HAL
open science

Vers un contrôle de vol d'un oiseau artificiel

Yves Lenoir

To cite this version:

Yves Lenoir. Vers un contrôle de vol d'un oiseau artificiel. CIFA 2010, Jun 2010, Nancy, France. hal-00492004

HAL Id: hal-00492004

https://minesparis-psl.hal.science/hal-00492004

Submitted on 14 Jun 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Vers un contrôle de vol d'un oiseau artificiel

Yves LENOIR[1]
[1]Centre Automatique et Systèmes, Mines Paris Tech
35 rue Saint Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex, France.
lenoir@cas.ensmp.fr

Résumé : Cet article concerne l'étude d'un drone à ailes battantes. Des observations du vol de grands oiseaux, notamment de la cinématique du cycle de leur battement, et la prise en compte de leurs capacités physiologiques ont conduit à *un calcul simplifié des forces aérodynamiques engendéres par un oiseau en vol rectiligne stabilisé*. Le résultat est utilisé pour trouver les contrôles de gauchissement (vrillage) des ailes assurant *le maintien du vol horizontal*. La valeur de la puissance moyenne requise simulée est du même ordre que celle d'un oiseau de dimensions et masse similaires. On montre que, à fréquence de battement et vitesse-air données, il existe des commandes quasi-découplées des équilibres moyens, respectivement entre poids et portance, et entre traînée et force propulsive. Deux solutions pour mettre en œuvre ces commandes sont présentées, dont une s'avère praticable. Ce type de contrôle constituerait le cœur d'un algorithme d'assistance au pilotage d'un oiseau artificiel radio-commandé.

Mots-clés : ornithoptère, vol battu, moyennisation, découplage.
Définition : saumon = extrémité d'une aile (cf. section II)

I. Introduction

Depuis la seconde moitié du XIXe Siècle on sait faire voler des engins à ailes battantes, dénommés ornithoptères, mus par des moteurs à caoutchouc, thermiques ou électriques. Cependant aucune des tentatives réussies n'a pu approcher les performances énergétiques des oiseaux.

Pour fixer les idées, les ornythoptères, que leur masse dépasse plusieurs kilogrammes ou avoisine 10 g, demandent une puissance de l'ordre de 100 W/kg [1][3], rarement moins [4], pour soutenir un vol stabilisé à quelques 10 m/s. Les données biologiques sur les oiseaux montrent qu'il leur faut nettement moins de 20 W/kg pour exécuter des vols de plusieurs heures à 20 m/s, voire plus. Un oiseau aussi peu performant qu'un ornithoptère ne pourrait pas voler plus de quelques secondes : ainsi une oie bernache de 4 kg devrait fournir une puissance biologique de 1,6 kW pour que ses muscles produisent la puissance mécanique de 400 W qu'il lui faudrait alors délivrer durant sa migration !

Comment expliquer un tel écart de performances ?

Les ornythoptères sont conçus pour exercer une force propulsive durant les deux phases principales du battement, en poussée (abaissée des ailes) et en relâchement (remontée). Cela suppose que l'incidence moyenne de la voilure soit *négative* durant la remontée, donc qu'elle engendre une « portance » négative. Pour compenser, la voilure doit produire une force supérieure à deux fois le poids durant l'abaissée. L'onithoptère module donc une force d'amplitude très supérieure à son poids [1].

Les oiseaux optimisent le cycle de battement. Durant la phase de relâchement l'action conjuguée des pectoraux, comme antagoniste au mouvement, et du contrôle du gauchissement (mais aussi de la flexion, voir infra) réalise le meilleur compromis entre maintien d'une certaine portance et réduction de la traînée sous la contrainte de la force soutenable durant la phase active de poussée. Le vol battu des oiseaux se caractérise donc par une portance toujours positive et une pulsation de la traînée, une force d'un ordre de grandeur inférieure au poids.

La différence majeure se situe sur le plan du contrôle : les uns, les oiseaux, exercent un contrôle permanent du vrillage de leurs ailes alors que les autres, les ornythoptère, subissent les forces aérodynamiques que leur battement produit [1][4].

Passer de l'ornithoptère à l'*oiseau artificiel* impose donc un contrôle approprié des forces aérodynamiques engendrées par le vol battu et un cycle de battement de type oiseau (fig 5).

Les forces aérodynamiques et leurs intégrales sur un cycle de battement sont calculées de façon approchée (cf section II) en fonction de la valeur du gauchissement de l'aile (vrillage). On impose deux conditions dictées par l'observation :

- entre les inversions aux points morts haut et bas, la vitesse angulaire de l'aile est constante ; (a)
- les oiseaux ne pouvant relever leurs ailes avec force, on cherche un contrôle qui maintienne une certaine proportion de la portance durant cette phase. (b)

L'observation du cycle de battements de plusieurs grands oiseaux confirme (a). On en déduit que la force exercée est constante durant chacune des phases de poussée et de relâchement. Le contrôle du vol battu consistera donc en une séquence périodique de consignes constantes de vitesse angulaire et de gauchissement. Des mesures sur le comportement de l'engin serviront à modifier ces consignes d'une période à l'autre afin d'assurer le suivi de trajectoire.

Les résultats obtenus avec ce modèle sont similaires à ceux de simulations 3D des écoulements, tourbillons et forces [2].

Le découplage du contrôle de la portance et de la traînée, cf. section IV, est la principale contribution de cet article. Il a été validé par une série d'essais présentés en sections V et VI.

II. Calcul simplifié des forces aérodynamiques.

L'enchaînement des relations ci-après fournit les forces élémentaires à intégrer le long de l'aile et sur le cycle de battement. Le schéma ci-dessous explicite les variables :

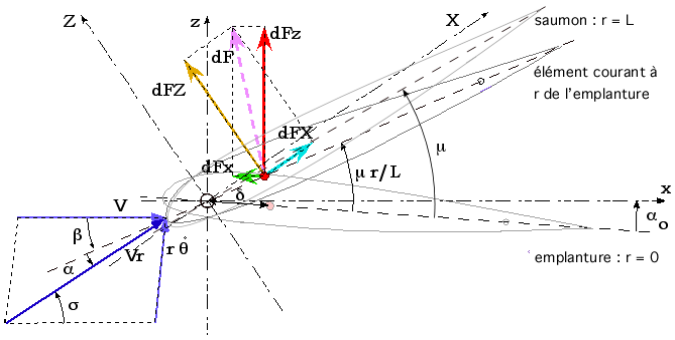

Fig 1. Contribution d'un élément d'aile en vol battu.

$$\alpha_0(V) = 2Mg/(\rho k S V^2)$$
angle d'incidence à l'emplanture où
V = vitesse du vol, horizontal ; S = surface alaire ;
k = coefficient du profil ; ρ = masse spécifique de l'air

$$V_r(r,V,\dot\theta) = \sqrt{V^2 + r^2\dot\theta^2 + 2Vr\dot\theta\sin(\alpha_0)}$$
vitesse air locale à r de l'emplanture
$\dot\theta$ = vitesse angulaire instantanée du battement

$$\beta(r,\mu) = \mu r/L - \alpha_0$$
inclinaison locale de la corde en fonction du gauchissement μ
L est la longueur d'une aile

$$\sigma(r,V,\dot\theta) = \arctan(r\dot\theta\cos(\alpha_0)/(V + r\dot\theta\sin(\alpha_0)))$$
déviation locale des filets d'air due au battement

$$\alpha(r,V,\dot\theta) = \sigma - \beta$$
angle d'incidence local

$$C_z(r,V,\dot\theta) = k\alpha$$
coefficient de portance local

$$C_x(r,V,\dot\theta) = C_{x0}\sqrt{V_0/V} + C_z^2/(\pi\lambda)$$
coefficient de traînée local ; λ = allongement de l'aile

$$dFZ(r,V,\dot\theta) = \rho c C_z V_r^2/2\ dr$$
force élémentaire normale à V_r (c = longueur de la corde)

$$dFX(r,V,\dot\theta) = \rho c C_x V_r^2/2\ dr$$
force élémentaire tangentielle à V_r

$$dF_z(r,V,\dot\theta) = \cos(\theta)(dFZ\cos(\sigma) + dFX\sin(\sigma)) \quad (1)$$
portance élémentaire locale où θ = angle du battement

$$dF_x(r,V,\dot\theta) = -dFZ\sin(\sigma) + dFX\cos(\sigma) \quad (2)$$
traînée élémentaire locale

$$dM(r,V,\dot\theta) = \delta(dFZ\cos(\alpha) + dFX\sin(\alpha)) \quad (3)$$
moment de la force locale autour du pivot de gauchissement
où δ = distance entre pivot et ligne d'action ($0.25c$)

On intègre (1), (2) et (3) en *r* sur {0,L} et en temps sur un cycle de battement, pour un doublet $\{\mu_p,\mu_r\}$ de la valeur du gauchissement (angle mesuré au saumon) durant respectivement les phases de poussée et de relâchement. *Il s'agit donc d'une commande par valeurs discrètes appliquée en boucle ouverte durant un cycle de battement.*

Cette double intégration fournit, toutes choses égales par ailleurs, les valeurs des : portance, traînée et moment des forces aérodynamiques et leurs moyennes sur un cycle.

III. Exploitation du résultat et validation qualitative.

L'analyse empirique du vol battu suggère un découplage « évident » entre traînée et portance des deux commandes cycliques de vrillage $\{\mu_p,\mu_p\}$, soit $\{\mu_p,\beta=-\mu_r/\mu_p\}$. A partir des valeurs de portance et traînée relatives à deux commandes $\{\mu_1,\beta_1\}$ et $\{\mu_2,\beta_2\}$ choisies pour respecter les deux conditions (a) et (b), une interpolation linéaire donne μ qui annule la traînée et une sur β annule la portance résiduelle.

La figure 2 présente un cycle de battement équilibré ainsi calculé pour un oiseau de 1 kg volant à 16 m/s avec une période de battement de 0,294 s. Le cycle retenu ici est symétrique, cas assez rare dans la nature. En général la phase de relâchement est plus courte que celle de poussée.

La valeur de la puissance aérodynamique moyenne simulée des deux ailes est de 8,7 W, sans récupération de l'énergie disponible durant la remontée. Elle serait de 11 W s'il s'agissait d'un oiseau équivalent qui dissipait cette énergie par l'action antagoniste de ses muscles pectoraux. Ce chiffre (les traînées du fuselage et de l'empennage sont ici considérées comme nulles) est cohérent avec celui de la puissance déployée par une bernache volant à 20 m/s (< 20 W/kg).

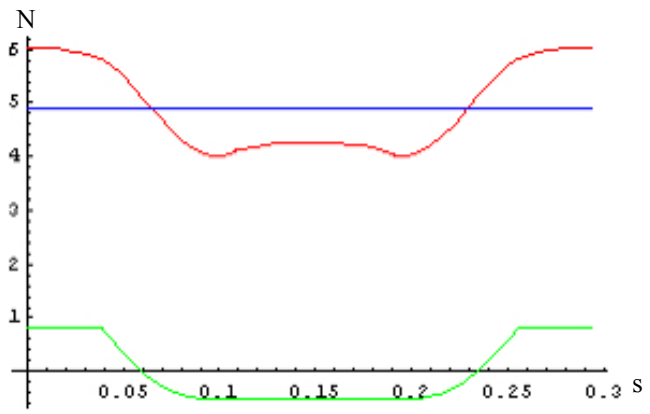

Fig 2. Variations des portance et traînée simulées au cours du cycle.

Le graphe ci-dessous de l'incidence au saumon suggère quelques commentaires.

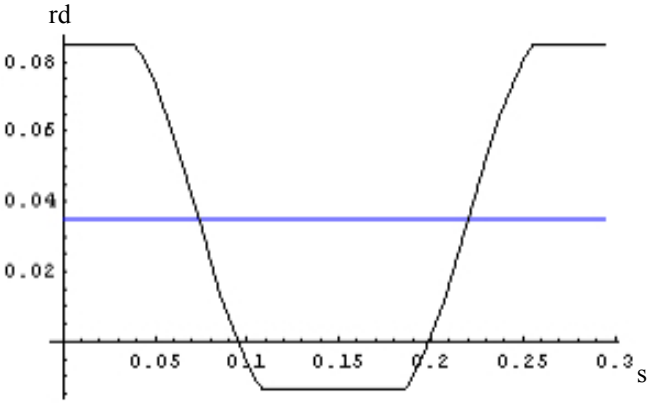

Fig 3. Variations d'incidence au saumon au cours du cycle.

On voit qu'elle prend une valeur faiblement négative durant le relâchement, ce qui signifie qu'une partie de l'énergie « disponible » durant la remontée des ailes est transformée en force propulsive. Ce phénomène est également mentionné par [2]. Il est moins que probable que les oiseaux le produisent tel quel durant leur vol car leurs avant-bras fléchissent durant la remontée ; quant aux chauves-souris, elles replient complètement leurs ailes contre leur corps durant cette phase, d'où l'impression, fausse, que leur vol est saccadé et erratique. On touche ici aux limites de la représentativité de ce genre de modélisation [6][7]. La ligne bleue indique l'incidence de l'emplanture, celle requise pour un vol plané horizontal.

Le diagramme vectoriel des deux phases illustre (fig 4) le mode vol battu d'un oiseau artificiel « sans avant-bras ». La position des points d'application des résultantes des portances et traînée est conforme aux résultats obtenus par Neef [2].

Avant d'aborder la question de la commande du vol battu, explicitons qualitativement le rôle de la flexion des avant-bras dans l'aérodynamique du vol battu. Ceci, afin de suggérer qu'au delà de ce qui a déjà été évoqué, là se situe aussi une différence fondamentale entre ornithoptères et oiseaux. On examine ici le cycle de battement d'un cygne-chanteur (vol rapide) filmé de face (cf. fig 5).

La courbe en rouge représente la trajectoire angulaire du

bras. La courbe en noir est l'approximée réalisée par un

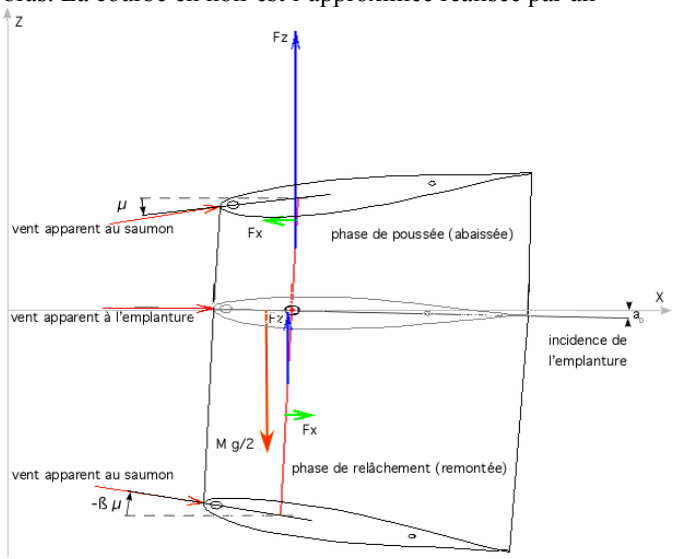

Fig 4. Portance et traînée d'un oiseau en vol battu

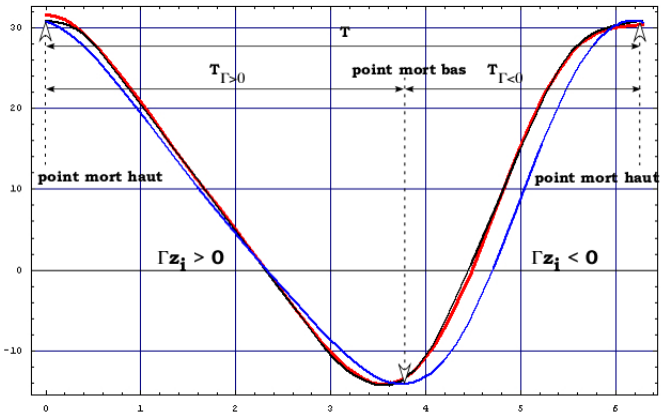

Fig 5. Cycle de battement du cygne

système comprenant deux cames synchrones et la bleue celle obtenue avec un système manivelle-bielle, levier et glissière (cf. infra la question du contrôle de la cinématique du battement et de la récupération de l'énergie du relèvement). En abscisse l'angle de l'arbre de sortie de la transmission (rd), en ordonnée l'angle du bras des ailes/horizontale (en degrés). Le dièdre moyen est positif et vaut environ 7,5°, ce qui assure une stabilité en roulis de type avion à dièdre.

La flexion de l'aile commence au point mort bas du bras et s'effectue énergiquement au point que le saumon continue de descendre alors que le bras a déjà commencé sa remontée. L'amplitude du battement s'en trouve accrue d'environ 17%. Lorsque la vitesse angulaire de la phase de relâchement du bras est établie, l'avant-bras suit en conservant une flexion presque constante. Cette flexion commence à diminuer dès que la vitesse angulaire du bras diminue.

L'action du biceps conduit ainsi à maintenir la portance à une valeur élevée ainsi que la propulsion alors même que la phase de relâchement est engagée. Pendant ce temps-là l'angle de l'avant-bras se rapproche de la verticale, préparant le relatif effacement de ce segment durant la phase très rapide de la remontée : la puissance du vertex provoqué par la modification de l'écoulement lors de l'inversion s'en trouve considérablement réduite. La reprise d'appui de l'avant-bras s'effectue durant l'inversion haute et se termine juste après le passage du point-mort haut du mouvement du bras. Là encore le processus tend à réduire le tourbillon transversal produit par l'inversion : sa formation est décalée.

L'avantage procuré par la flexion est manifeste et sans doute crucial. On a donc conçu une aile en deux corps, bras et avant-bras. Un ressort réglé pour équilibrer l'extension de l'aile en vol plané mime l'action du biceps. Une butée empêche tout dépassement angulaire. Comme dans le cas des oiseaux, le vrillage de l'aile est limité à l'avant-bras. A notre connaissance, aucun modèle propre à simuler un cycle réel d'aile d'oiseau n'a été réalisé [1][6][7]. Une maquette de ce type d'aile a été testée avec succès au sol pour qualifier les matériaux et le principe de l'articulation élastique de ses deux segments.

IV. Commandes découplées du vol battu

On a utilisé le modèle décrit supra pour caractériser l'influence des angles de gauchissement durant les phases de poussée et relâchement sur la portance résiduelle et la traînée moyennes à vitesse-air et fréquence de battement données. En fait, comme indiqué, on a exprimé ces deux angles par la valeur μ du gauchissement durant la phase de poussée et par le coefficient multiplicateur ß à appliquer à -μ pour obtenir l'angle de gauchissement durant la phase de relâchement.

La figure 6 confirme très clairement le quasi découplage ainsi obtenu (vitesse-air 16 m/s, période 0,3s).

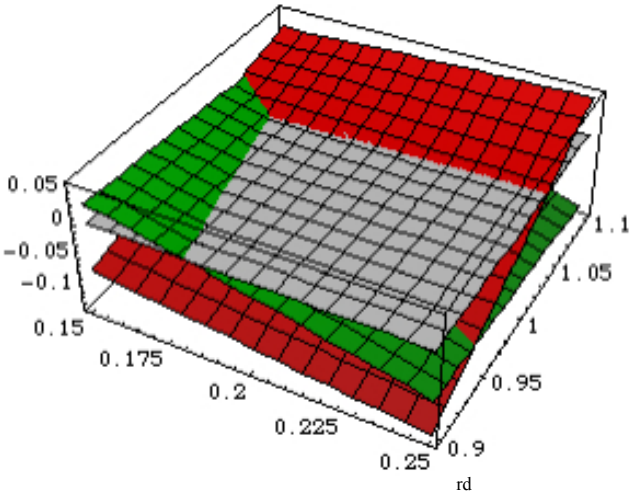

Fig 6. Découplage des contrôles de portance et traînée.

La surface rouge représente la portance résiduelle ; la verte la traînée. Valeurs exprimées en fraction de g (accélération de la pesanteur). La valeur du gauchissement appliquée durant la poussée (en abscisse) agit préférentiellement sur la traînée alors que le rapport entre les gauchissements agit exclusivement sur la portance.

L'oiseau se sustente non pas parce qu'il bat des ailes, mais parce que leur incidence moyenne (moyenne des incidences en poussée et relâchement ≈ valeur à l'emplanture, cf. fig 3) est celle qui assurerait le vol plané à la vitesse-air obtenue grâce à la force propulsive procurée par le gauchissement contrôlé.

Le petit couplage de ß sur la traînée traduit l'influence de la traînée induite [6] qui varie en sens inverse de μ^2 et en sens direct de $ß^2$. *Le gain en portance est 4 à 5 fois celui en*

traînée, ce qui implique qu'il faut particulièrement soigner le profilage des ailes, du fuselage et de l'empennage.

Le principe de base d'un contrôle moyen découplé en portance et traînée du gauchissement de l'aile est donc établi. Il est clair que le problème du vol battu se résume à la production d'une force propulsive suffisante.

On a d'abord envisagé un contrôle direct des angles de gauchissement. Une aile feuilletée a été construite, munie d'un petit servomécanisme rapide, spécialement durci, pour contrôler le gauchissement. Une mécanique de battement reproduisant le cycle symétrique de la simulation a été réalisée. L'angle de consigne du servomécanisme est asservi à la position angulaire des ailes. Malgré les précautions prises le moteur du servomécanisme, sur-sollicité, a subi une avarie irréparable après un peu plus d'une minute à une fréquence de battement de l'ordre de 5 Hz. Cette solution est donc plutôt à déconseiller.

Par ailleurs, on avait réalisé en parallèle un dispositif de mesure de la force aérodynamique subie par l'aile. Sa sensibilité et sa précision ont été vérifiées en soufflerie. Les commandes µ et -ßµ auraient ainsi pu être corrigées en temps réel en comparant les forces effectives avec celles attendues.

Cette voie s'avérant être une impasse technique, on a songé à mimer, très grossièrement, le système neuromusculaire des oiseaux : un contrôle de force et non pas de position angulaire. On a donc exhibé les forces exercées sur les leviers de commande de gauchissement pour un ensemble de doublets vitesse-air, période de battement (oiseau miniaturisé de masse 0,4 kg et d'envergure 0,7 m).

La figure 7 montre la faisabilité d'un tel contrôle, en rouge la somme des forces en poussée et relâchement, indépendante de T et V, en vert leur différence, dépendant de T et V.

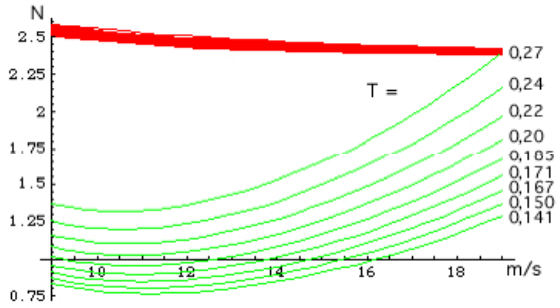

Fig 7. Forces exercées sur un levier de gauchissement.

Une traduction technique : relier chaque levier à deux ressorts de traction dont chacune des extrémités opposées est contrôlée par un servomécanisme. L'un des deux ressorts est toujours tendu, et réglé pour la force nécessaire en relâchement, avec une raideur telle que celle qu'il opposera en poussée soit inférieure à celle requise. Le complément est fourni par le second ressort dont l'action, intermittente, ne commence à s'exercer qu'au delà du point-mort haut lorsque la force aérodynamique dépasse celle correspondant au vol plané. La disposition des courbes montre clairement que le compromis paramétrique entre les deux ressorts ne peut être trouvé qu'en liant période du battement et vitesse-air.

Si l'on remplace les forces (ou moments) sur les leviers par leurs somme et différence, on retrouve pour un doublet {vitesse-air, période} donné le découplage des commandes de la figure 6 :

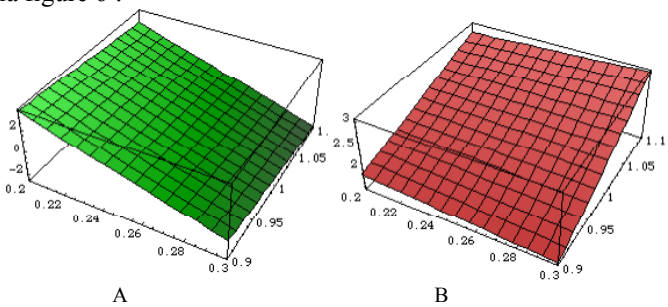

Fig 8. Découplage du contrôle en force.

La somme des forces (moments) sur les leviers de gauchissement en poussée et relâchement contrôle la portance (fig 8. B), et leur différence la traînée (fig 8. A).

V. Essais de l'oiseau artificiel.

Deux types d'essais ont été réalisés, l'un avec l'oiseau miniaturisé (envergure portée à 0,9 m, masse réelle : 0,5 kg) aux ailes feuilletées, l'autre avec un ornithoptère du marché (SlowHawk, SH1, aux ailes en toile de spi avec un large volet triangulaire articulé), modifié par l'adjonction du dispositif de contrôle de gauchissement à deux ressorts évoqué plus haut, seul celui de poussée étant commandé par servomécanisme.

Les charges alaires de ces deux engins sont respectivement de 40 et 20 g/dm^2.

Les vols sont radio commandés en consigne de tension du moteur, profondeur, direction, roulis et contrôle des servomécanismes de gauchissement. Le lancer est mené avec les réglages de gauchissement pour le vol plané, établis au laboratoire au moyen d'une balance ad hoc.

Lancé à la main l'oiseau n'a pu s'envoler. On a utilisé une catapulte conçue pour le lâcher à une vitesse d'environ 11 m/s. L'oiseau ne réussit ni à se sustenter, ni à prendre de la vitesse. On avait ainsi vérifié expérimentalement l'effet négatif de la force produite par l'inertie transversale de l'aile [1], qui contrecarre l'action des ressorts de contrôle du vrillage.

L'inertie de gauchissement a été compensée en fixant à hauteur de chaque saumon une potence portant un contre-poids en plomb de 2,5 g à 6 cm en avant du pivot. On a effectué 5 vols catapultés avec des réglages particuliers des contrôles du gauchissement (cf. table 1), jusqu'à la destruction d'une pièce du réducteur de la transmission.

L'analyse des vols a été menée à partir des prises de vue d'une caméra fixe placée dans l'axe du catapultage (fig 9).

Table 1 : Resume technique des 5 vols.

Vol N°	FP %	FI %	Fr Hz	durée	poussée/ relâchement	rpm max	rpm min
1	33	66	6,0	2,3 s	144 %	7 280	5 050
2	50	66	5,7	3,0 s	152 %	7 140	4 700
3	66	66	5,5	3,7 s	169 %	7 350	4 350
4	100	66	5,3	3,5 s	181 %	7 400	4 090
5	100	100	5,1	4,1 s	185 %	7 220	3 900

Ces vols ont apporté des enseignements importants, tant pour la conception de l'oiseau que pour le contrôle du vol battu. Le rapport de la transmission était trop faible pour que le moteur pût fournir la fréquence de battement nécessaire à la

compensation de la traînée du corps, non caréné, de l'oiseau.

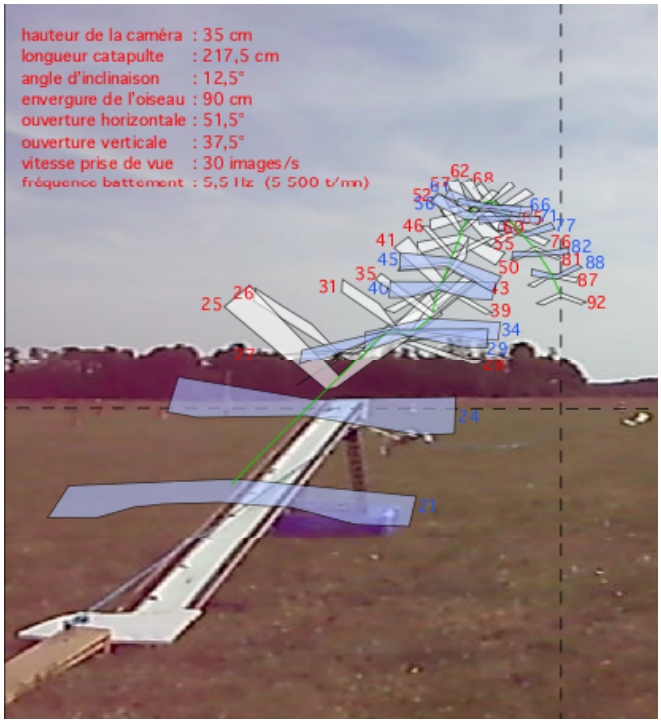

Fig 9. Vol catapulté N°3 de l'oiseau miniature

TABLE 2 : DEROULEMENT DU VOL N° 3

N° image	altitude Z m	distance Y m	vitesse Z m/s	vitesse Y m/s
21	0,23	2,98	-	-
24	0,47	3,70	2,40	7,2
29	0,84	5,51	2,22	10,9
34	1,07	7,53	1,38	12,1
45	1,80	10,0	1,99	6,8
56	2,65	12,6	2,32	7,1
61	2,98	13,9	1,98	7,8
66	3,24	15,3	1,56	8,4
71	3,36	16,6	0,72	7,8
77	3,28	17,8	-0,40	6,0
82	3,17	18,8	-0,66	6,0
88	3,0	20,1	-0,85	6,5
92	2,8	21	-1,5	6,7
134	0	30	-2,0	6,5

Le guide de gauchissement placé vers l'arrière de l'aile était trop souple et a fléchi dans sa partie médiane à chaque poussée (voir le bord de fuite sur l'image N° 21 de la fig. 9).

Jusqu'à la dernière partie du vol en perte de vitesse, l'aile a conservé une portance élevée durant les phases de relèvement, trop élevée puisque la traînée moyenne est restée négative. La table 2 résume avec une précision toute relative (résolution du film) le déroulement du vol.

La nécessité d'un contrôle automatique du gauchissement s'impose : l'expérience confirme que le pilote ne peut à la fois contrôler la trajectoire de l'engin et agir sur les commandes de gauchissement. Nous sommes en train d'explorer cette voie.

VI. ESSAIS COMPLÉMENTAIRES.

On a effectué de nombreux vols avec le SlowHawk (SH1) modifié. On y a embarqué une caméra miniature (30 images/s) dirigée vers le sol et un enregistreur (50 Hz) du courant délivré par la batterie.

On place sur le sol une dizaine de bandes-repères colorées (rouge et bleu) disposées en travers tous les dix mètres fig 10.). Le pilote, placé dans l'axe, effectue des passages rectilignes aller-retour au dessus de cet alignement. Une caméra portée filme l'engin de côté.

Fig 10. Bandes-repères filmées en vol (l'auteur en haut à droite)

L'espacement des bandes donne l'altitude. Le défilement cyclique indique la vitesse moyenne et l'oscillation de l'assiette durant le cycle de battement se déduit de celle de l'image, corrigée de la vitesse moyenne.

C'est ainsi qu'en dépit de l'instabilité en lacet de ce type d'engin, grâce à l'habileté du pilote, on a pu exploiter les données collectées. En premier lieu, il faut noter qu'alourdi de plus de 100 g par son instrumentation et son système de contrôle du gauchissement, le SH1 s'est avéré incapable de prendre son envol avec les ressorts des leviers détachés.

Ensuite, malgré le faible débattement, par construction, des volets et l'élasticité de la transmission du contrôle aux saumons des ailes, on a montré qu'en augmentant l'action des ressorts intermittents, c'est-à-dire la force de gauchissement en poussée, on pouvait maintenir la portance en réduisant fréquence et puissance du battement :

- 4,4 Hz et 60 W : version d'origine (540 g) ;
- 4,0 Hz et 62 W : version modifiée (645 g) avec contrôle en poussée minimum ;
- 3,55 Hz et 50 W : version modifiée avec contrôle en poussée maximum.

Bien que l'on n'ait pas pu obtenir un vol de type oiseau (portance restant positive en relâchement), à cause d'une structure d'aile intrinsèquement peu performante, le contrôle semi-actif du gauchissement a permis de vérifier la relation entre portance et commande. La puissance spécifique de 110 W/kg du SH1 d'origine a été ramené à 96 W/kg *(-13%)* avec le seul ressort permanent et à 78 W/kg *(-29%)* avec le contrôle intermittent réglé au maximum.

Malgré leur portée très partielle, les essais de l'oiseau catapultée et du SH1 modifié ont prouvé l'influence déterminante d'un contrôle semi-actif des forces aérodynamiques sur l'efficacité du vol battu, via le contrôle du gauchissement.

VII. Le contrôle du cycle de battement.

Les valeurs min et max des vitesses de rotation du moteur de l'oiseau (Table 1) montrent qu'un simple asservissement de tension ne suffit pas à réguler le cycle de battement : la charge du moteur électrique varie dans de trop grandes proportions.

Deux solutions sont envisageables.

La plus simple sur le plan mécanique consisterait à contrôler la trajectoire angulaire de l'arbre de sortie d'un système manivelle-bielles. Il faudrait alors asservir l'angle de la manivelle au cycle de battement d'un oiseau (cf. fig 2).

La plus simple sur le plan du contrôle consiste à générer une cinématique de battement qui reproduirait celle d'un oiseau si l'arbre de sortie conservait une vitesse constante, et d'utiliser des informations du système de contrôle du gauchissement pour asservir les vitesses angulaires en poussée et relâchement. C'est la solution retenue : une transmission dérivée de celle du moteur Nègre [5], qui permet de stocker l'énergie du relâchement sans surcharger les appuis du battement, associée à une avionique embarquée complète µNAV 100 de la société Crossbow, dont le firmware est modifié pour inclure le contrôle du vol battu. Un enregistreur série stocke toutes les données du vol.

La routine spécifique au contrôle du vol battu se déduit des propriétés mises en évidence avec le modèle. On exploite les mesures des accélérations en x et z pour déterminer les sept données cycliques suivantes :

- intégrale périodique des valeurs positives de Accz - g ;
- intégrale périodique des valeurs négatives de Accz - g ;
- interpolation temporelle aux changements du signe ;
- idem pour Accx ;
- comparaison du ratio T:Accz - g > 0 / T:AccZ - g < 0 avec celui à réaliser (cf. fig 5).

Ces informations donnent le bilan cyclique des accélérations en x et z, entrées des boucles PI de contrôle des servomécanismes de gauchissement. Le principe de contrôle du moteur de battement est le suivant : la période de référence se déduit de la consigne de haut niveau (radio-commande ou signal déduit de la valeur de la vitesse-air fournie par l'anémomètre) du variateur appliquée durant la phase de poussée (Accz – g > 0) ; cette consigne est modifiée progressivement par un PI durant les phases de relâchement pour tendre vers le rapport cyclique du vol battu de référence.

Pour les faibles valeurs de la puissance de consigne (passage au vol plané, préparation de l'atterrissage), la consigne fournie au variateur est celle envoyée par la radio commande ; idem pour les valeurs élevées (demande de puissance impérative pour l'envol) ; les valeurs intermédiaires sont considérées comme des consignes de vitesse-air (et donc d'assiette). Le gain de cette boucle est choisi pour que le temps caractéristique de ce contrôle soit sensiblement supérieur à celui du gauchissement. Cette structure de commande est sensée être tolérante aux erreurs de modèle. Le pilote « voit » alors l'oiseau comme un avion radio commandé en 2 (profondeur, direction) ou 3 (+ roulis) axes. Des aides à la stabilisation en roulis, tangage et, surtout, en lacet sont placées entre sorties PPM du µNAV 100 et servomécanismes des ressorts permanents de gauchissement et ceux de profondeur et direction.

Le schéma ci-dessous fig 11 résume la structure du contrôle.

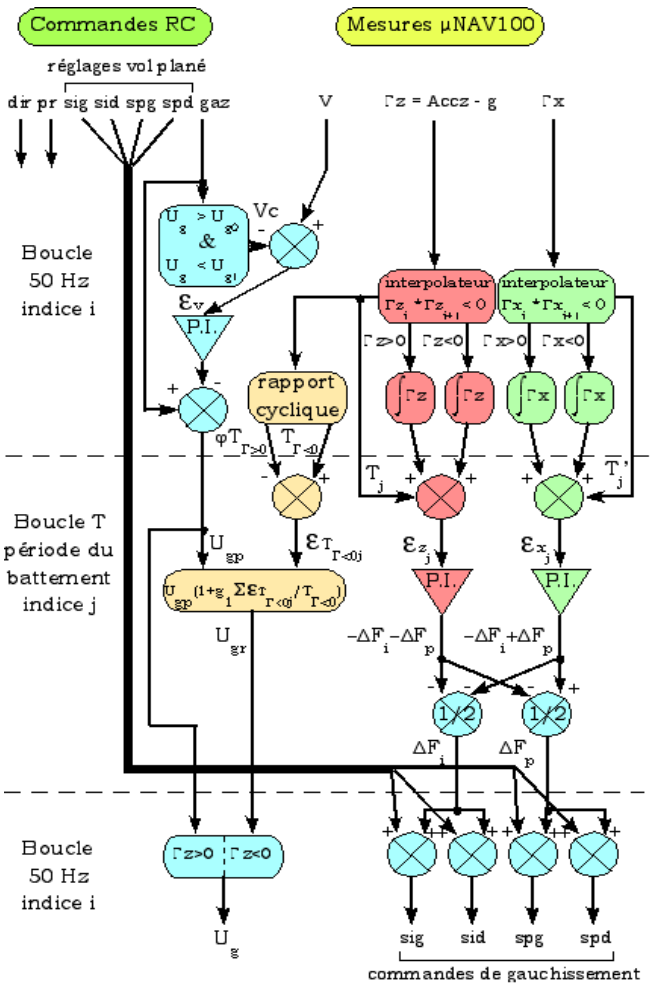

Fig 11. Structure de l'algorithme de commande.

VII. Conclusion.

Le développement du projet d'oiseau artificiel entre dans la phase cruciale d'intégration de toute l'expérience acquise durant ces dernières années dans un engin d'envergure suffisante (1,6 m). L'objectif — une assistance au pilotage — représente la première étape du contrôle automatique d'un oiseau artificiel. Un bouclage de haut niveau permettrait de s'affranchir du pilotage par radio commande. On n'y parviendra qu'après avoir mené à terme un important travail de modélisation et une recherche appropriée sur la commande de ce type particulier de drone.

References.

[1] J. D. DeLaurier, *An Ornithopter Wing Design*, Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol. 40, N° 1, March 1994, pp. 9-18.

[2] M. F. Neef, *Analyse des Schlagfluges durch numerische Strömungsberechnung*, Zentrum für Luft- und Raumfahrtechnik, Technische Universität Braunschweig, August 2002.

[3] T.Nick Pornsin-siriak & all., *Mems Wing Technology for a Battery-Powered Ornithopter*, The 13th IEEE Annual International Conference on MEMS, Miyazaki, Japan, January 23-27, 2000, pp. 709-804.

[4] H. Räbiger, *Die Entwicklung der EV-Schlagflügmodelle*, Nürnberg 2002.

[5] G.Nègre, *Moteur à chambre active mono et/ou bi énergie à air comprimé et/ou énergie additionnelle et son cycle thermodynamique*, brevet WO 2005/049968 A1, 2 juin 2005.

[6] S. Childress, *Mechanics of swimming and flying*, Cambridge Studies in Mathematical Biology, Cambridge University Press, 1981.

[7] J.Y.Andro, *Aérodynamique d'un profil d'aile battante à bas nombre de Reynolds*, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, Université de Poitiers, thèse de doctorat, décembre 2008.