

Réduction du poids : une approche modéliste

Piednoir Jean-Marie, ECP, JMP Solutions
Martin Jean-Yves, ENSEA Pontoise, Eurofeedback
Jumelin Gérard, Professeur d'arts plastiques

Résumé— Le présent article décrit les techniques relativement simples utilisées par l'équipe JMP (Jumelin, Martin, Piednoir) pour réaliser le modèle d'avion ultra-léger à propulsion électrique, radiocommandé "Moins que Rien", pesant moins de 9 grammes, capable de décoller, d'effectuer un parcours prévu à l'avance et d'atterrir de façon normale. Les méthodes décrites s'appliquent à la cellule, la motorisation, les actionneurs de gouverne, l'électronique embarquée et la source d'énergie.

I. INTRODUCTION

LE "Moins que Rien" (fig.1)(fig.2) est né d'une part d'un rêve, faire voler un modèle "dans la salle à manger", et d'autre part, de l'esprit de compétition que titillait depuis un certain temps les réalisations modélistes ultra-légères de Rick Ruijsink. Le travail en équipe a permis de d'aboutir à un record de légèreté pour un avion radiocommandé disposant des commandes de direction, de profondeur et de gaz, ainsi que d'un train d'atterrissage (et de décollage) fonctionnel, avec la capacité d'effectuer normalement et de répéter à la demande au cours d'un même vol les manœuvres suivantes : décollage autonome du sol, montée et vol soutenu hors de l'effet de sol, huit horizontal, atterrissage au point prévu.



fig.1

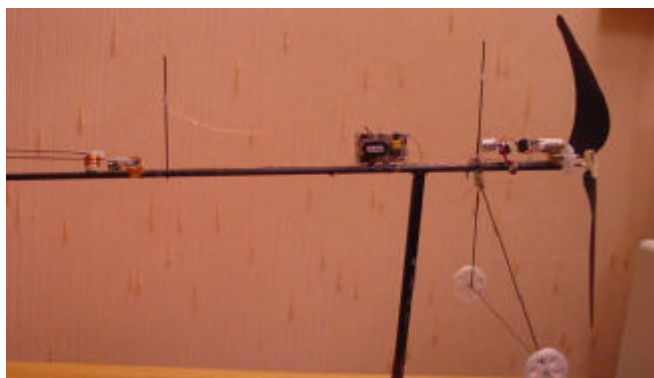


fig.2

II. LES TECHNIQUES EMPLOYEES

A. La cellule

Bien que les modèles réduits les plus légers (catégories Indoor de vol libre, microfilm) n'y fassent pas ou que partiellement appel, la cellule du "Moins que Rien" est construite quasi-exclusivement en matériaux synthétiques, principalement la fibre de carbone pour la structure et le mylar pour l'entoilage. Les surfaces portantes sont entoillées sur une seule face et ont donc un profil d'épaisseur pratiquement nulle. La feuille de mylar utilisée pèse 2g/m². Le poids total de l'entoilage est d'environ 0,2 g. Le fuselage est tiré d'un tube de carbone conique primitivement partie d'une canne à pêche. Le tube voit "bien entendu" son épaisseur fortement réduite par ponçage. La section de tube est choisie telle que le diamètre intérieur à l'avant accueille en emboîtement légèrement à force les roulements de 3x1x1 recevant l'arbre d'hélice (jonc de carbone de 1mm.). La structure de l'aile comporte un bord d'attaque, un bord de fuite et un bord marginal en jonc de carbone, les nervures étant moulées en forme à partir de fibres de carbone. Le bord d'attaque et le bord de fuite ont été poncés pour obtenir une section décroissante le long de l'envergure. Le jonc de carbone de diamètre 0,7mm est réduit à 0,4mm à l'extrémité. La mise en forme est effectuée facilement de la manière suivante :

Le jonc est pris dans le mors d'une perceuse électrique tournant à faible vitesse. Il est pincé entre les doigts à 3 cm du mors avec un morceau de papier abrasif fin, qui est tiré à vitesse constante jusqu'à l'extrémité du jonc. La même opération est répétée en partant à 6 cm du mors, puis 9 cm, etc... Un cône régulier est ainsi obtenu à peu de frais.

L'aile assemblée est emboîtée sur deux tiges verticales et maintenue en place par des haubans en V accrochés au fuselage. Ces haubans assurent également la rigidité en torsion de l'aile, et un réglage éventuel du vrillage de chaque demi-aile est possible par déplacement avant/arrière du point d'accrochage. Les haubans sont faits d'un brin tiré d'un fil de pêche "Spiderwire" comportant plusieurs brins tressés. Ce fil a une résistance au moins égale au Kevlar et est plus facile à manipuler.

Le même fil "Spiderwire" est utilisé pour maintenir en forme, à la manière d'un arc, le jonc de carbone courbé formant le bord d'attaque des empennages en V, et sert également de ligne de charnière pour les volets de commande.

Le train d'atterrissage est en jonc de carbone et les roues en Depron ajouré tournent sur un axe en fine corde à piano ligaturé sur le jonc.

B. La motorisation

L'expérience d'un précédent modèle de 28 grammes (Magicien d'Oz) avait montré que parmi les moteurs de vibreur de téléphone portable, on pouvait en trouver d'un rendement raisonnable (jusqu'à 48%). On a utilisé ici un moteur à rotor sans fer (coreless) de diamètre 4 mm, équipé d'un réducteur de rapport 22 à 1, à deux étages. L'arbre de sortie en jonc de carbone de 1 mm. tourne sur deux roulements à billes collés dans le tube de carbone tenant lieu de fuselage. Les pignons en nylon du réducteur sont issus d'un servomoteur de radiocommande miniature et allégés par perçage. L'ensemble motoréducteur (fig.3) pèse 0,98 g seulement. L'hélice à pas constant est en tissu de carbone imprégné d'époxy et présente la particularité que les pales sont moulées sur un cylindre avec une forme calculée pour respecter une répartition correcte du pas et une distribution des cordes propice à un bon rendement aérodynamique (fig.4). La fabrication d'une telle hélice a été décrite dans la presse modéliste française [1]. Sous 5V, le moteur consomme environ 180 mA et entraîne l'hélice à 1200 t/mn (régime moteur : 26 000 t/mn). Avec un rendement moteur de l'ordre de 20%, la puissance maximale délivrée à l'hélice est d'environ 180 mW. Toute tentative d'élever la tension au dessus de 5V se traduit par la destruction rapide du moteur, sa tension nominale étant de seulement 1,3V.



fig.3



fig.4

C. Les actionneurs

Les actionneurs utilisés sont une version réduite des actionneurs magnétiques perfectionnés par Rick Ruijsink, et sont basés sur le principe du galvanomètre.

Ils se composent d'un aimant pouvant pivoter dans le champ d'une bobine parcourue par un courant d'intensité et de sens variables. Ils fournissent un couple proportionnel au courant moyen, et non une position comme les servomoteurs de radiocommande habituels. Ils sont disposés l'un par rapport à l'autre à une distance et un angle tels que le couplage magnétique des aimants produise pour chacun un couple de rappel au neutre (fig.5). A l'usage, le pilotage ne fait pas apparaître de particularité notable. La réponse aux ordres paraît complètement normale à tout pilote d'avion radiocommandé classique. De plus ceci correspond au

mode de commande des avions légers grandeur, qui se fait comme une motocyclette, par application d'une force et non par imposition d'une position à l'organe de commande.

Chaque actionneur pèse 0,3 g avec le microcontrôleur associé. Le courant maximal nécessaire à son fonctionnement est de 8 à 9 mA. Le couple délivré est de l'ordre de 3.10^{-5} N.m (0,3 g.cm), ce qui convient tout juste au "Moins que Rien", dont la vitesse de vol mesurée est de 1,2 m/s au régime de vitesse de chute minimale.

A noter qu'à une vitesse de 2 m/s, correspondant au vol horizontal à plein gaz, le couple des actionneurs devient insuffisant, l'avion partant en descente progressivement accentuée, le moment piqueur du profil creux de l'aile ne pouvant plus être équilibré. Dans ce cas, le contrôle ne peut être rétabli que par une réduction franche de la puissance du moteur.

Ce comportement est jugé positif par l'équipe de conception, en ceci qu'il montre que le groupe moteur est un peu surabondant, et que les actionneurs sont effectivement dimensionnés au plus juste, donc à l'optimum du point de vue du poids.

La fabrication des actionneurs reste dans les capacités d'un modéliste soigneux et capable de manipuler et bobiner le millier de tours de fil de cuivre émaillé de diamètre 0,04 mm nécessaire.

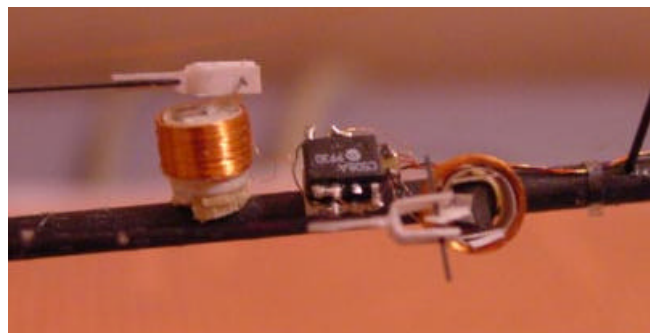


fig.5

D. L'électronique embarquée

L'électronique embarquée tire parti des remarquables capacités des microcontrôleurs RISC de la famille Microchip PIC 12CXXX. (série en boîtier N - SOIC .225in. à 8 broches, avec horloge interne)

Le modèle utilise au total quatre PIC 12C508A, répartis comme suit :

1. Récepteur :

12C508A servant de décodeur à cinq voies, dont trois sont effectivement utilisées. Le récepteur proprement dit, version allégée d'un récepteur JMP disponible commercialement, fonctionne dans la bande modéliste des 41 Mhz avec un émetteur standard du commerce. C'est un superhétérodyne à simple conversion de fréquence construit selon un schéma éprouvé autour d'un circuit MC3361. Il tire parti au mieux de la disponibilité des composants CMS, y compris les bobines et le filtre FI. Le récepteur complet avec son antenne et le quartz (allégé par remplacement de son boîtier métallique) pèse 1,45 g (fig.6). Il est assemblé sur un circuit imprimé double face de 0,4 mm et toutes les soudures ont été réduites au minimum à l'aide de la tresse à dessouder.

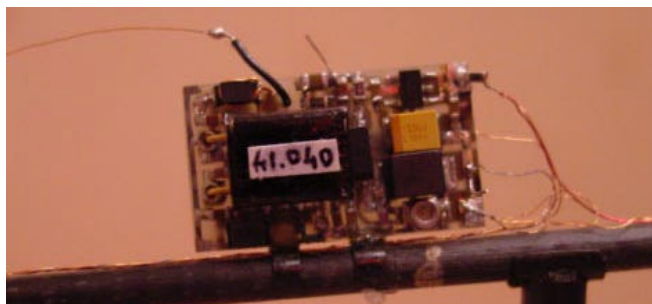


fig.6

2. Variateur :

12C508A attaquant directement en découpage à 2,5 kHz le MosFet de puissance (en boîtier TSOP6, pouvant passer 3,2A). Le variateur a une résolution de 75 pas permettant un réglage fin du régime moteur et une résistance interne de 0,10hm. Les deux autres composants du variateur sont un condensateur céramique de découplage et une diode Schottky de roue libre. Un variateur à haute fréquence à 133 kHz tel que conçu et fabriqué par JMP Solutions [2] aurait été préférable pour la durée de vie du moteur et son rendement, mais le nombre de composants nécessaire est nettement supérieur (il faut entre autres deux microcontrôleurs et une self de filtrage). La recherche du poids minimum a exclu son usage. Le variateur est assemblé "en l'air", sans circuit imprimé (à droite fig.7).

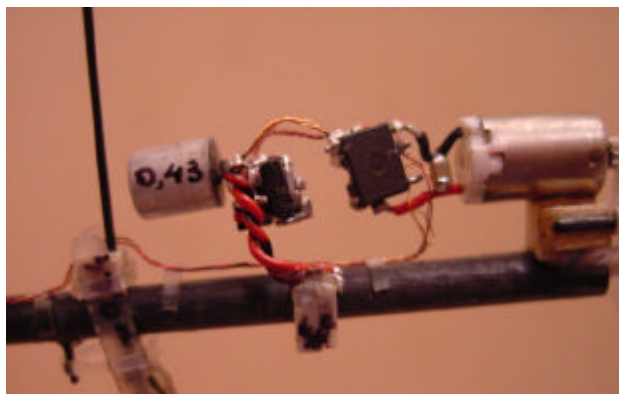


fig.7

3. Gouvernes de direction et profondeur.

Un 12C508A attaquant directement la bobine de l'actionneur (découpage bidirectionnel à rapport cyclique variable de fréquence 3 kHz, avec 35 pas dans chaque sens) pour chacun des deux volets de l'empennage en V_e. Les sorties du 12C508A sont capables de débiter jusqu'à 20 mA. Le 12C508A est câblé sans circuit imprimé, à proximité de l'actionneur (voir fig.5).

De plus, et c'est là un facteur primordial du succès du projet, un **convertisseur –élévateur de tension** (fig.7 à gauche) amène à 5 Volt régulés la tension de l'unique élément Nickel-Cadmium composant la source d'énergie de l'avion. Ce convertisseur conçu autour d'un MAX1701 de chez Maxim [3] à redressement synchrone est assemblé sans circuit imprimé. La self est un modèle CMS de chez Murata, rebobinée pour

obtenir une résistance minimale. Le convertisseur assemblé pèse 0,43 g., il fonctionne jusqu'à une tension minimale de moins de 0,9V et peut débiter 200 mA sous 5V, avec un courant d'entrée de l'ordre de 1,1A. La conception du câblage d'un tel convertisseur n'est pas un sport anodin, et plusieurs cadavres de MAX1701 en sont témoins, mais le rendement obtenu est remarquable, supérieur à 90%. La détection de sous-tension incorporée au MAX1701 est très bienvenue, car l'épuisement progressif de l'énergie de l'accumulateur est masquée par la régulation de tension effectuée par le convertisseur. Elle est utilisée pour couper le moteur avant la décharge complète de la batterie et préserve ainsi suffisamment d'énergie pour permettre le contrôle de l'atterrissage de l'avion.

Les boîtiers de tous les circuits intégrés ont été poncés pour en réduire le poids. La mesure des poids a été faite avec une précision du 1/100g.

Le câblage de l'électronique embarquée est réalisé en fil de cuivre émaillé de deux diamètres différents. Le convertisseur et le variateur sont placés au plus près du moteur pour réduire les pertes en ligne.

E. La Source d'énergie

La source d'énergie du "Moins que Rien" est un élément Nickel-Cadmium de 50 mAh, type Sanyo [4] N50AA de tension nominale 1,2V et de résistance interne 55mOhm. Divers essais avec des accumulateurs NiMH ou autres plus légers ont été infructueux, la résistance interne étant trop élevée pour assurer le débit de 1,1A sans chute de tension rédhibitoire. L'élément Sanyo standard (à gauche fig.8) pèse 3,9 g et son enveloppe métallique fait 0,35 mm. d'épaisseur. Après passage au tour pour éliminer 0,2 mm. de métal, le poids tombe à 2,95g (au centre fig.8). Finalement, seul le métal nécessaire au fonctionnement électrique a été conservé et une poche en film polyéthylène a été confectionnée pour contenir l'électrolyte (à droite fig.8). Le poids définitif ressort à 1,95g et les performances ne sont pas diminuées. Seul reste le problème de la durée de vie d'un tel accumulateur modifié, qui ne dépasse pas quelques semaines avant que l'électrolyte ne disparaisse par défaut d'étanchéité. Avec l'élément N50AAA, l'autonomie de vol est d'environ 2mn30s, toute la puissance restant disponible jusqu'à épuisement de la charge. De ce fait l'avion reste jusqu'au bout capable de "touch and go", et garde au long du vol son entière capacité de manœuvre.



fig.8

III. ALLER PLUS LOIN ?

D'autres techniques de fabrication ont été développées pour des avions plus lourds et plus rapides.

La plus prometteuse est celle qui permet la fabrication de tube en carbone de forme quelconque.

Le matériau de départ est une « chaussette » en carbone tissé (disponible chez Polyplan Composites [5]). La chaussette est imprégnée de résine époxy par trempage suivi d'un premier essorage. Elle est ensuite enfilée sur un tube de silicone du diamètre approprié, et essuyée soigneusement toujours dans le même sens, pour bien la tendre et éliminer le plus possible de résine inutile. Le tout est ensuite placé sur un gabarit à la forme désirée et mis à polymériser. Une fois la résine durcie, il suffit de tirer sur une extrémité du tube de silicone, ce qui rétrécit son diamètre et le décolle, pour l'extraire sans difficulté. Ce procédé simple permet de fabriquer des pièces à priori « impossibles » pour l'amateur, légères et rigides (fig. 9). Le même procédé, en laissant pendre l'ensemble avec un poids à son extrémité inférieure, permet la fabrication de tubes rectilignes très légers.



fig. 9

Si l'on tient à continuer la course à la légèreté sans autre considération que la possibilité de réaliser les manœuvres décrites en introduction, dans l'esprit de la course au record, il sera possible d'envisager d'autres formules aérodynamiques plus économes en structure (par exemple sans-queue) et une plus grande intégration de l'électronique embarquée, en profitant de la disponibilité de nouveaux composants, microcontrôleurs, transistors ou circuits intégrés haute fréquence, à la fois plus compacts et plus performants.

IV. CONCLUSION

Les techniques exposées ont permis de faire voler un avion radiocommandé à propulsion électrique d'un poids de 8,9g. Elles ont été développées par des modélistes et ne requièrent que des moyens modestes et des matériaux ou composants faciles à se procurer. La pierre d'achoppement pour l'amateur moyen réside principalement dans la programmation des microcontrôleurs, non que le matériel proprement dit soit d'un coût prohibitif, mais parce qu'un certain niveau de connaissances et un apprentissage rigoureux sont nécessaires.

Ces techniques ont depuis été améliorées et complétées par d'autres applicables à des avions d'un poids plus élevé.

BIBLIOGRAPHIE ET REFERENCES

- [1] G.Jumelin, « Poids plume », dans RCM, no.202, pages 128 et 129, février 1998.
- [2] JMP Solutions, 23 allée Hérold, 93340, Le Raincy, jpiednoi@club-internet.fr, 01 43 8 02 70.
- [3] Maxim, www.maxim-ic.com
- [4] Sanyo, www.sanyo.com/industrial/batteries/
- [5] Polyplan Composites, 108 Quai Jacques-Bourgoin, 91100, Corbeil-Essonnes, 01 64 96 02 70.