

Etude système d'un Micro-Drone à voilure fixe.

Manuel José Reyes Guitián, Jean-Marc Moschetta

Résumé— L'article porte sur la démarche de conception d'un micro-drone à voilure fixe de moins de 30 cm d'envergure basé sur une propulsion électrique. L'approche développée met l'accent sur la forte interaction entre les divers sous-ensembles et leur discipline associée (aérodynamique, propulsion, électronique, dynamique du vol)

I. INTRODUCTION

LE concept de micro-drone à voilure fixe et propulsion électrique rend possible la réalisation d'une mission de transmission d'images avec une bonne fiabilité. Par rapport à la propulsion thermique, le moteur électrique est flexible en régime et possède une très bonne sûreté de fonctionnement. Par rapport aux micro-drones à capacité de vol stationnaire, le concept de voilure fixe permet dans un premier temps de réaliser une mission d'observation avec une autonomie et un rayon d'action relativement satisfaisants. Le développement d'un tel micro-drone passe non seulement par l'optimisation de chacun de ses éléments, mais surtout de l'ensemble pris comme un tout. Cette démarche système est un impératif, que l'on a essayé de mettre en œuvre dans le cadre des études menées à SUPAERO sur le thème du micro-drone.

II. L'OBJECTIF

L'objectif de ces études était double. D'une part réaliser des prototypes en vue de participer *Trophée Micro-Drones 2002* et, d'autre part, de tester et de valider les concepts retenus. Le résultat le plus important a été le développement des compétences et des techniques autour des engins volants de petite taille, générant ainsi un savoir-faire au sein de l'Ecole.

III. LA DEMARCHE

Différentes études ont été menées dans chaque technique de l'ingénieur avec pour objectif de proposer toute une plage d'options pour les vecteurs et d'enrichir ainsi la connaissance de chaque élément.

La plus part de ces travaux ont profité de la collaboration des élèves de SUPAERO, au sein de projets d'initiation à la recherche (PIR), stages DEA, projets de fin d'études, activités péri-scolaires.

A. Aérodynamique

A cause de sa très petite taille (20 cm) et de sa faible vitesse d'évolution (10 m/s), le nombre de Reynolds associé

au vol d'un micro-drone est relativement faible (de l'ordre de 150000). En outre, l'utilisation de voilures d'allongement de l'ordre de l'unité conduit à accroître le caractère tridimensionnel des écoulements. Ainsi, en cumulant les difficultés du régime des faibles Reynolds avec celles des faibles allongements, l'approche expérimentale a été privilégiée d'un point de vue de l'étude aérodynamique.

Les différents paramètres qui déterminent la performance aérodynamique de l'aile ont été étudiés dans les souffleries basse vitesse de SUPAERO : épaisseur, forme en plan, cambrure, allongement, dièdre et présence de winglets.

- 1) *Epaisseur* : des études précédentes ont montré la supériorité aérodynamique des profils minces à faible nombre de Reynolds, tendance confirmée par les essais en soufflerie.
- 2) *Forme en plan* : Partant de la surface alaire maximale correspondant au disque, plusieurs formes en plan ont été testées :

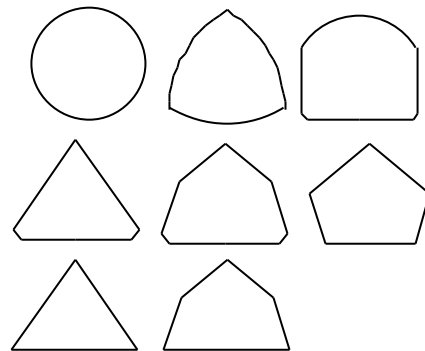


Fig. 1 Formes en plan

Dans tous les cas, on peut constater l'apparition d'une portance tourbillonnaire mise en évidence par le changement de pente de la courbe de portance en fonction de l'incidence :

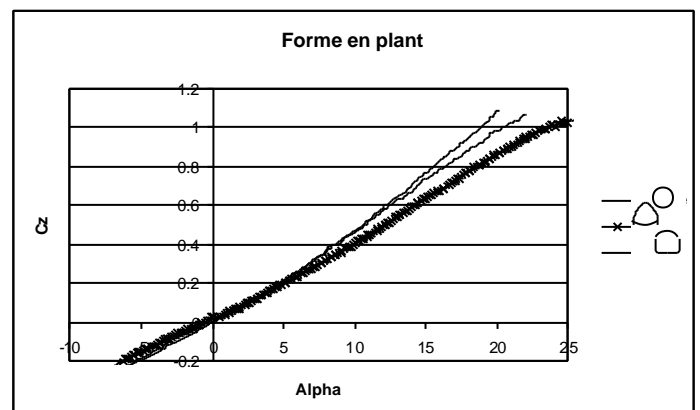


Fig. 2 Courbes de portance en fonction de l'incidence pour différentes formes en plan

Comme exemple des performances de ces ailes, on peut constater sur les courbes de finesse-Cz (Fig. 3) la difficulté d'obtenir une finesse élevée avec des allongements relativement faibles.

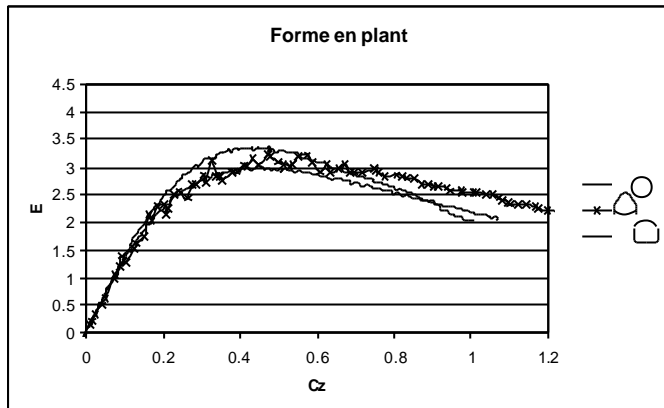


Fig. 3. Finesse en fonction du Cz pour différentes formes en plan

3) *Cambrure* : On note l'amélioration de l'efficacité avec la cambrure de l'aile (dans le sens longitudinal), mais aussi l'apparition d'un moment piqueur associé. Or, si l'on envisage la conception d'un drone sans empennage par souci de compacité et de traînée, on a besoin d'utiliser des ailes qui puissent être équilibrées au point de vol nominal, d'où l'apparition d'ailes à double cambrure.

L'influence de la cambrure peut être illustrée sur la figure 4, où l'on constate que la finesse maximale se déplace vers des Cz plus élevés quand on augmente la cambrure relative.

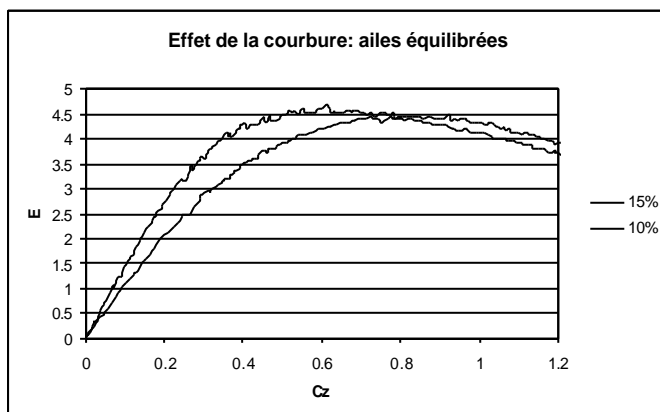


Fig. 4 Finesse en fonction de Cz pour différentes cambrures relatives

4) *Allongement* : Les courbes tracées sur les figures 5 et 6 montrent plusieurs effets par augmentation de l'allongement :

- Augmentation de la pente de la courbe de portance.
- Augmentation de la finesse maximale.
- Décrochage à des Cz moins élevés.

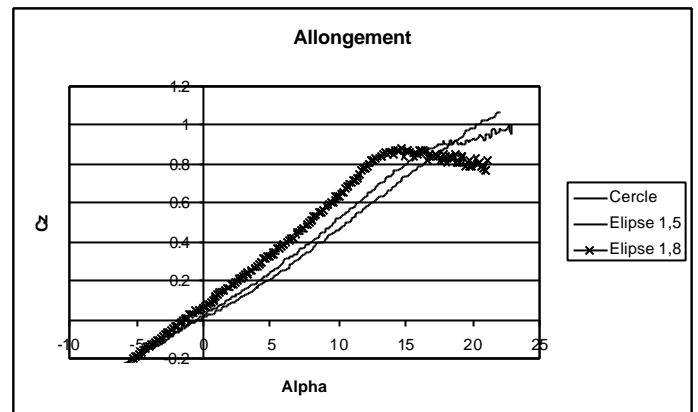


Fig. 5 Influence de l'allongement sur la pente de la courbe de portance et le décrochage

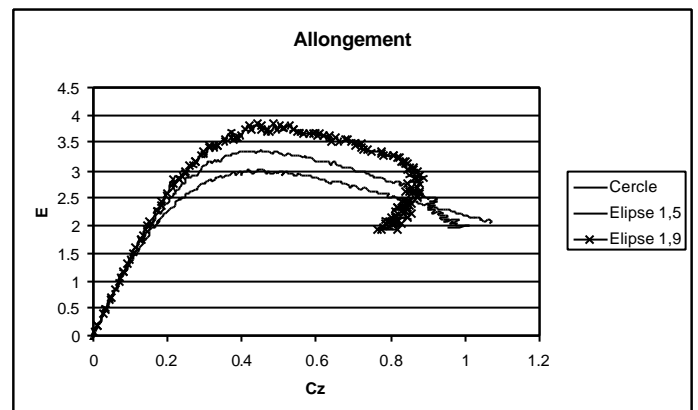


Fig. 6 Influence de l'allongement sur la finesse

5) *Dièdre* : L'effet du dièdre, positif et négatif, dans la performance aérodynamique agit dans le même sens que l'augmentation de la cambrure, mais de manière moins prononcée. La stabilité latérale de l'engin détermine ici son utilisation.

6) *Présence de winglets* : Différentes tailles de winglets, voire de dérives, dans différentes positions et calages ont été essayés en soufflerie. Comme première conclusion, on peut souligner l'absence d'effet significatif sur la performance aérodynamique longitudinale. Une étude plus détaillée est nécessaire.

B. Propulsion

1) Ensemble moteur-hélice :

L'optimisation de l'ensemble moteur(réducteur)-hélice est cruciale pour la viabilité d'un micro-drone. Pour cela, les caractéristiques et performances de chaque élément ont été déterminées grâce à un mini-banc mesurant poussée, couple, vitesse de rotation, intensité et voltage. L'utilisation de ce banc permet de déduire les courbes rendement-vitesse, vitesse-couple et couple-intensité, caractéristiques des moteurs, ainsi que les courbes rendement-rapport vitesse de rotation vitesse d'avancement (VR/VA) et couple-VR/VA pour les hélices.

De cette façon on obtient différents ensembles adaptés entre eux et à la vitesse de vol du drone, estimée entre 6 et 10 m/s.

Particulièrement intéressantes sont les courbes montrant la poussée de l'hélice avec l'intensité demandée aux batteries, pour différentes vitesses d'avancement et plusieurs diamètres d'hélice. La Figure 7 montre ces courbes pour une hélice de 9 cm de diamètre.

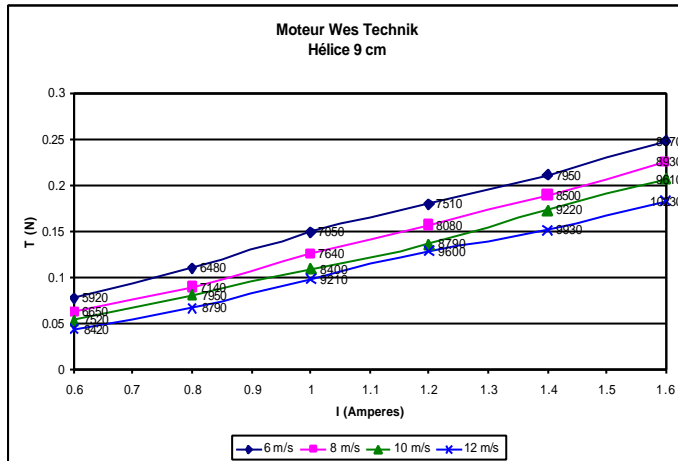


Fig. 7 Poussée en fonction de l'intensité fournie par les batteries

2) Batteries :

Il s'agit d'un poste important dans le devis de masse d'un micro-drone à propulsion électrique et c'est aussi l'élément qui a évolué le plus rapidement au cours de l'année écoulée. On a testé trois chimies différentes : Ni-Cd, Ni-MH et Lithium-Ion.

Les premières ont un voltage caractéristique de 1.2 volts. L'avantage est qu'elles sont robustes, bien connues et permettent une grande souplesse d'utilisation bien au-delà des spécifications constructeur, autant en décharge que pendant la charge.

Les Ni-MH ont des caractéristiques semblables, avec une plus grande énergie spécifique (Wh/kg) que les Ni-Cd. En revanche, elles sont aussi moins robustes.

Les batteries Lithium-Ion sont les plus récentes et continuent d'évoluer. Les modèles utilisés actuellement permettent de délivrer une tension supérieure à 3V sous 1A pendant quelques minutes et ce, pour un poids de 7,5 grammes seulement.

Le principal avantage de cette chimie est son voltage caractéristique, 4.2 volts. Pour la même capacité elles ont le même poids que les NiCd et donc, on se retrouve avec plus de trois fois la puissance spécifique.

Leur problème était initialement leur faible capacité de décharge. Or, des tests de ces batteries ont été effectués à 7C (courant de décharge égale à sept fois sa capacité) sans préjuger toutefois du nombre de cycles charge-décharge

disponibles. Par exemple, la figure 8 montre la courbe de décharge des batteries à 180 mAh et 7.5 grammes :

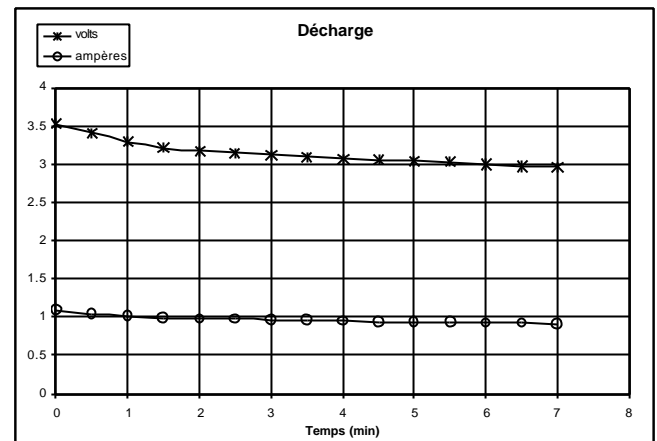


Fig 8 Courbe de décharge. Capacité nominale 180 mAh

Chaque élément inclut normalement un composant électronique qui limite le taux de décharge et qui les protège contre une inversion de voltage. Leur charge se fait à travers une alimentation stabilisée.

3) Optimisation de l'ensemble Moteur-Hélice-Batteries

Un logiciel de conception avion a été développé sous Matlab pour aider à choisir le meilleur ensemble moteur-batterie. Une image de sa fenêtre principale peut être trouvée à la fin de cet article.

Le logiciel, partant d'une base de données de moteurs, hélices et ailes, essaie toutes les combinaisons possibles pour réaliser le vol en palier à la vitesse correspondant à la puissance minimale, puis les range par poids total résultant.

C. Mécanique du vol

La mécanique du vol a été présente pendant toute la démarche de conception en permettant de préciser les paramètres de vol comme la vitesse du vol (voisine de la vitesse de puissance minimale) les caractéristiques de l'aile nécessaires du point de vue des moments, ainsi que la taille et la position des dérives.

Les coefficients aérodynamiques des prototypes ont été mesurés en soufflerie pour assurer la stabilité longitudinale et latérale, avec le moteur en route pour tenir compte de l'effet du souffle de l'hélice. On trouve une grande influence sur C_{N_B} .

Ces coefficients ont ensuite servi de données aérodynamiques pour le simulateur développé à l'Ecole par C. Colongo du Centre Aéronautique et Spatial. Ce simulateur de vol, développé sous *Visual Basic* et *Open GL*, est interfacé à l'utilisateur avec une radio-commande classique permettant de s'exercer au pilotage du micro-drone et, à terme, de réaliser les lois de commande du pilote automatique.

1) Un concept « pendulaire »

La configuration d'un des 2 prototypes réalisés a été déterminée en essayant de profiter de l'effet de pouvoir placer le centre de gravité du drone en dessous l'aile, à une distance comparable à sa taille maximale.

Ce choix a entraîné deux conséquences. D'une part, la traînée et la poussée donnent un couple qui s'oppose au moment piqueur d'une aile à simple cambrure(Figure 9) :

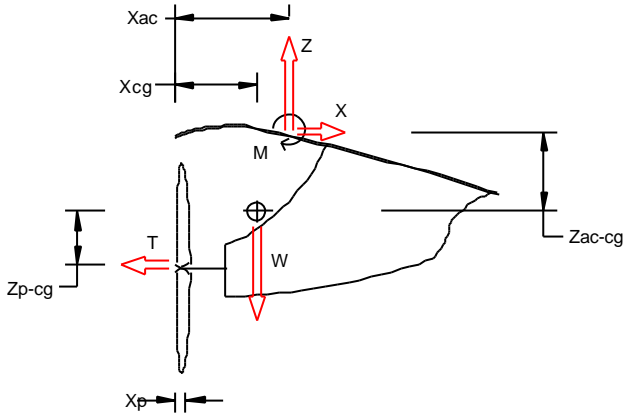


Fig. 9 Diagramme de forces sur un micro-drone pendulaire

D'autre part, la courbe du couple par rapport au centre de gravité en fonction de Cz n'est plus une droite. En fait si l'aile satisfait la condition :

$$\frac{1}{C_{Z\alpha}} > k$$

Où k est le coefficient de la polaire d'aile (avec $C_x = C_{x_0} + k.C_z^2$), cette courbe devient concave et donc C_{m_a} augmente en valeur absolue (Figure 10).

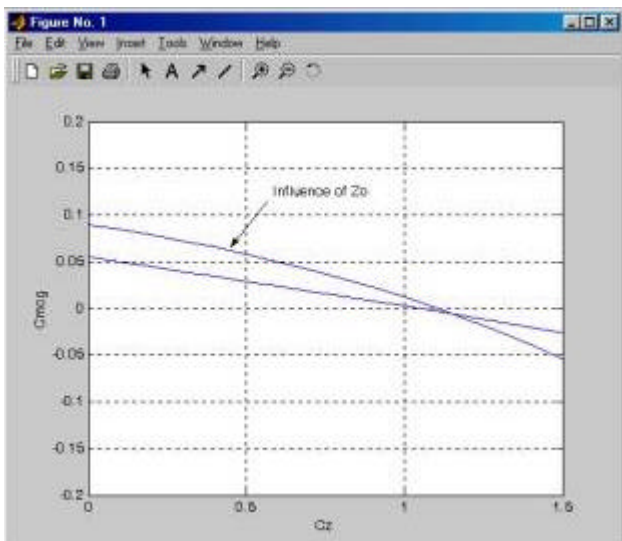


Fig. 10 Influence de la distance verticale entre le centre de gravité et l'aile sur la courbe de moments autour du CG

Une application extrême de cet principe peut fournir une configuration qui soit instable à des Cz très bas mais qui sera stable dans une plage de Cz proches du Cz de vol :

2) Choix de l'aile

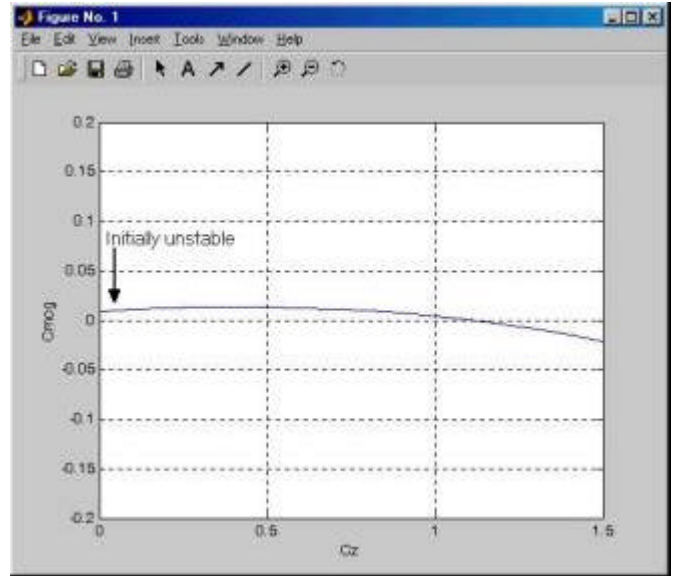


Fig. 11 Application extrême du principe pendulaire

Comme nous l'avons vu, l'allongement améliore la finesse aérodynamique, mais pour un encombrement donné, la surface alaire est réduite et donc le Cz de vol est augmenté, et avec lui le Cx. Cependant, la réduction de surface dans le sens de la corde entraîne une diminution de la traînée totale pour une force de portance et un encombrement donnés. On peut voir cet effet sur la figure 12 qui donne la traînée aérodynamique exprimée en grammes en fonction de la force de portance pour différentes ailes de même encombrement (26 cm)

On constate que pour un encombrement fixé (ici l'envergure), il est intéressant de diminuer la corde pour bénéficier de la diminution de la traînée induite par augmentation de l'allongement.

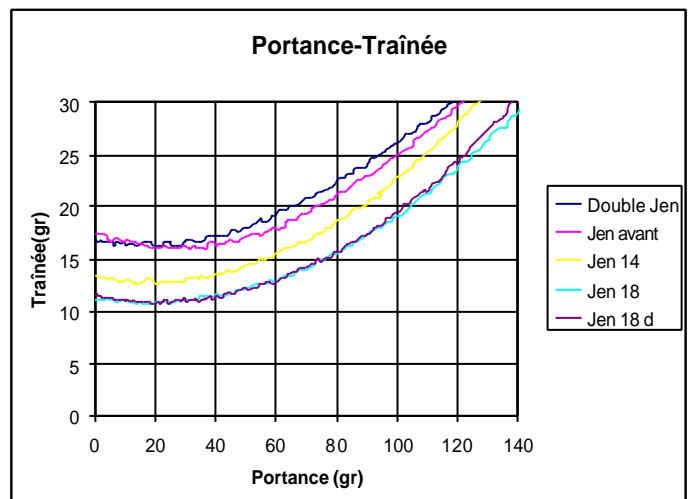


Fig. 12 Traînée en fonction de la portance pour ailes d'allongement variant entre 1 et 1.8

En fait, pour chaque poids, on peut voir que si l'on change l'encombrement, l'allure de ces courbes change. En particulier, la traînée, donc la poussée à fournir change. Il existe donc un encombrement optimal, qui minimise la poussée nécessaire.

Au total, nous avons retenu pour un micro-drone d'un poids de 80 grammes, une aile avec d'allongement de 1.8 et un encombrement de 25 cm, avec double courbure de 5 %.

IV. LES PROTOTYPES

Le résultat de ces études sont deux vecteurs qui répondent à deux concepts différents :

A. Aile volante : le Plaster

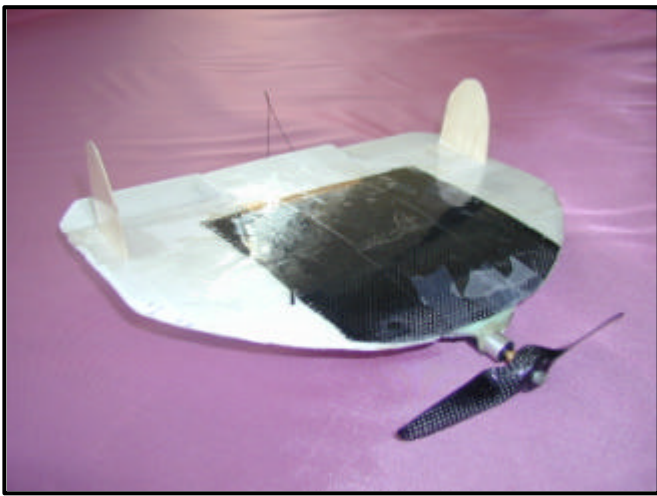


Fig. 13 Prototype aile volante

Il s'agit de l'aile mentionnée, renforcée avec une plaque de carbone qui lui donne sa forme. Le contrôle en tangage et en roulis est assuré par deux ailerons, et la stabilité latérale est obtenue à l'aide de 2 dérives fixes.

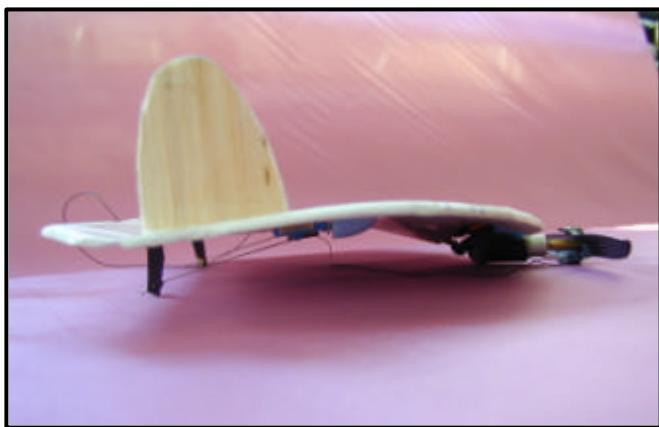


Fig. 14 Aile avec un profil mince

Le micro- moteur utilisé est un moteur électrique *coreless* de 12 grammes, équipé d'un réducteur 4:1, alimenté par 2 éléments de batteries de 7.5 grammes. Le poids total de

l'engin est de 63 grammes. On note sur la figure 15 que l'ensemble propulsif : moteur-batteries-hélice-variateur constitue près des deux tiers du poids total de l'engin.

Bilan masse :

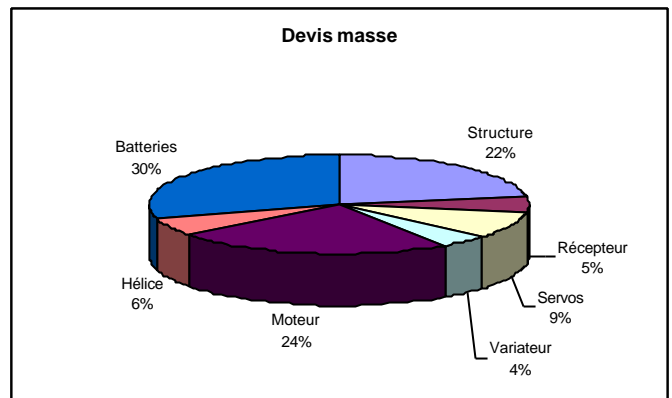


Fig.15 Bilan masse du concept aile volante

B. Concept « pendulaire » : le Penter

Ce prototype a été conçu pour tester l'effet de positionnement du centre de gravité en-dessous de l'aile.

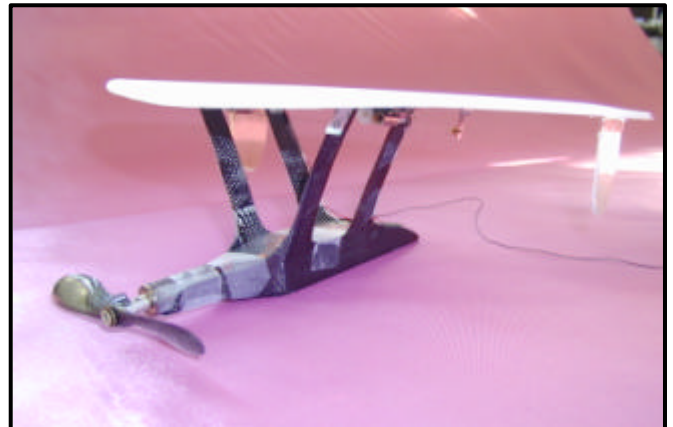


Fig. 16 Penter, application du concept pendulaire

Pour ce prototype, le moteur a un poids de 17 grammes et il travaille en prise directe. Les batteries Lithium-Ion à 450 mAh ont un poids total de 33 grammes, lui donnant une grande autonomie.

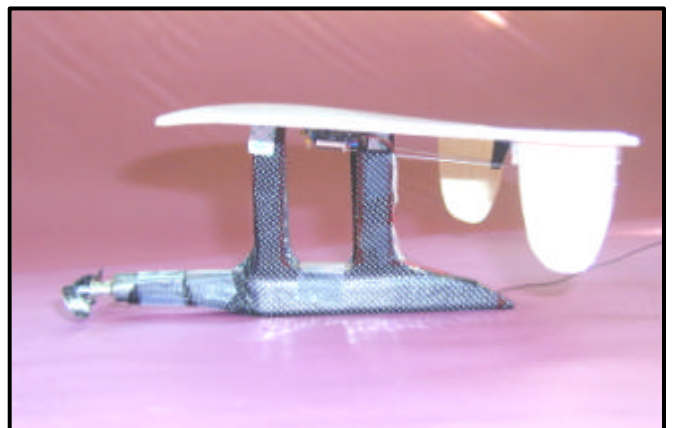


Fig. 17 Vue latérale

Le poids total de l'engin est de 82 grammes. On note que la part de l'ensemble propulsif s'élève maintenant à près des trois quarts du poids total de l'engin (Figure 18)

Bilan masse :

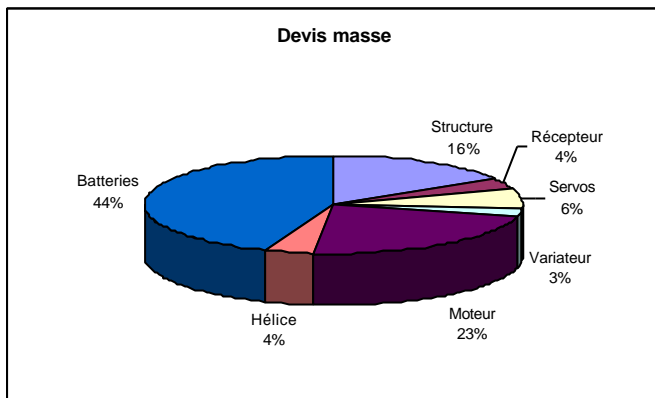
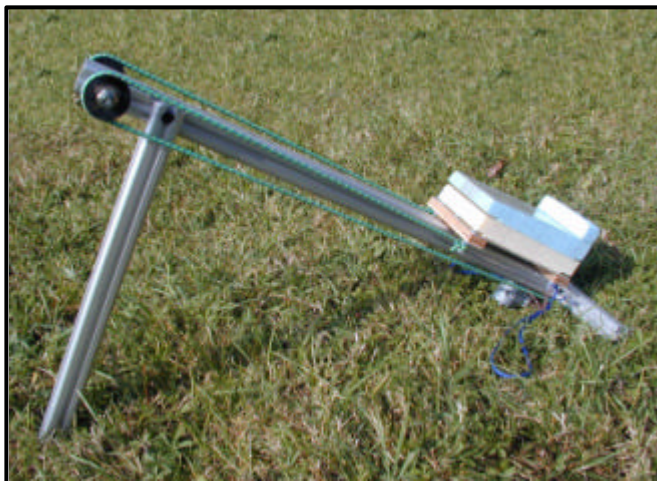


Fig. 18 Bilan masse du micro-drone Penter

Les deux prototypes utilisent des servos de 2.4 grammes, un récepteur haute-fréquence de 2.3 grammes avec une portée de 150 m et des variateurs adaptés à chaque moteur.

C. Essais en vol

La mise au point des prototypes nécessite des essais en vol. Pour cela nous avons trouvé très utile, voire indispensable, l'utilisation d'une catapulte (Figure 19) Elle permet de gagner de l'altitude, de placer le micro-drone à vitesse de vol du départ, ainsi que d'effectuer des lancements répétitifs. Cela permet d'identifier les points à améliorer et de faire évoluer les prototypes.



V. CONCLUSION

Des études ont été menées à SUPAERO pour développer les compétences et le savoir-faire nécessaire à la réalisation de micro-drones à voilure fixe.

Le résultat de ces études s'est concrétisé par la réalisation de deux plate-formes ayant un encombrement inférieur à 25 cm.

Les études actuelles portent sur l'optimisation et la mise au point des deux prototypes au moyen d'une campagne d'essais en vol. Un ensemble micro-caméra CMOS avec émetteur haute-fréquence analogique (2.4 GHz) de 10 grammes sera ensuite monté sur les prototypes pour réaliser des vols d'observation.

Ayant pour objectif le vol autonome d'un micro drone, les efforts de développement vont se poursuivre sur les thèmes suivants :

- Diminution de la taille et du poids du drone.
- Amélioration de ses qualités de vol.
- Diminution de la sensibilité aux rafales.
- Amélioration de la qualité de l'image transmise.
- Développement de l'électronique embarquée, soit récepteur-variateur, soit la stabilisation dans un axe, soit le calculateur embarqué.
- Développement d'une plate-forme adapté à chacune des charges utiles précédentes.
- Vol autonome.

Figure : Fenêtre principale du logiciel d'optimisation.

