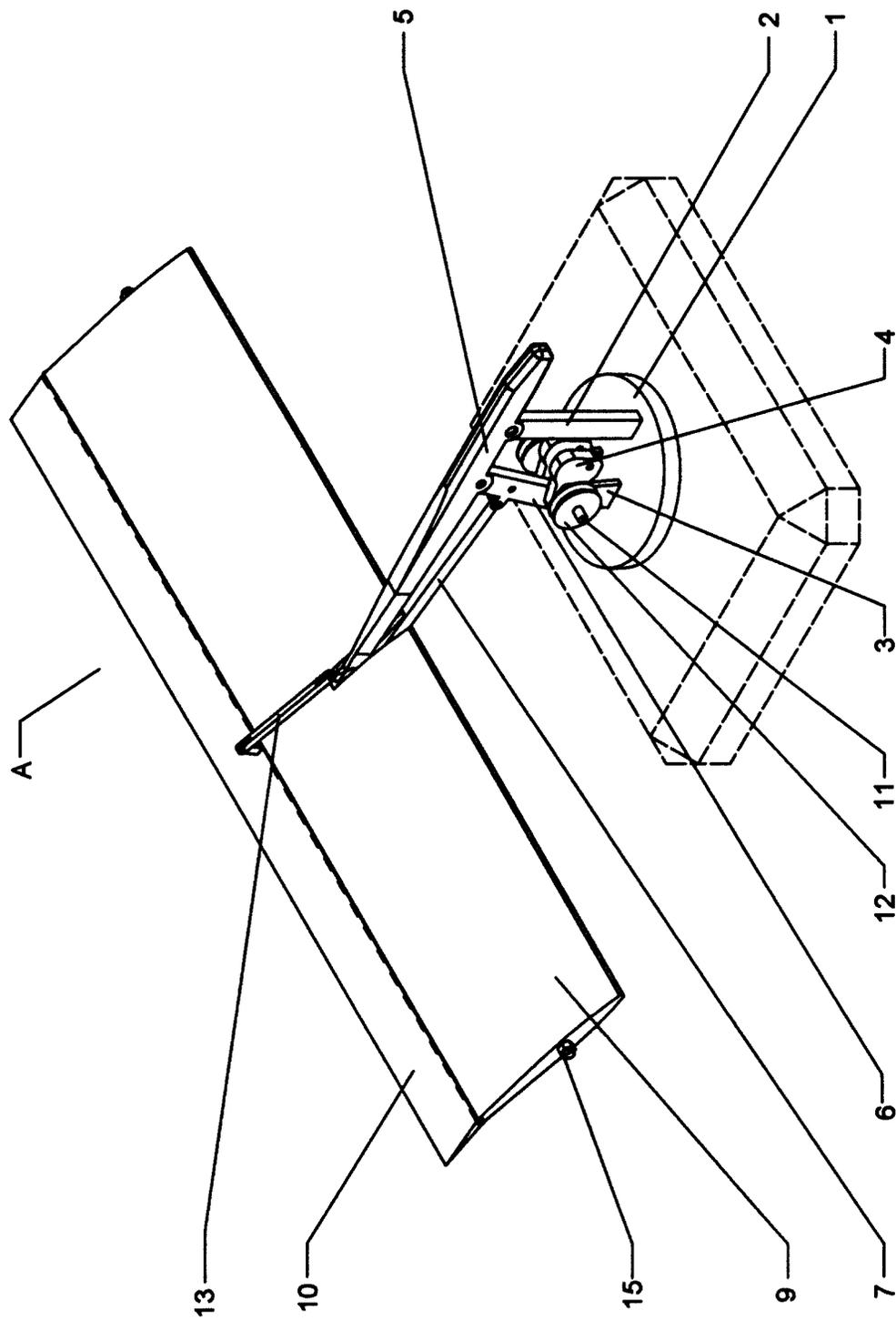


Figure 1

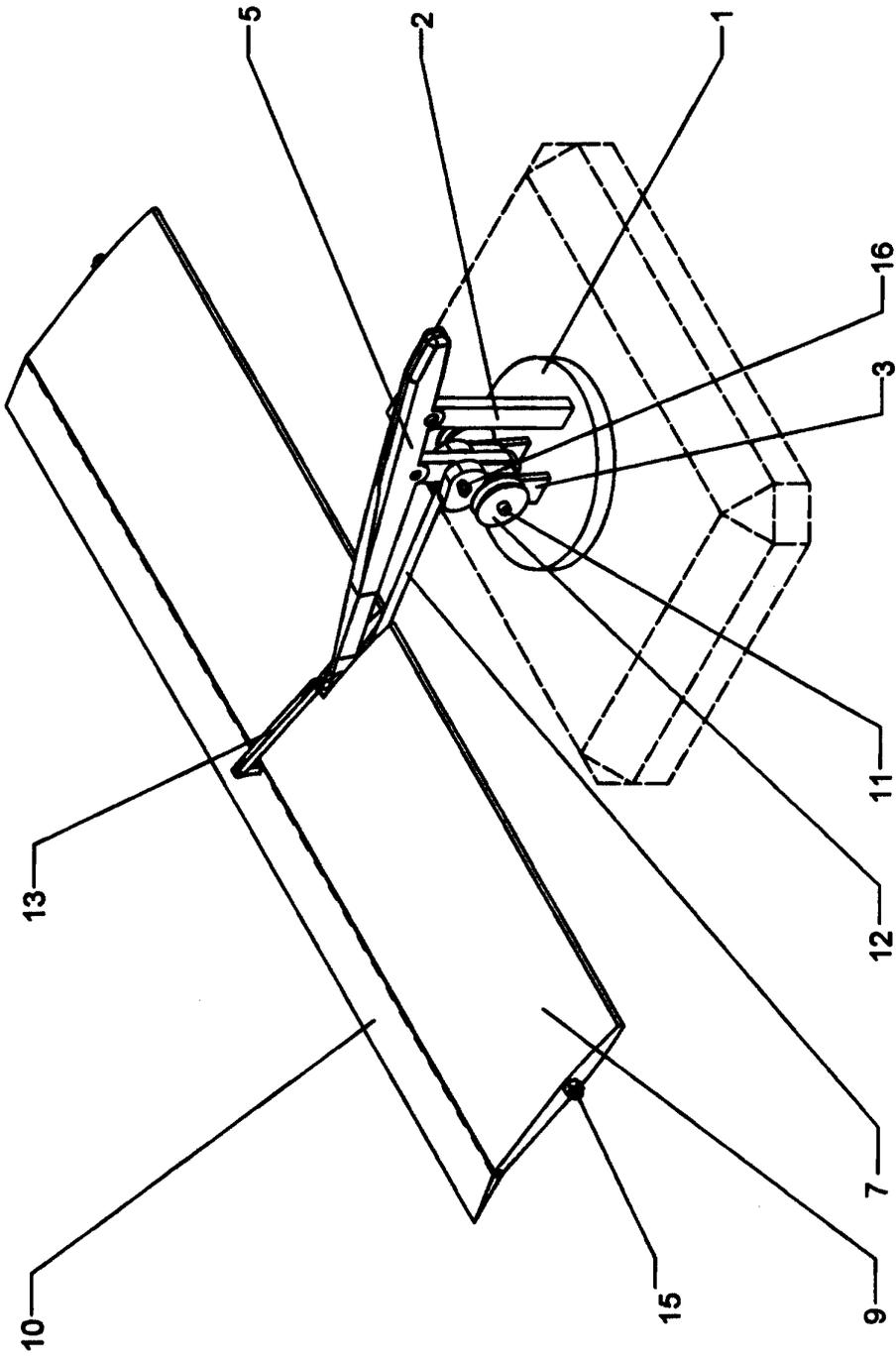


Figure 2

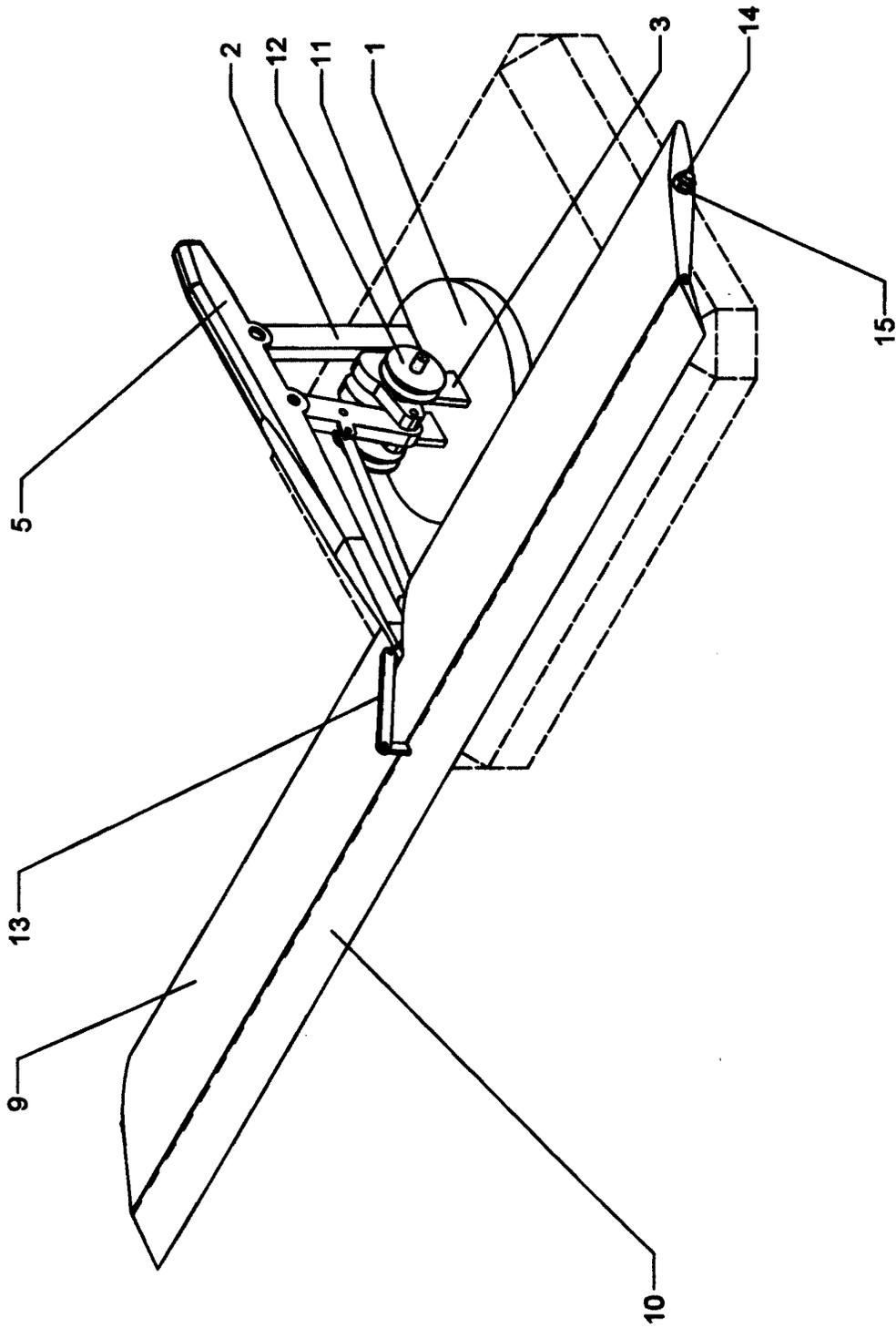


Figure 3

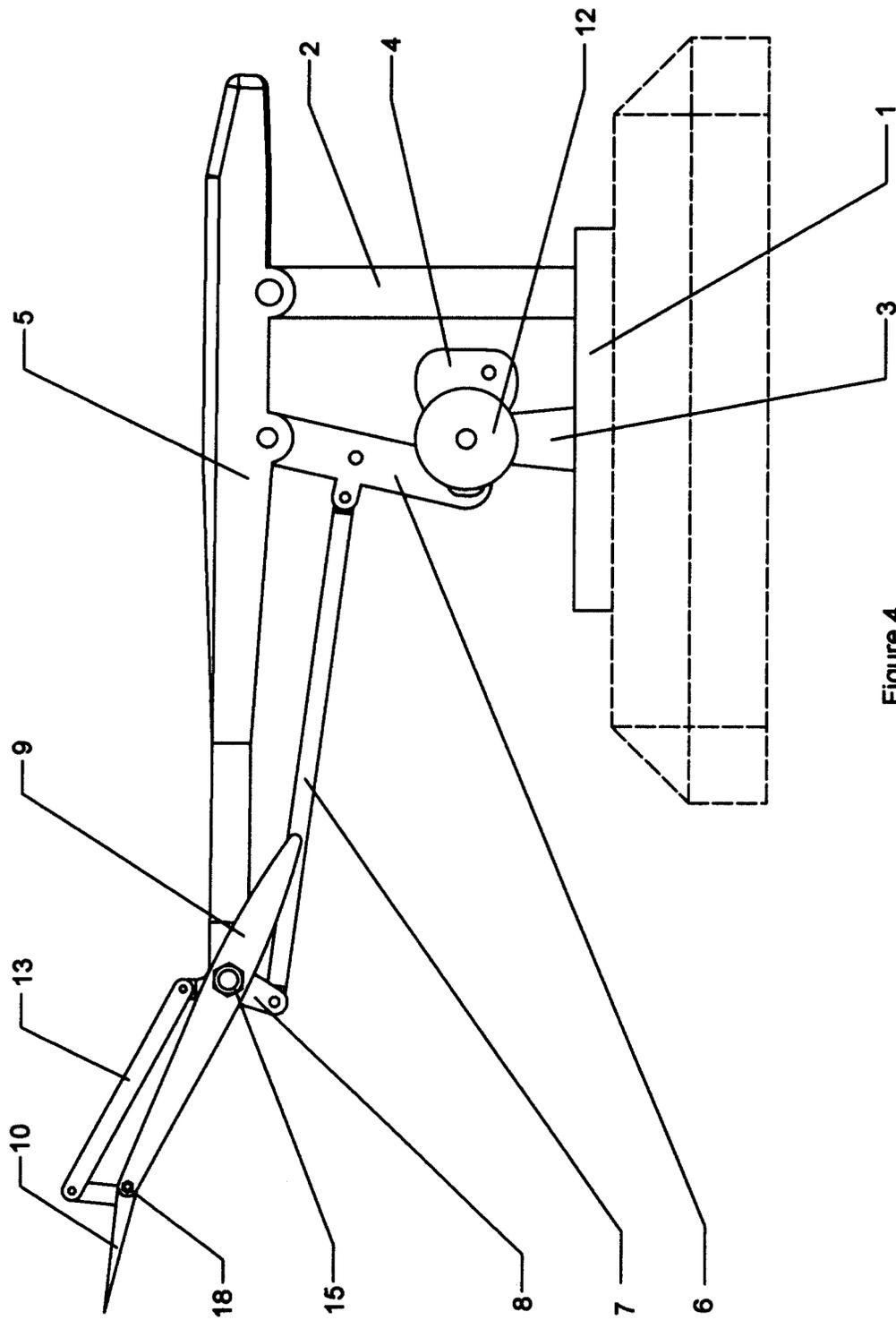


Figure 4

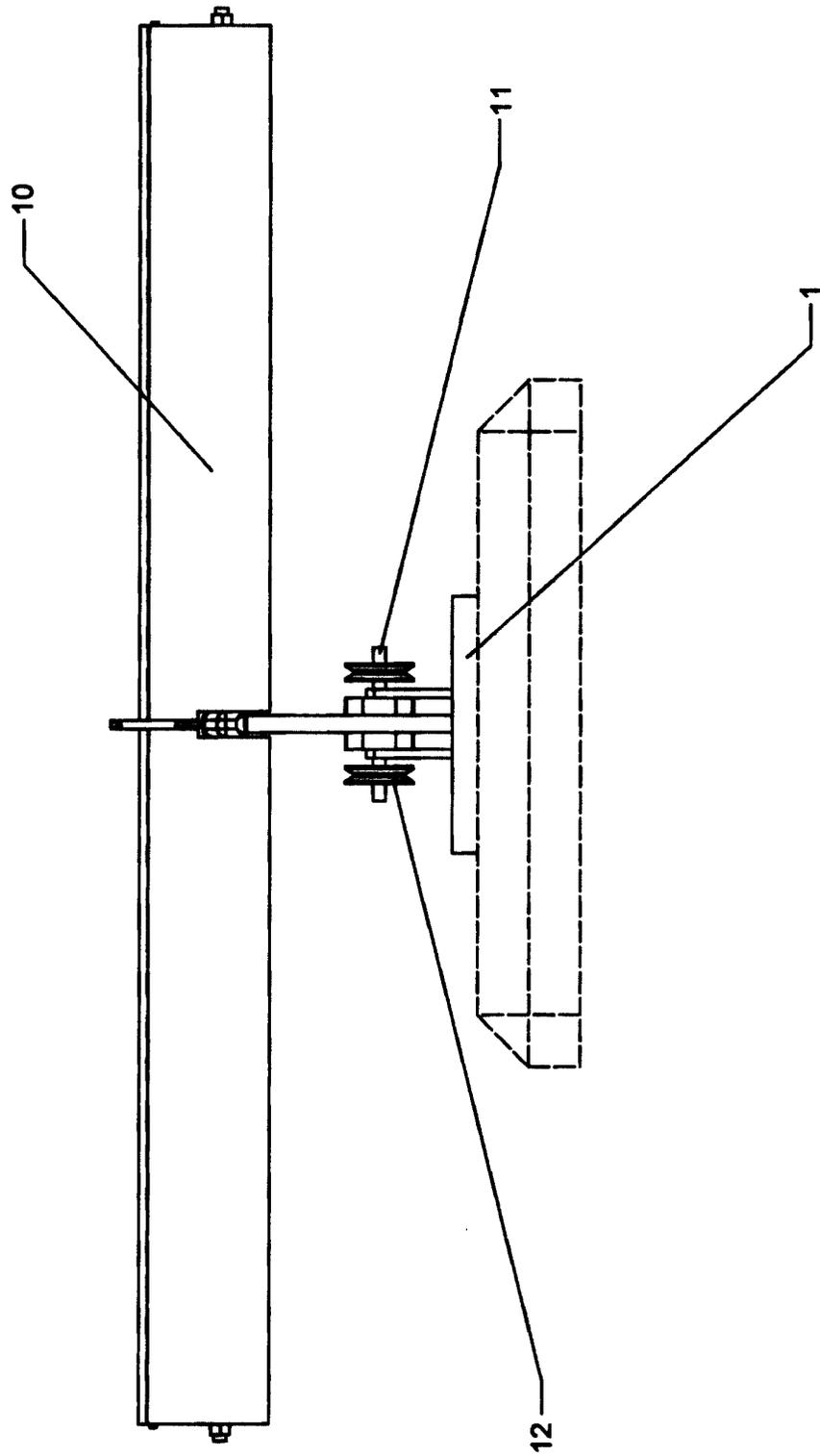


Figure 5

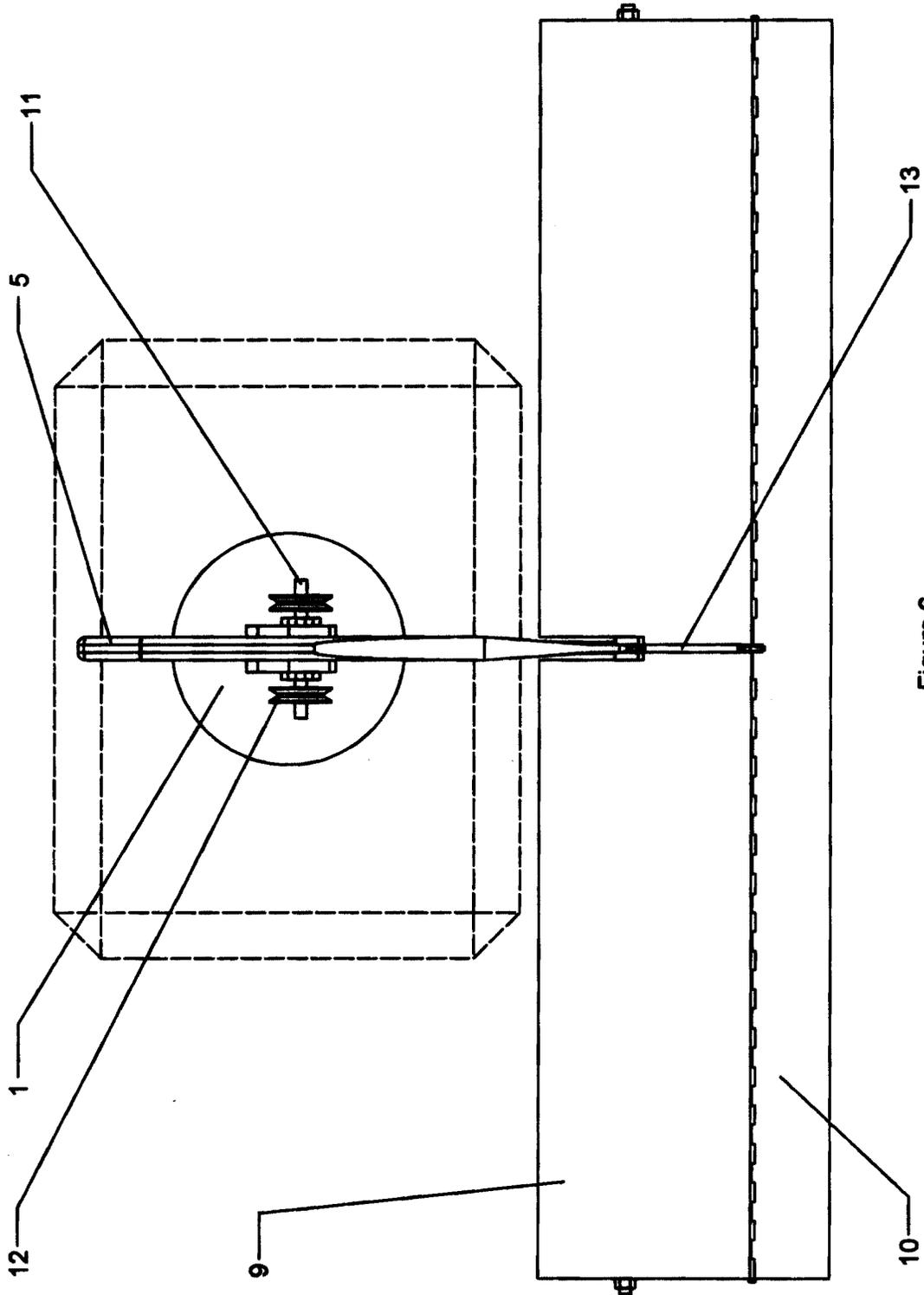


Figure 6

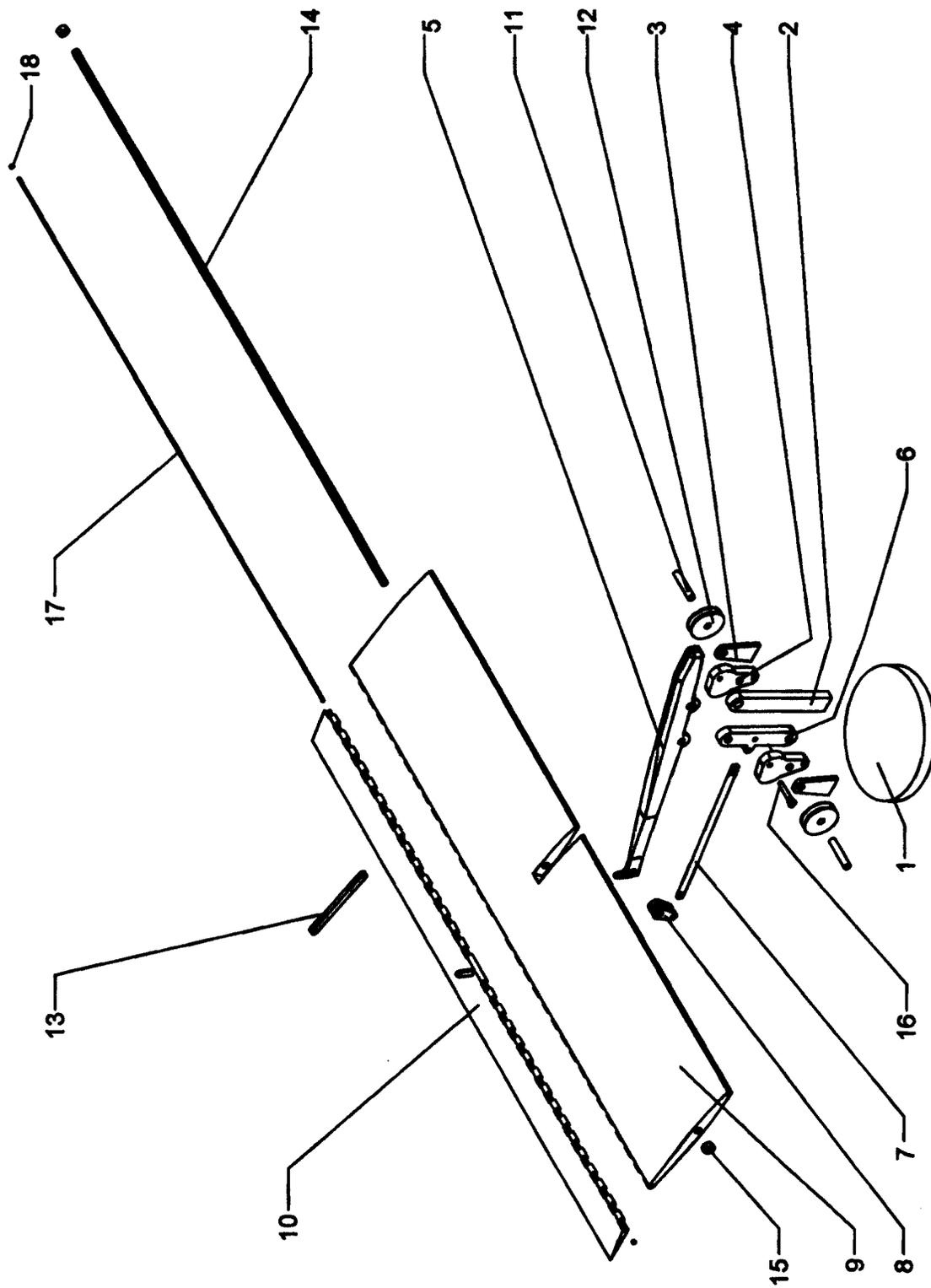


Figure 7

Oscillating wing trimming and stability

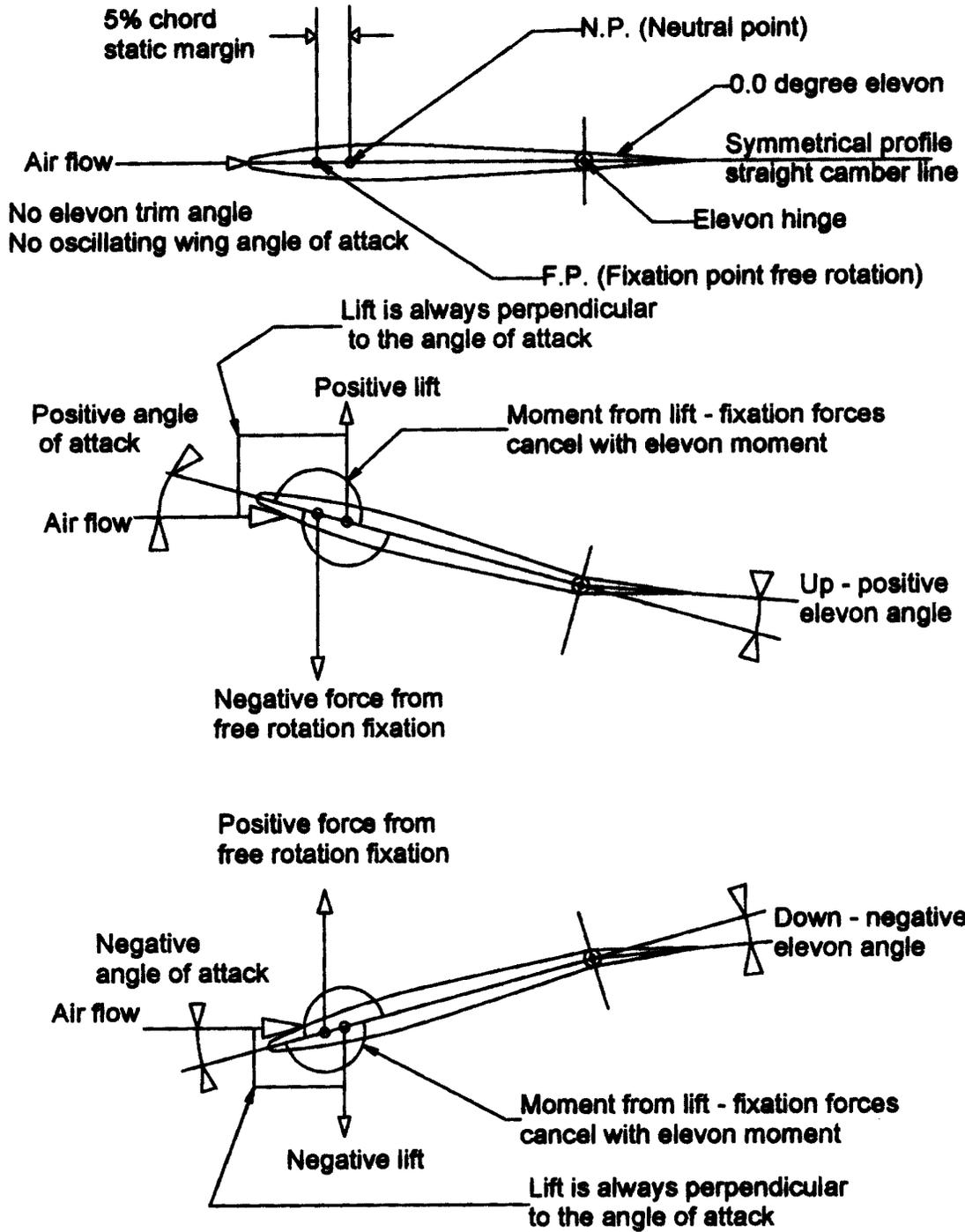


Figure 8

Oscillating wing electrical energy production with the wind flow

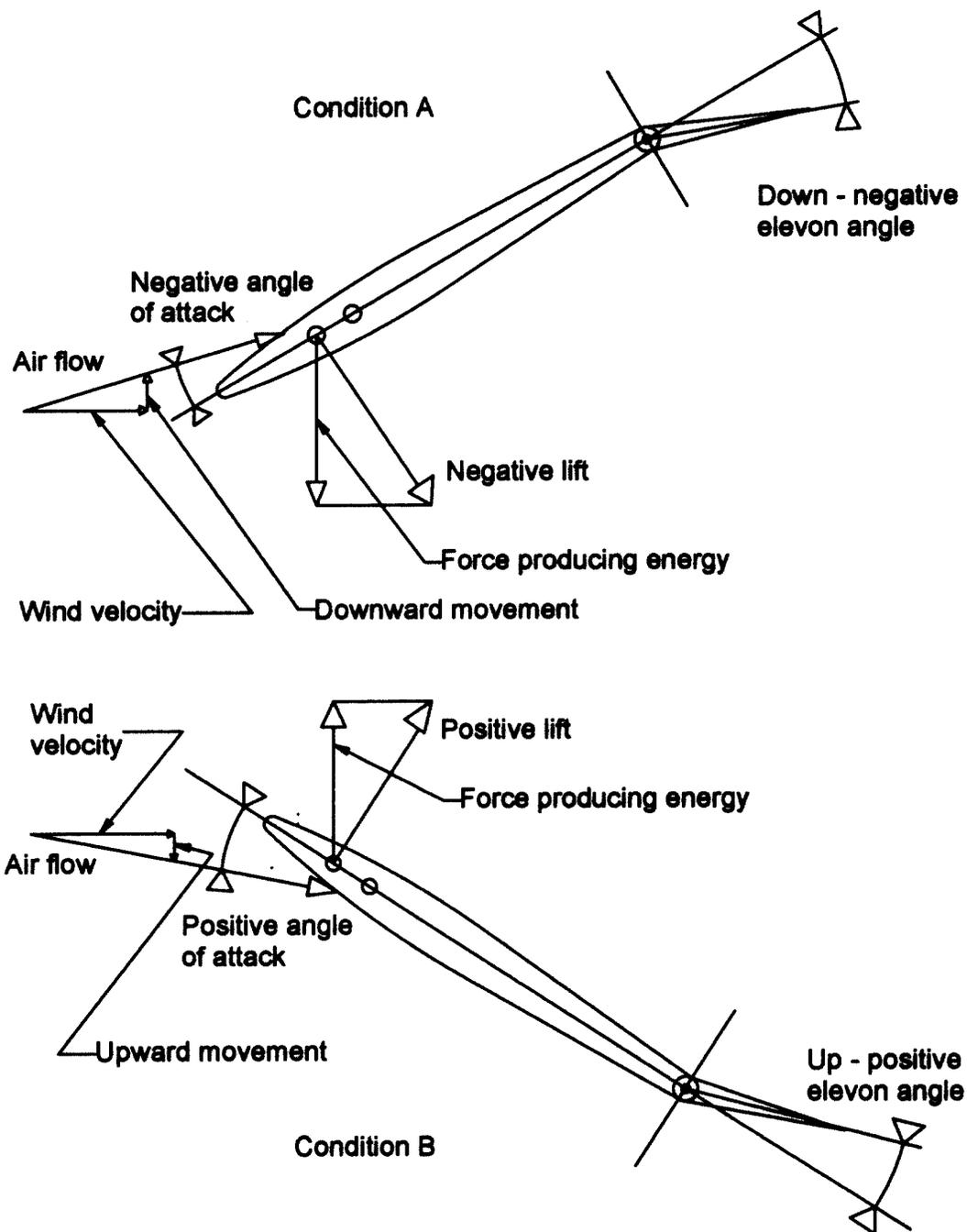
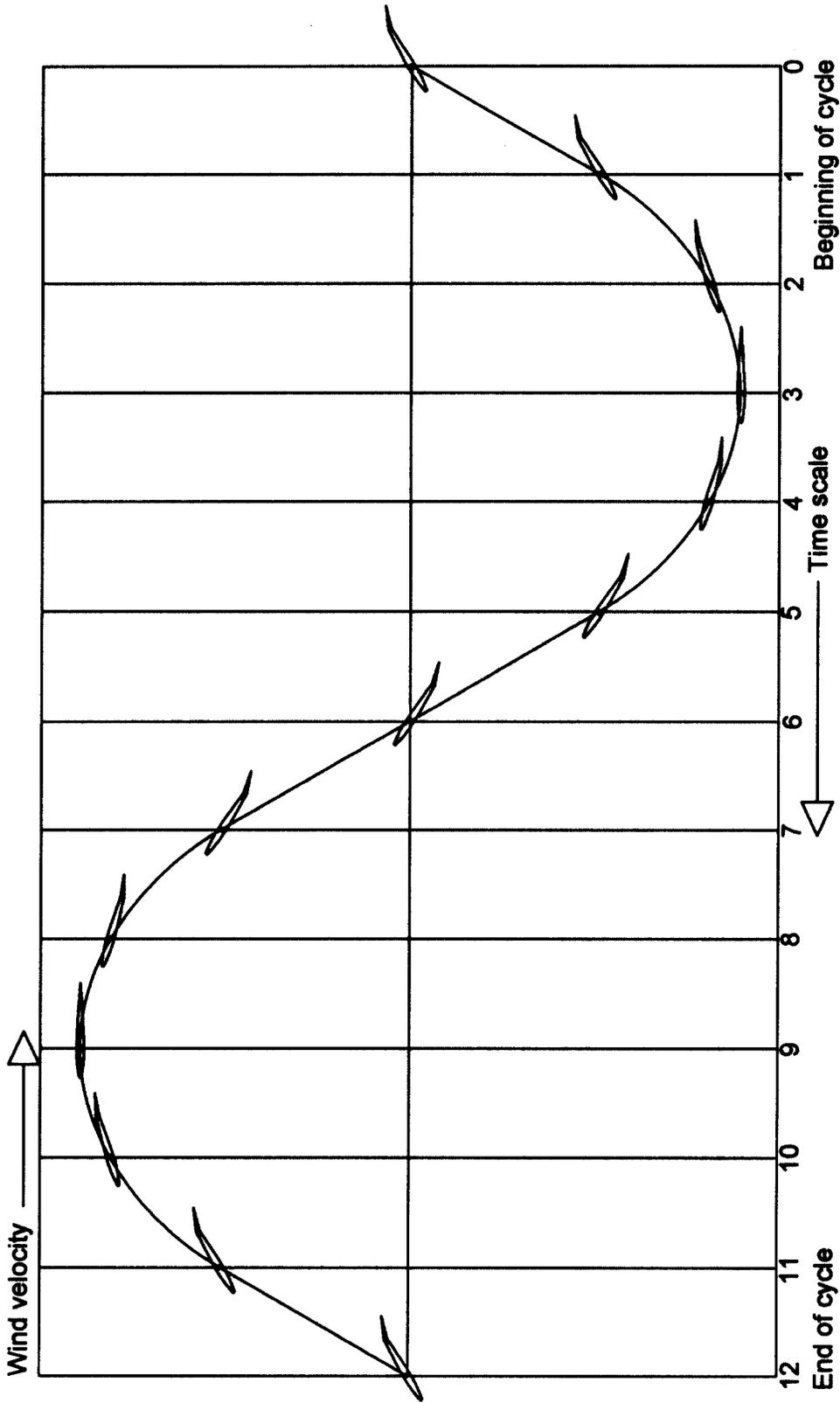


Figure 9

Profile incidences show a wind velocity twice that of maximum up and down vertical velocity (i.e. at mid-course)



Oscillating wing electrical energy production, wind variation of profile, and elevon incidence with respect to cycle phase

Figure 10

Oscillating wing electrical energy production with the water flow

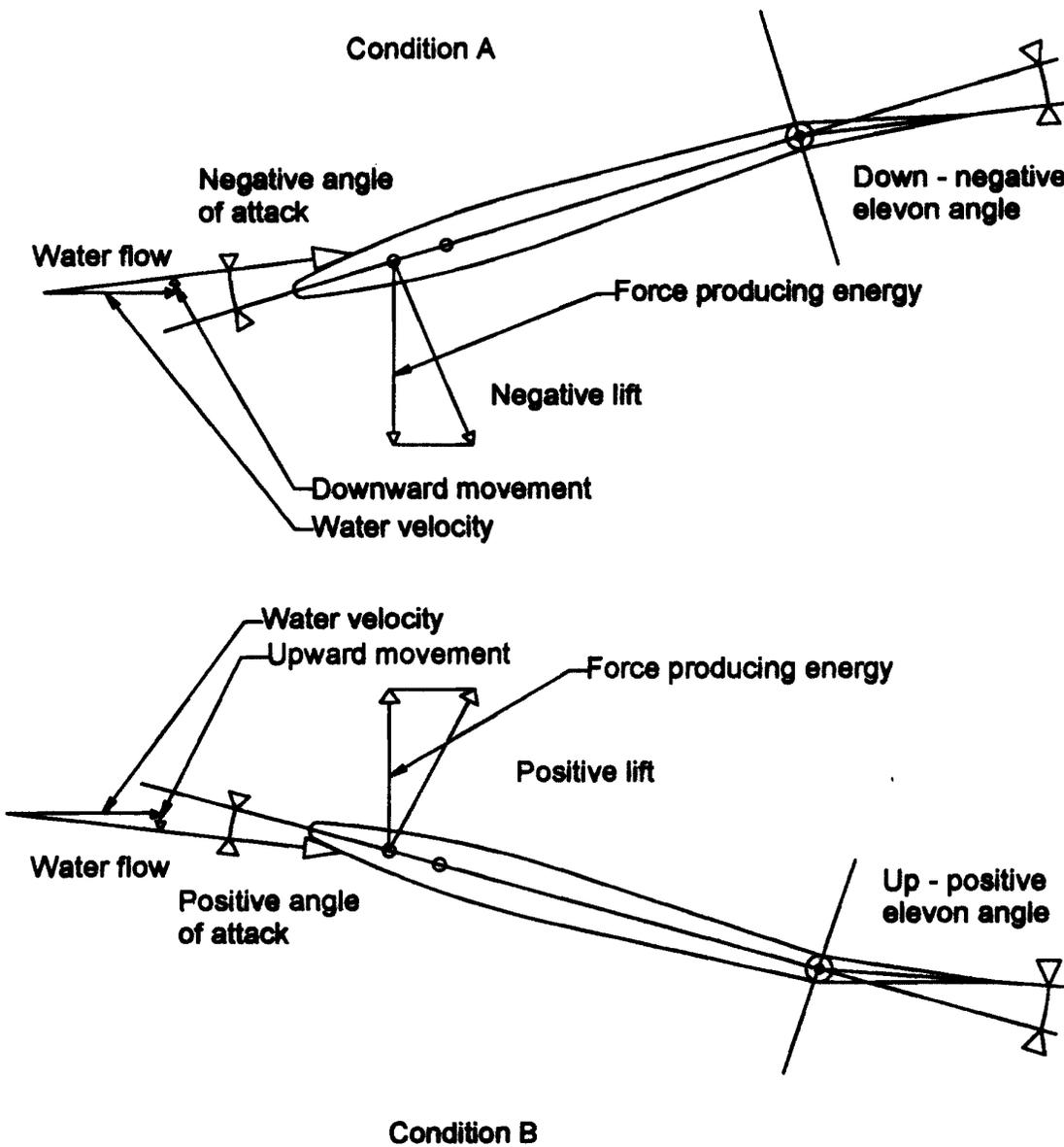


Figure 11

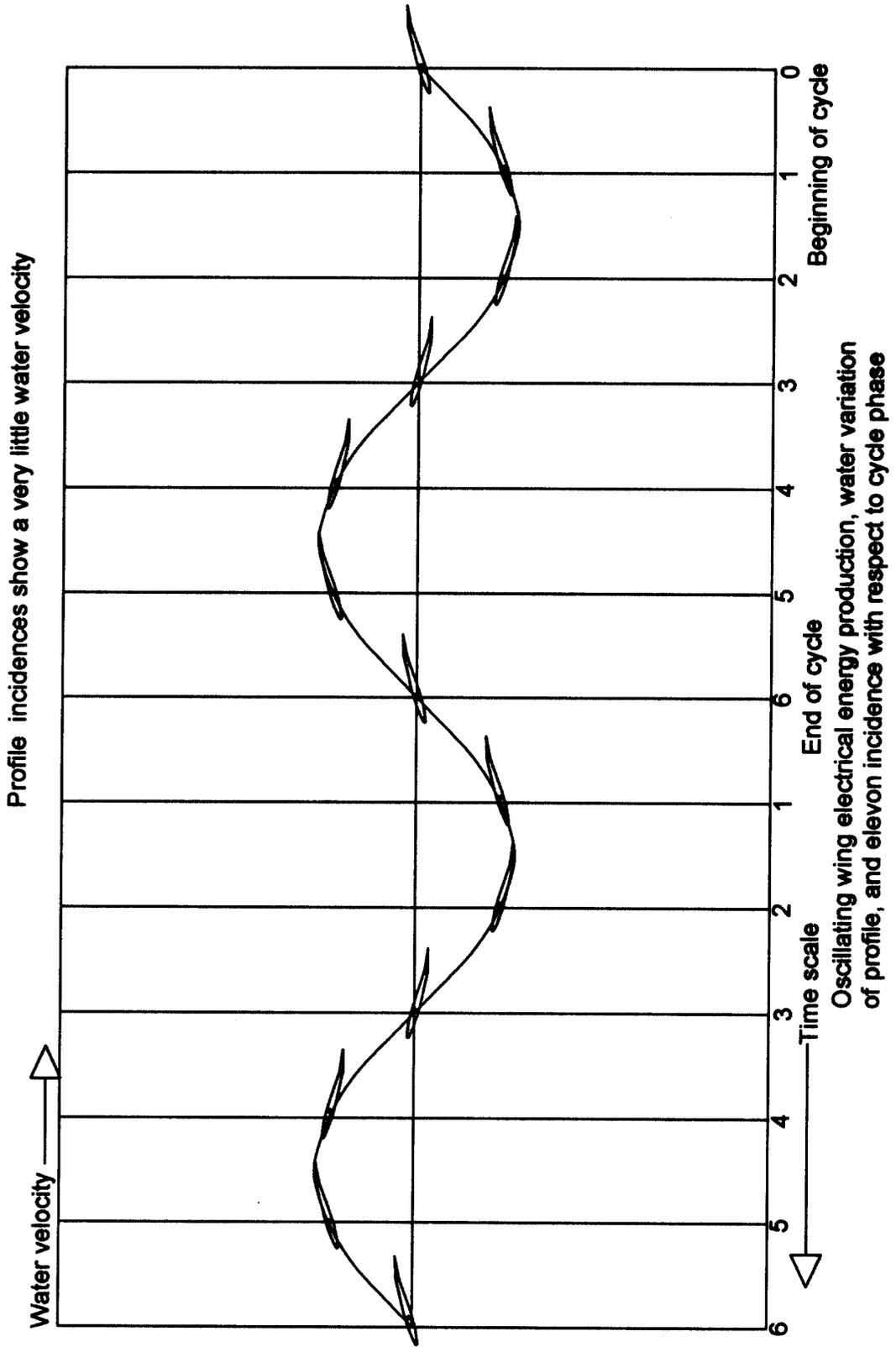
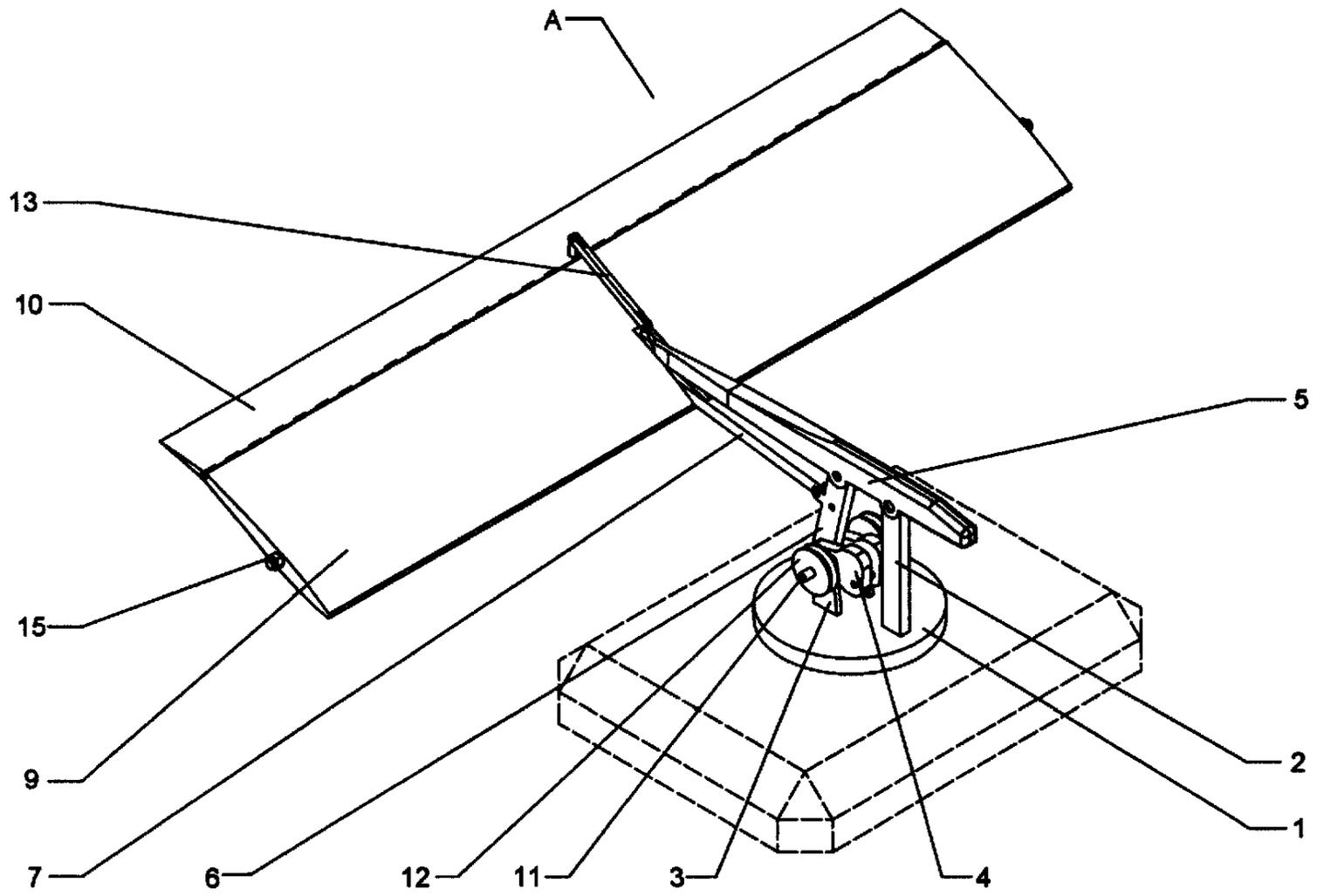


Figure 12



Annexe B

Démonstration de la résolution d'une équation en sinus et cosinus

Comme la résolution d'une équation de forme $A \cos \theta + B \sin \theta = C$ est souvent utilisée dans le présent ouvrage, il est utile de transcrire ici le cheminement détaillé afin que les résultats obtenus puissent être acceptés tels quels dans le reste du document.

Depuis l'équation (B.1), nous pouvons premièrement déterminer la valeur du sinus et du cosinus de l'angle, puis calculer l'angle par une fonction du type arctan2.

$$A \cos \theta + B \sin \theta = C \quad (\text{B.1})$$

$$(A \cos \theta)^2 = (C - B \sin \theta)^2 \quad (\text{B.2})$$

$$A^2 \cos^2 \theta = C^2 + B^2 \sin^2 \theta - 2BC \sin \theta \quad (\text{B.3})$$

$$A^2 (1 - \sin^2 \theta) = C^2 + B^2 \sin^2 \theta - 2BC \sin \theta \quad (\text{B.4})$$

$$0 = (A^2 + B^2) \sin^2 \theta - 2BC \sin \theta + (C^2 - A^2) \quad (\text{B.5})$$

Ce qui se résout comme toute recherche de racines d'une équation quadratique :

$$\sin \theta = \frac{2BC \pm \sqrt{4B^2C^2 - 4(A^2 + B^2)(C^2 - A^2)}}{2(A^2 + B^2)} \quad (\text{B.6})$$

$$\sin \theta = \frac{BC \pm \sqrt{B^2C^2 - A^2C^2 + A^4 - B^2C^2 + A^2B^2}}{A^2 + B^2} \quad (\text{B.7})$$

$$\sin \theta = \frac{BC \pm A\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2}. \quad (\text{B.8})$$

En remplaçant l'équation (B.8) permettant de trouver le sinus de θ dans l'équation B.1, nous obtenons :

$$C = A \cos \theta + B \frac{BC \pm A\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2} \quad (\text{B.9})$$

$$A \cos \theta = C - \frac{B^2C \pm AB\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2} \quad (\text{B.10})$$

$$\cos \theta = \frac{CA^2 + CB^2 - B^2C \mp AB\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A(A^2 + B^2)} \quad (\text{B.11})$$

$$\cos \theta = \frac{AC \mp B\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2}. \quad (\text{B.12})$$

Nous avons finalement obtenu la résolution de l'équation $A \cos \theta + B \sin \theta = C$, car en sachant le sinus et le cosinus d'un angle, il est possible de le calculer directement. Afin de simplifier les équations (B.8) et (B.12), nous utiliserons le coefficient Δ et le facteur k qui vaut 1 ou -1 selon la branche de solution choisie.

$$\cos \theta = \frac{AC - kB\sqrt{\Delta}}{A^2 + B^2} \quad \text{où : } \begin{cases} k = \pm 1 \text{ selon la branche choisie} \\ \Delta = A^2 + B^2 - C^2 \end{cases} \quad (\text{B.13})$$

$$\sin \theta = \frac{BC + kA\sqrt{\Delta}}{A^2 + B^2} \quad (\text{B.14})$$

Annexe C

Graphes des réponses de l'aile oscillante à auto-compensation selon différentes amplitudes de tangage

Cette annexe regroupe les graphes de l'angle de tangage de l'aile, θ , de son angle de pilonnement, φ , de la position verticale de l'aile et de la position angulaire de la membrure \overline{AC} , θ_1 , selon chaque amplitude de tangage demandée. Les bornes supérieures des dimensions des membrures sont celles indiquées dans le tableau 1.2 de sorte que les erreurs entre les demandes et les réponses sont les plus faibles possible. Par contre, les dimensions sont par le fait même plus importantes, ce qui peut être moins pratique au point de vue structurel. Il s'agit néanmoins d'un point de comparaison appréciable des réponses aux différentes amplitudes demandées.

Dimensions du système: $AB = 1.215$, $AC = 0.1034$,

$BD = 1.058$, $Bx = 1.057$, $By = 0.5987$,

$BG = 5.096$, $CD = 0.6032$, $FG = 0.1989$,

$EF = 4.011$, $CH = 0.402$, $HE = 0.02741$.

Racine de la somme du carré des erreurs de tangage et de pillonnement = 0.4307

Amplitude de tangage = 10 deg

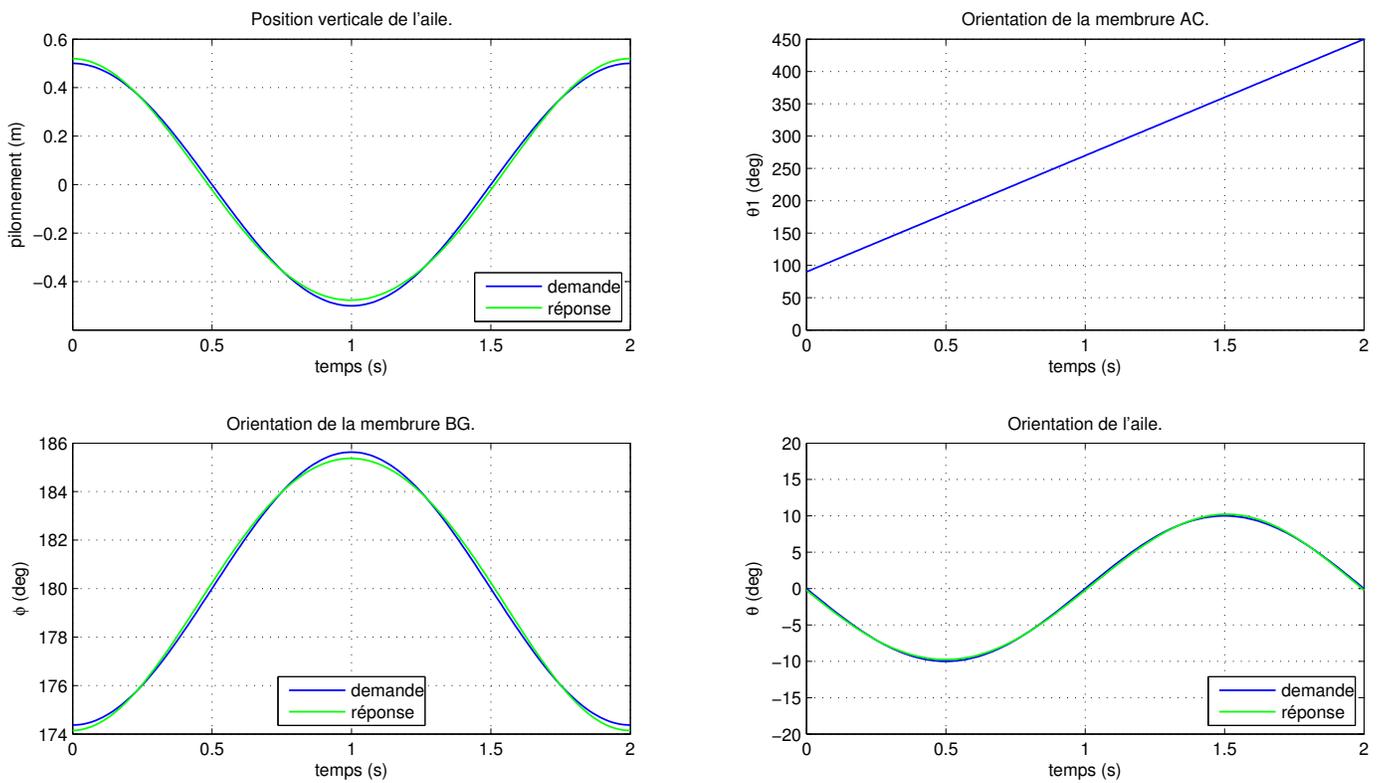


Figure C.1: Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 10° .

Dimensions du système: $AB = 4.741$, $AC = 0.1419$,

$BD = 4.681$, $Bx = 4.684$, $By = 0.7281$,

$BG = 16$, $CD = 0.735$, $FG = 0.07489$,

$EF = 11.08$, $CH = 0.6033$, $HE = 0.236$.

Racine de la somme du carré des erreurs de tangage et de pillonnement = 0.5664

Amplitude de tangage = 20 deg

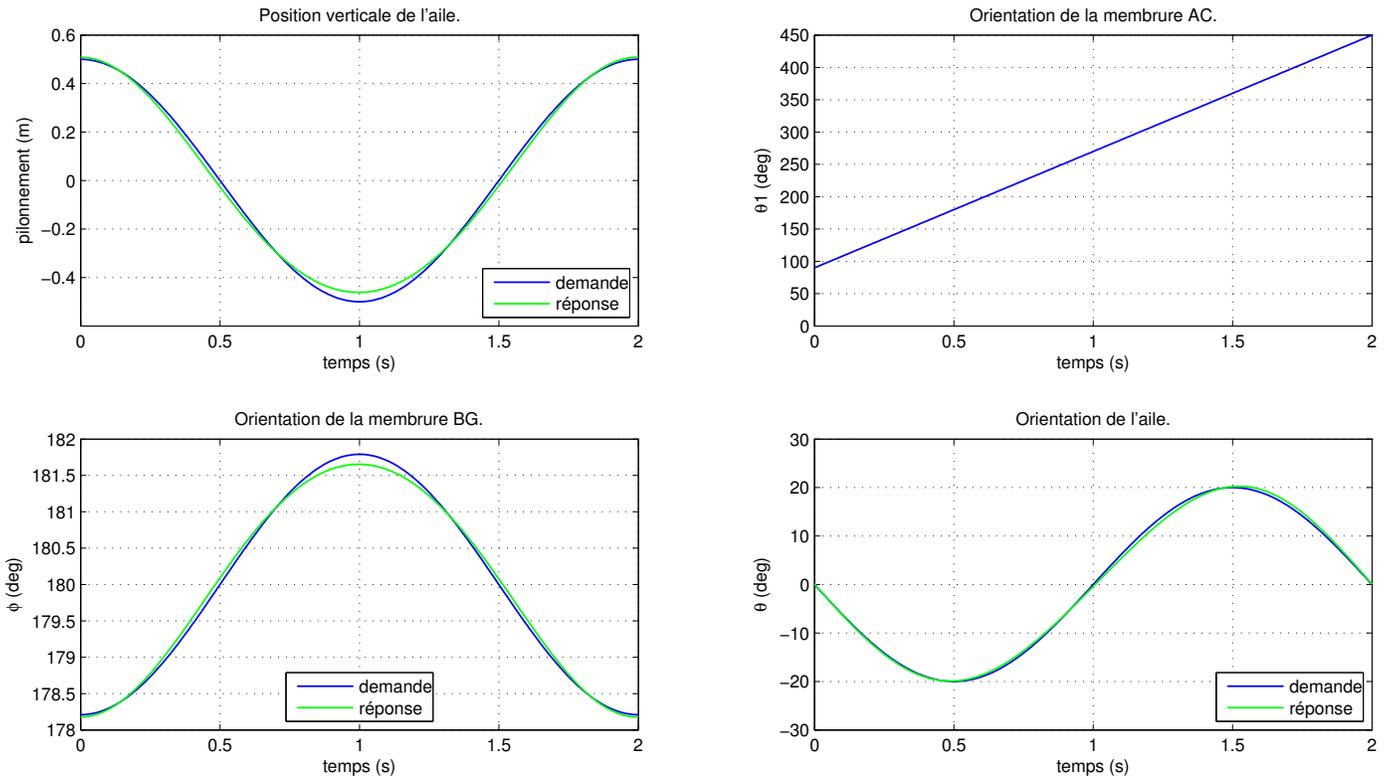


Figure C.2: Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 20° .

Dimensions du système: $AB = 3.639$, $AC = 0.1377$,

$BD = 3.589$, $Bx = 3.593$, $By = 0.579$,

$BG = 12.53$, $CD = 0.5873$, $FG = 0.04765$,

$EF = 8.768$, $CH = 0.4861$, $HE = 0.1791$.

Racine de la somme du carré des erreurs de tangage et de pillonnement = 0.7131

Amplitude de tangage = 30 deg

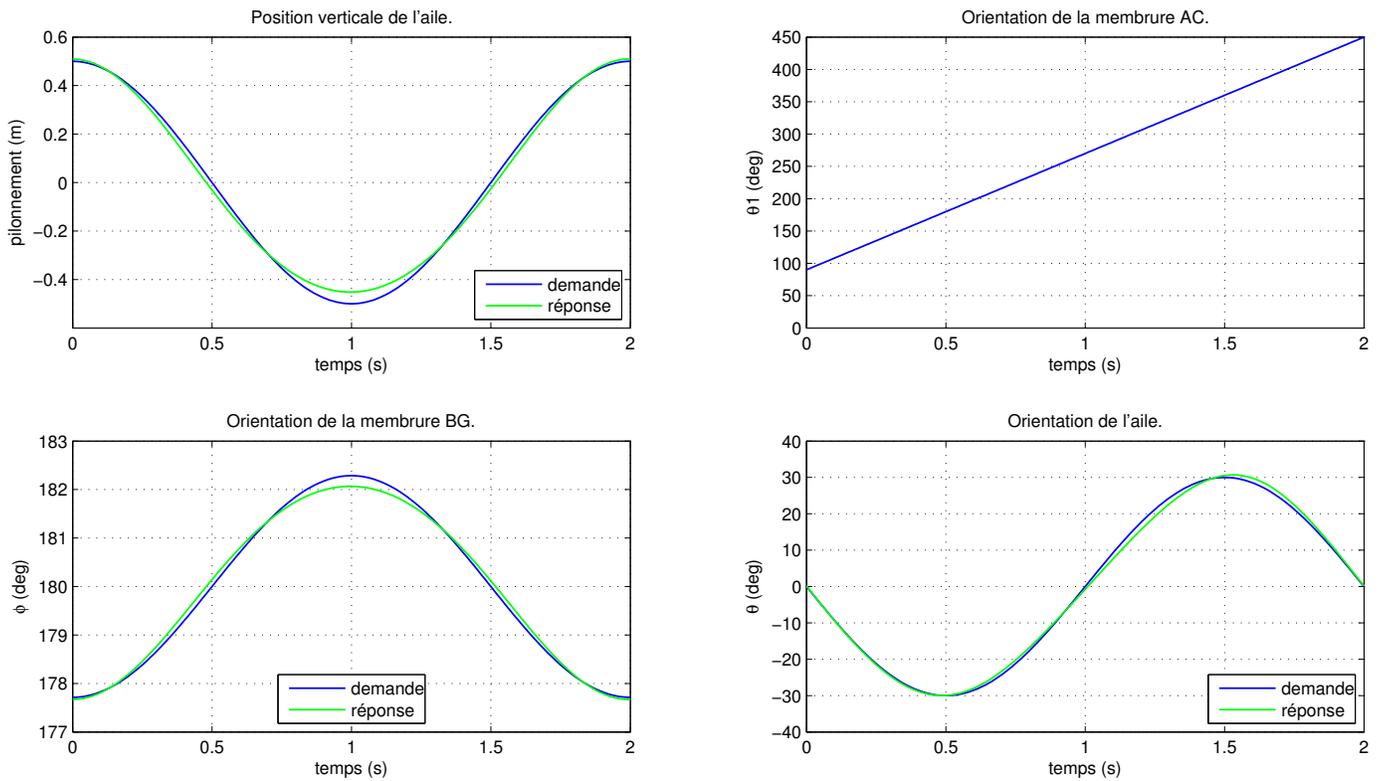


Figure C.3: Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 30° .

Dimensions du système: $AB = 2.558$, $AC = 0.1478$,

$BD = 2.51$, $Bx = 2.513$, $By = 0.4736$,

$BG = 8.066$, $CD = 0.4851$, $FG = 0.02571$,

$EF = 5.477$, $CH = 0.4307$, $HE = 0.08015$.

Racine de la somme du carré des erreurs de tangage et de pillonnement = 0.9511

Amplitude de tangage = 40 deg

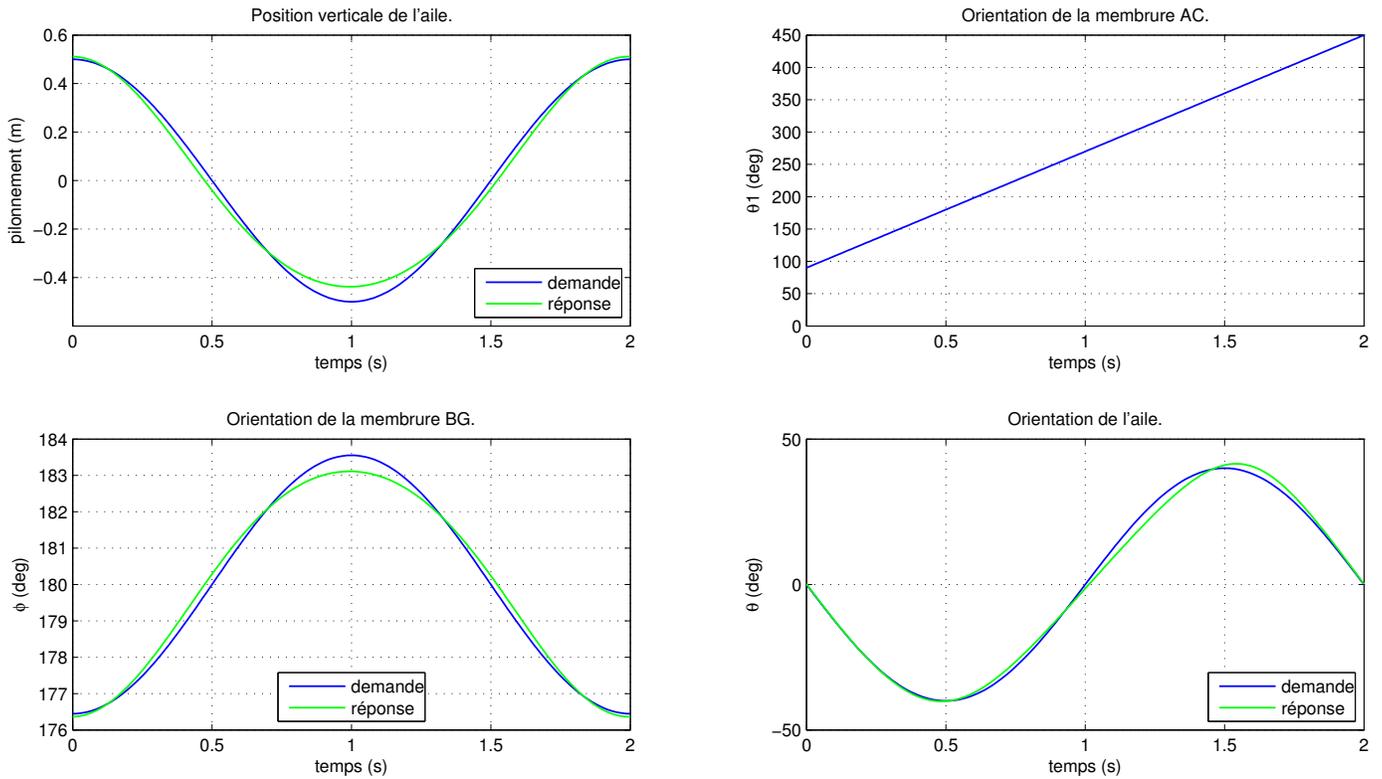


Figure C.4: Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 40° .

Dimensions du système: $AB = 3.782$, $AC = 0.1122$,

$BD = 3.743$, $Bx = 3.744$, $By = 0.5347$,

$BG = 16$, $CD = 0.5406$, $FG = 0.03541$,

$EF = 11.96$, $CH = 0.4094$, $HE = 0.3$.

Racine de la somme du carré des erreurs de tangage et de pillonnement = 0.759

Amplitude de tangage = 50 deg

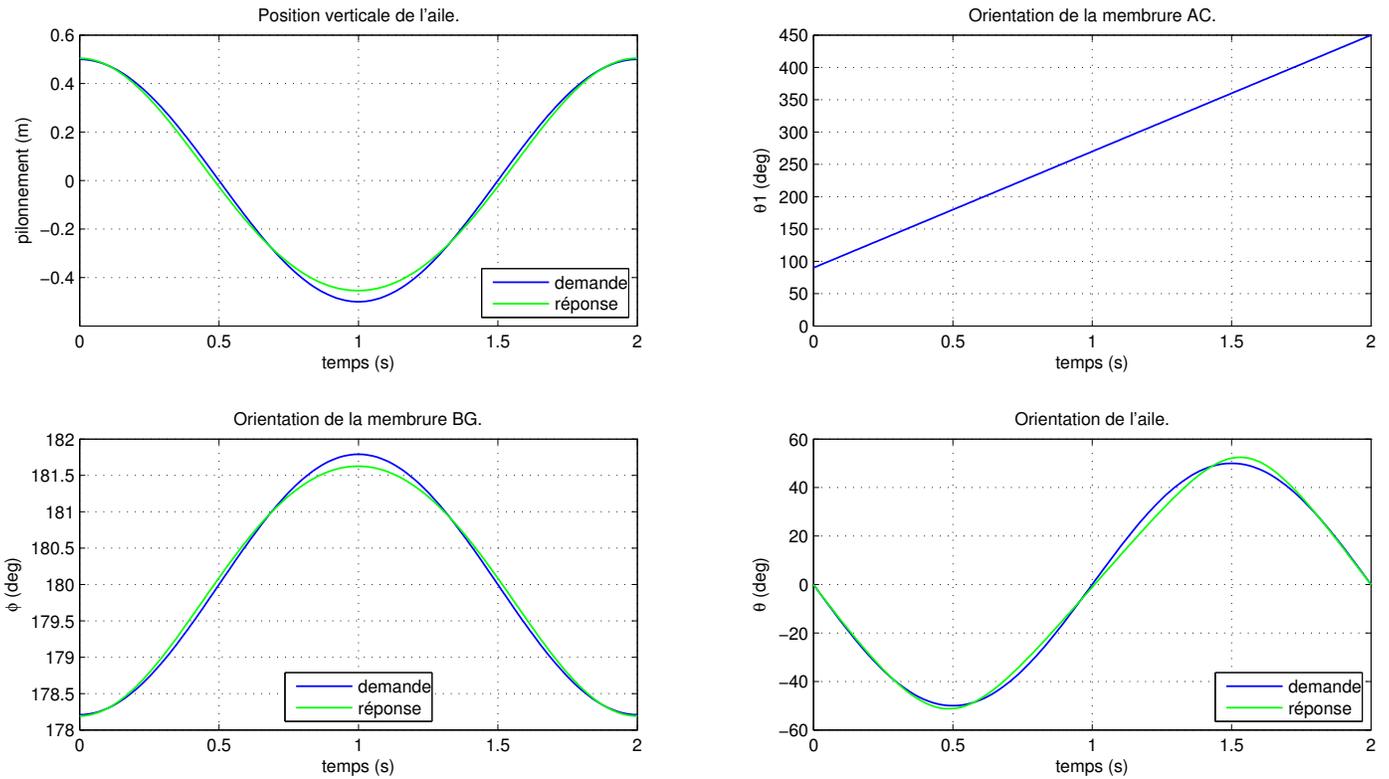


Figure C.5: Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 50° .

Dimensions du système: $AB = 3.639$, $AC = 0.1327$,

$BD = 3.596$, $Bx = 3.599$, $By = 0.5399$,

$BG = 12.89$, $CD = 0.5481$, $FG = 0.03862$,

$EF = 9.025$, $CH = 0.4096$, $HE = 0.2706$.

Racine de la somme du carré des erreurs de tangage et de pillonnement = 0.9586

Amplitude de tangage = 60 deg

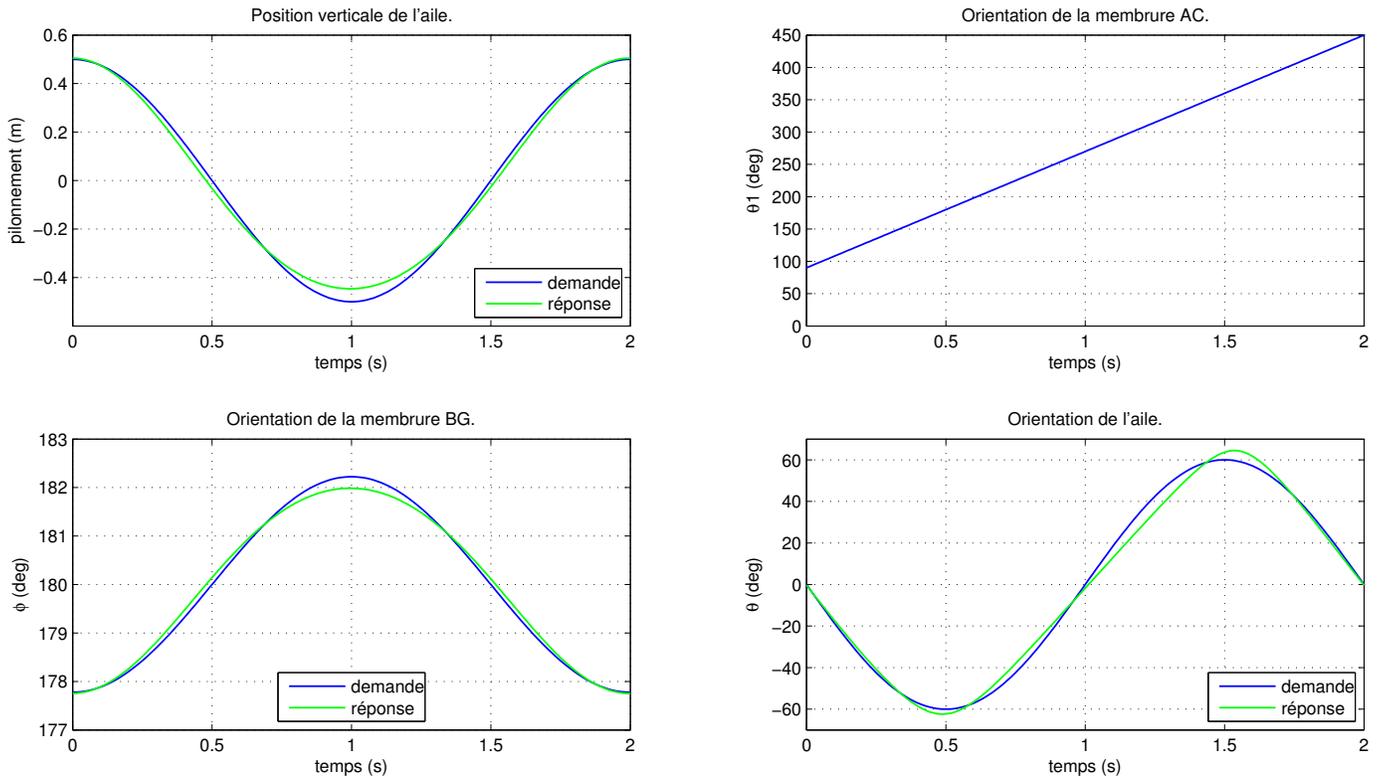


Figure C.6: Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 60° .

Dimensions du système: $AB = 3.25$, $AC = 0.09612$,

$BD = 3.216$, $Bx = 3.218$, $By = 0.4537$,

$BG = 16$, $CD = 0.4588$, $FG = 0.03169$,

$EF = 12.49$, $CH = 0.3241$, $HE = 0.3$.

Racine de la somme du carré des erreurs de tangage et de pillonnement = 0.9074

Amplitude de tangage = 62 deg

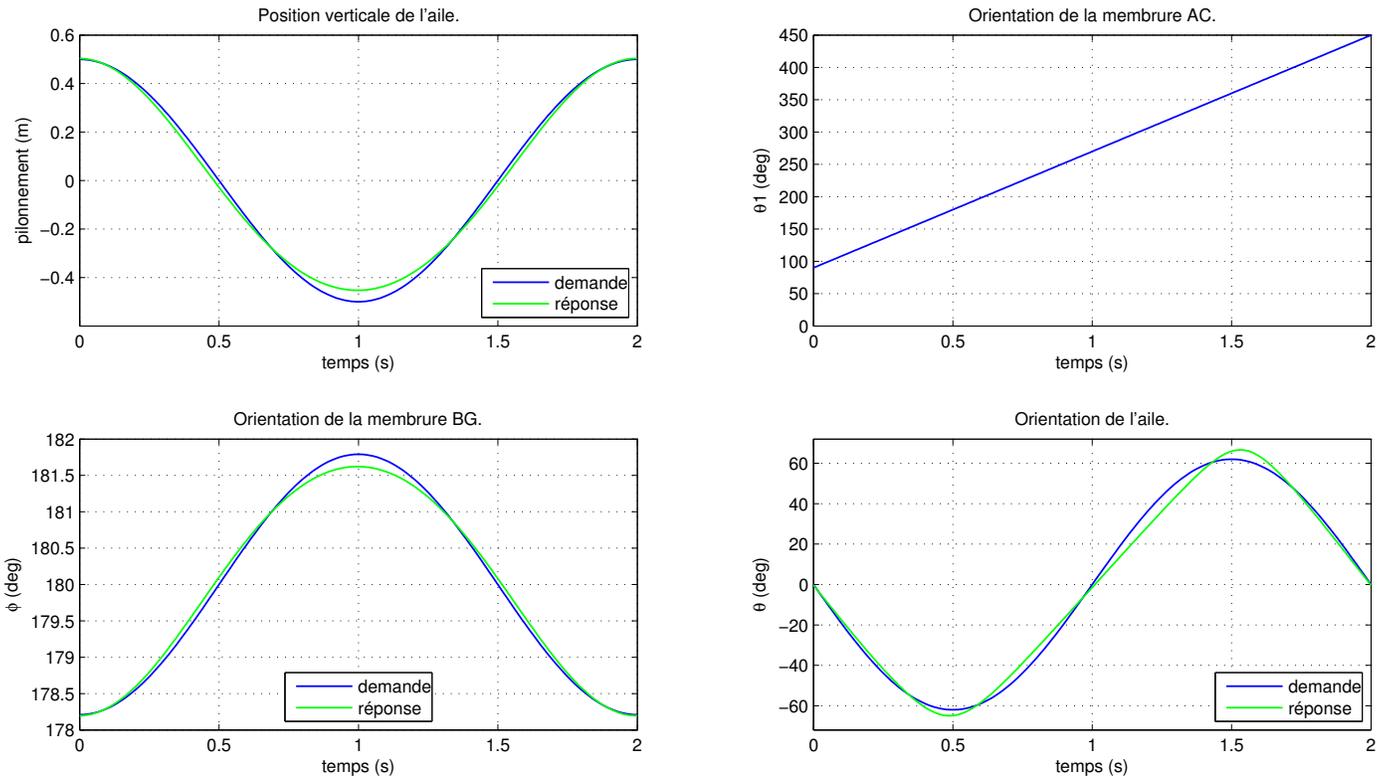


Figure C.7: Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 62°.

Dimensions du système: $AB = 1.681$, $AC = 0.2$,

$BD = 1.637$, $Bx = 1.638$, $By = 0.3737$,

$BG = 3.776$, $CD = 0.4007$, $FG = 0.2057$,

$EF = 1.864$, $CH = 0.01$, $HE = 0.3$.

Racine de la somme du carré des erreurs de tangage et de pillonnement = 1.841

Amplitude de tangage = 70 deg

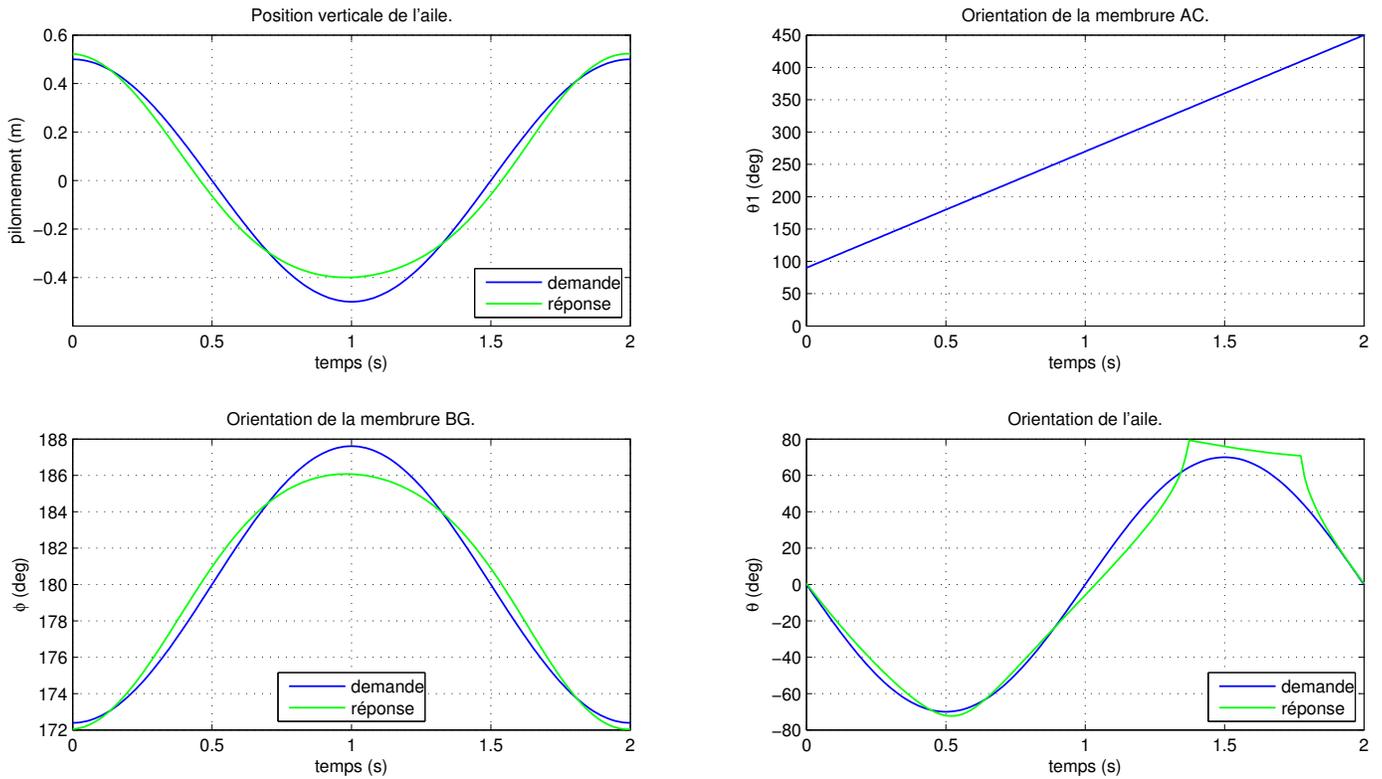


Figure C.8: Graphes obtenus pour une amplitude de tangage de 70°.

Annexe D

Scénario envisageable pour un prototype de 1kW d'un système d'ailes oscillantes en tandem

Cette annexe est la retranscription des données imposées par le *Laboratoire de mécanique des fluides numérique de l'Université Laval* et sont propres à un cas concret où un éventuel prototype de système d'ailes oscillantes en tandem sera placé. Celles-ci ont été utilisées pour calculer les forces aérodynamiques et les dimensions du système AEGIR tandem dans le chapitre 6. Ici, l'orientation de l'aile amont est notée θ_1 et celle de l'aile aval θ_2 . c' est utilisé pour désigner la corde de l'aile et b' son envergure, alors que d' désigne la distance parcourue par l'axe de tangage des ailes. Les amplitudes de tangage doivent être modifiables alors que celle de pilonnement est fixe, de même que la distance entre les ailes.

12 juin 2007



Hydrogénérateur à ailes oscillantes - scénario envisageable pour prototype de 1kW dans l'eau -

On considère un prototype comportant une paire d'ailes en configuration tandem, partageant la même fenêtre d'écoulement.

Paramètres:

$$U_{\infty} = 1.5 \text{ m/s}$$

$$\eta = 40\% \quad (25\% + 15\%)$$

$$P_a = 2.5 \text{ kW}$$

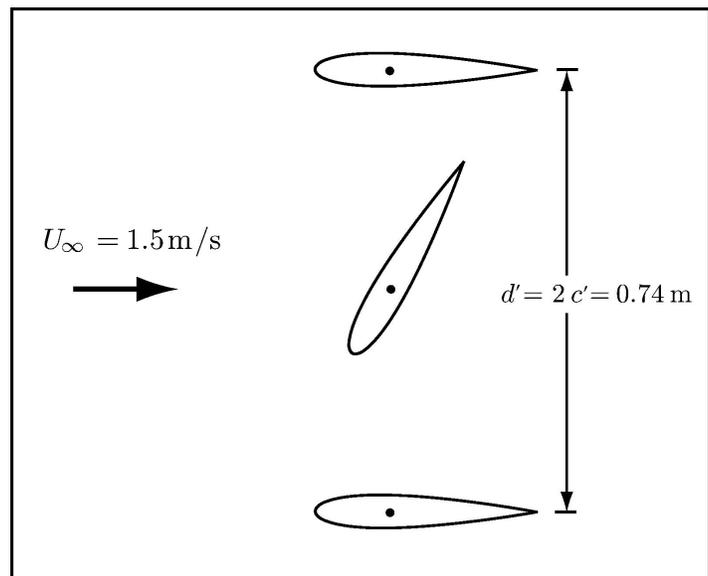
$$c' = 0.37 \text{ m}$$

$$b' = 2.00 \text{ m}$$

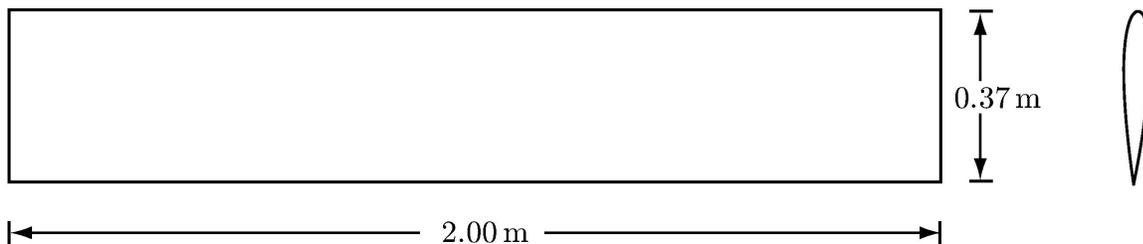
$$d' = 0.74 \text{ m}$$

$$f = 0.57 \text{ Hz}$$

$$\rho = 999 \text{ kg/m}^3$$



Géométrie:



$$\theta_1 = 68 \text{ (65-75) deg} \quad \theta_2 = 78 \text{ (75-85) deg}$$

$$\text{Configuration tandem: } (\phi_{1-2} = \pi)$$

