

Avion d'intérieur : une plateforme de recherche pour la robotique bio-inspirée

Jean-Christophe Zufferey*, Cyril Halter*, Jean-Daniel Nicoud**

* Evolutionary & Adaptive Systems Team [EAST], Institut de Systèmes Robotiques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

** DIDEL SA, Belmont, Suisse (cf. [DIDEL])

Pour toute correspondance : Jean-Christophe.Zufferey@epfl.ch

A travers cet article, nous souhaitons présenter un avion d'intérieur un peu spécial puisqu'il a été conçu pour servir de base à un projet robotique. Pour le moment, il s'agit d'un modèle télécommandé. A terme, il est destiné à voler de façon autonome en utilisant la vision comme seul capteur.

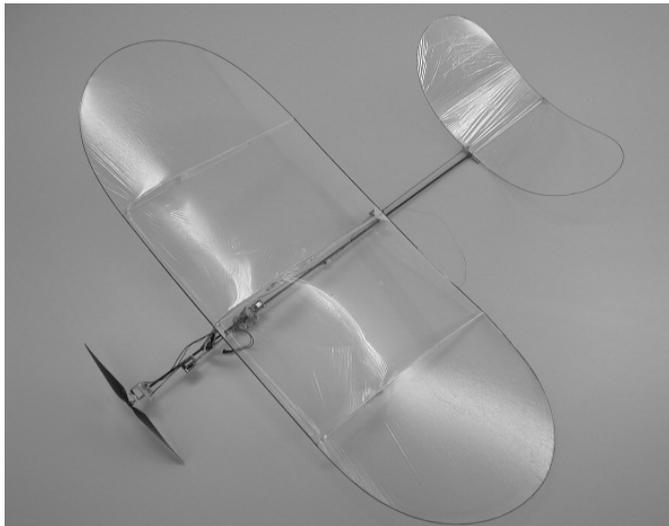


Figure 1 – La dernière version de notre modèle C

Une plateforme robotique

En robotique autonome, l'intelligence artificielle (IA) sert de base théorique pour la programmation du centre de commande des agents mobiles. Dans ce domaine en pleine ébullition, il existe essentiellement deux tendances. D'un côté l'approche classique, basée sur des algorithmes bien structurés souvent lourds et lents, requérant une modélisation quasi-parfaite de l'environnement du robot, du "monde extérieur". De l'autre, la "nouvelle IA" s'inspire du comportement des insectes et de leur câblage neuronal pour développer des contrôleurs de robot rapides, adaptatifs et situés. C'est à cette dernière tendance que ce projet appartient.

Notre idée est de montrer qu'avec des méthodes dites "bio-inspirées" comme les algorithmes génétiques (cf [RobEvo] pour une description accessible), on peut obtenir des systèmes de contrôle efficaces, peu gourmands en puissance de calcul et pouvant s'adapter à différentes conditions extérieures. Depuis plusieurs années, les recherches se font avec des robots mobiles roulant dans des cages, espaces relativement restreints. Le robot volant est notre défi avec, comme premier objectif, un avion d'intérieur apprenant à voler et évitant les obstacles grâce à des capteurs optiques qui restent à développer.

Cet énoncé surprendra plus d'un adepte du vol d'intérieur puisqu'en s'inspirant d'un avion standard de vol libre - autonome par nature -, un premier effort doit être accompli dans le but de le rendre dirigeable (télécommandable), pour finalement re-développer son autonomie et le faire voler sans pilote ! Ceci est pourtant bel et bien notre objectif. Mais nous

n'en sommes pas encore là, puisque le projet (voir [AVBFR]) vient de prendre son envol, il y a quelques mois.

Quelques données techniques

Télécommandé, notre modèle actuel, résultat d'un développement assez rigoureux, vole plutôt élégamment. Sa structure est composée essentiellement de tiges en fibres de carbone, de balsa et de Mylar pour l'entoilage des parties portantes. Côté servomoteurs, réception et propulsion, il est équipé de composants commercialement disponibles (essentiellement de chez [WES]):

- Récepteur : JMP RX5-2.3
- Servos : 2x LS-2.4
- Variateur : robbe RSC 105uP
- Moteur : escap 08GS61, 0.5W
- Hélice : WES Carbon 20x10cm
- Réducteur : 1:5, engrenages DIDEL sur roulements
- Batteries : 6x Sanyo NiCd, 70mAh

Dès le début du développement, l'accent a été mis sur la vitesse minimale, sur la maniabilité (afin d'évoluer dans des espaces restreints) et sur la possibilité d'emporter une charge utile par la suite (système de vision et de commande). Voici quelques caractéristiques de notre dernière version (le modèle C) :

- Poids en ordre de vol : 47 g
- Envergure : 80 cm
- Charge alaire : 2.1 g/dm²
- Vitesse minimum : 1.4 m/s
- Avec charge utile de 15 g : environ 1.8 m/s
- Espace minimum pour voler : environ 8 x 8 mètres
- Autonomie : environ 4 minutes 30"

Vol à faible vitesse – rappels théoriques

Rappelons ici que la force de portance F_z est proportionnelle au carré de la vitesse de l'air v , à la surface de l'aile S et à un coefficient de portance C_z :

$$F_z = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_z$$

Où ρ représente la densité de l'air. Le coefficient de portance C_z dépend essentiellement du profil d'aile et du type d'écoulement. Celui-ci est déterminé par le nombre de Reynolds, dénoté "Re", qui est, entre autres, proportionnel à la vitesse de l'air et à la grandeur de l'avion (Re est le rapport entre les forces d'inertie et les forces de frottement visqueux).

Naturellement, pour un vol horizontal stabilisé, cette force de portance doit compenser exactement le poids de l'avion. Notre principal objectif étant de voler lentement, la formule ci-dessus nous aide à comprendre qu'il faut une surface alaire S maximale pour tenter de contrer l'effet désastreux du peu de

vitesse sur la portance. Mais attention, n'oublions pas qu'en augmentant S , la traînée devient, elle aussi, plus importante.

D'autre part, il est à noter qu'aux vitesses très faibles (Re petit), les coefficients de portance généralement obtenus sont très mauvais. Le graphique de la figure 2 illustre ce phénomène en montrant l'évolution du C_z en fonction de Re pour différents profils standard (sources [NASG]). Comme référence, pour notre avion en vol, le nombre de Reynolds vaut environ 30'000 alors qu'il est facilement supérieur à 200'000 pour un avion télécommandé "normal".

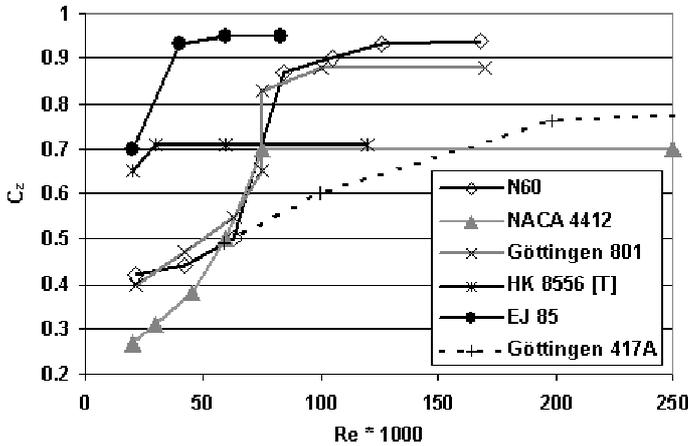


Figure 2 - Coefficients de portance en fonction de Re

Au vu de ces considérations, il devient évident que la clé de la réussite réside dans la légèreté, ou, plus précisément, dans une charge alaire minimum. Cette tendance est parfaitement mise en valeur par le graphe de la figure 3 qui montre la dépendance entre le poids et la charge alaire de plusieurs modèles d'intérieur à vol lent (adapté de [JMCCA]).

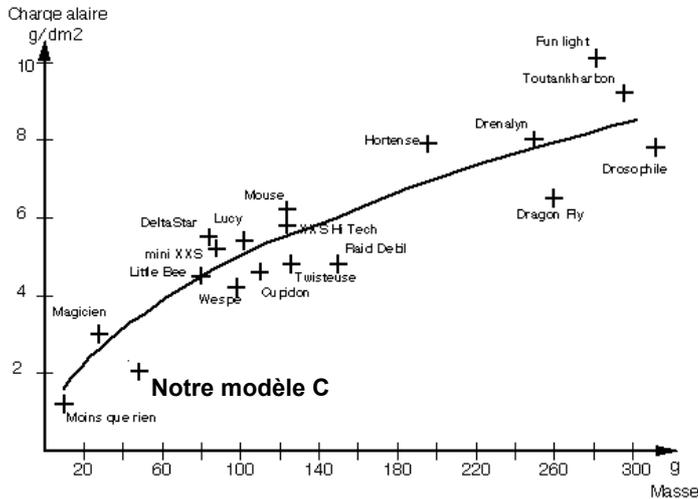


Figure 3 – Poids en fonction de la charge alaire pour plusieurs "indoor slow flyers"

La maîtrise du poids

Dans une optique de diminution maximale de poids, il est bon d'analyser la répartition des masses pour les différentes parties de l'avion afin de déterminer les éléments qu'il est le plus payant d'optimiser. La figure 4 démontre, toujours pour notre modèle C, que les batteries représentent une part importante du poids de l'avion. L'alimentation électrique est donc un des sujets principaux de développement futur. La réduction du nombre de cellules peut représenter, avec l'aide d'un convertisseur DC/DC pour obtenir un voltage suffisant, une idée plus qu'intéressante, bien que problématique du point de vue de l'autonomie.

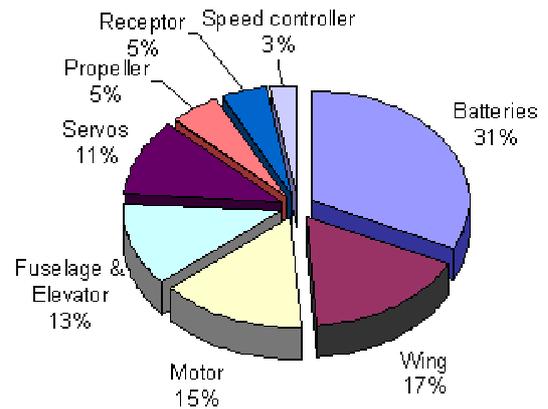


Figure 4 - Répartition des masses pour le modèle C

Revenons au développement de notre modèle. Après la réalisation d'un premier prototype opérationnel, le processus d'optimisation a consisté en une succession de petites modifications et d'essais en soufflerie.

Expériences en soufflerie

Concernant la commande de l'avion (direction et profondeur), une de nos premières idées fut de travailler sur la déformation des surfaces portantes. Malheureusement, les servos linéaires ne permettent pas, aux faibles vitesses, d'obtenir un effet suffisant. Pour la commande en tangage, nous sommes donc revenus à un concept classique avec un plan de profondeur horizontal. Celui-ci est incurvé vers le haut (en forme de "U") pour assurer la stabilité autour de l'axe de lacet. Pour la commande de direction (lacet et roulis), la meilleure maniabilité a été obtenue en remplaçant le gouvernail mobile par un moteur hélice orientable. Cette solution s'avère très efficace à faible vitesse et peu gourmande en poids. La figure 5 montre le système de propulsion avec ses deux axes à roulements : l'axe de l'hélice (sortie du réducteur, parallèle au moteur) et l'axe de direction (vertical, au premier plan).



Figure 5 – Système de propulsion orientable

Finalement, plusieurs essais en soufflerie nous ont permis d'établir des polaires et de visualiser l'écoulement d'air pour détecter des zones à problèmes. La soufflerie à veine fermée utilisée est suffisamment spacieuse pour accueillir le modèle réel. Ceci représente un avantage considérable sur les expériences standard où des avions réels sont remplacés par une maquette. Dans notre cas, il n'y a pas de nécessité d'utiliser les fameuses lois de similitude (Re constant) pour analyser les résultats. D'autre part, puisque cette installation appartient au département de génie civil, le vent qu'on y produit peut être très faible, ce qui n'est souvent pas le cas pour les souffleries à veine libre utilisées en aérodynamique.

Comme exemple de visualisation, sur la figure 6 on peut bien distinguer la formation du tourbillon marginal.

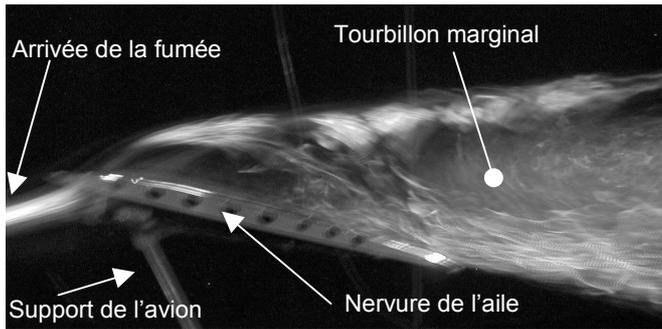


Figure 6 - Visualisation du tourbillon marginal (vue latérale, gauche de l'image = avant de l'avion)

Ce type d'image est obtenu en injectant de la fumée devant le profil. Cette fumée est emportée par le vent et révélée par un plan laser vertical et parallèle à l'écoulement d'air. On peut ainsi obtenir différentes coupes à différents endroits de l'aile ou de toute autre partie du modèle. Cette technique nous a permis, par exemple, de comprendre l'origine d'un comportement étrange de l'avion, dans certaines configurations de vol.

Bien entendu, afin d'être à même de comparer finement différents types d'ailes (profils), il faut pouvoir mesurer les forces aérodynamiques. Il est à noter que l'ordre de grandeur de ces forces (500mN) est bien plus petit que pour des expériences aérodynamiques classiques (lors desquelles la vitesse de l'air est justement plus élevée que dans la réalité pour maintenir Re constant). Nous avons donc développé une balance aérodynamique capable de mesurer la portance, la traînée et les moments sur les axes de tangage et de roulis. Réalisée en collaboration avec [DIDEL] et [SENSILE], cette balance qui constitue le support de l'avion dans la soufflerie, est basée sur 4 capteurs de force miniatures. Elle permet donc l'établissement des polaires pour chaque version de la structure de l'avion ou du profil de l'aile. Dans la figure 7 sont confrontées trois polaires du même modèle C avec trois ailes différentes.

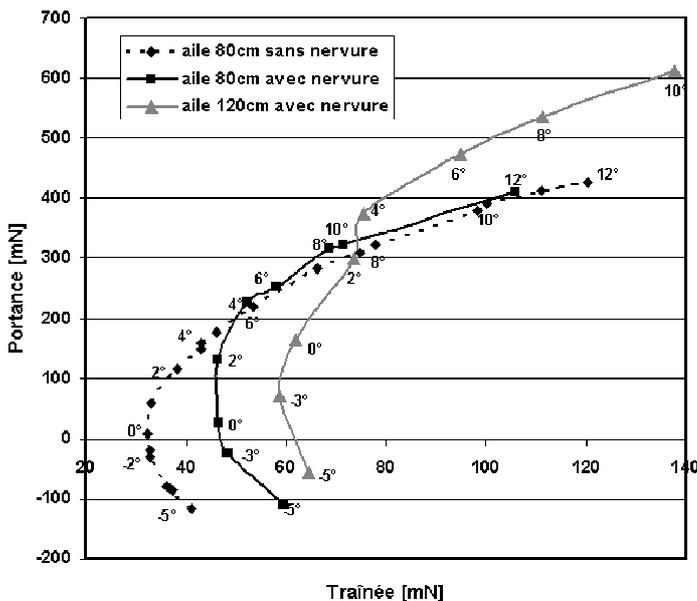


Figure 7 - Polaires pour différents types d'ailes (vitesse de l'écoulement d'air : 1.5 m/s)

Notons que même avec l'aile actuelle (80cm avec nervure) avec un angle d'attaque de 10° , la portance n'est pas suffisante ($\sim 300\text{mN}$) pour compenser le poids de l'avion ($47\text{g} \approx 470\text{mN}$). Ceci est dû essentiellement au fait que ces mesures ont été prises avec le moteur à l'arrêt.

A partir de ces polaires, on peut aussi estimer la finesse maximum réelle de nos avions. Pour la version actuelle, elle vaut environ 4.3, ce qui est relativement mauvais, si l'on songe aux planeurs de pointe et à leur finesse de 60. Mais ce chiffre se situe bien dans la moyenne de ce genre de modèle petit et lent. Ceci tend à prouver qu'à ces faibles nombres de Reynolds, certains phénomènes aérodynamiques sont assez différents de ceux qui régissent le comportement des vrais avions. Sans vouloir entrer des les détails, on peut songer notamment à l'écoulement partiellement laminaire provoquant l'apparition de bulles (zones de re-circulation de l'air) sur l'extrados. Il s'agit d'un domaine quelque peu délaissé des chercheurs, certainement par manque d'intérêt économique.

Pour conclure

A l'avenir, nos efforts vont se porter essentiellement sur le développement du système de vision et sur le contrôleur de l'avion. Ces éléments devront avoir un poids global d'environ 15g. En parallèle, l'étude aérodynamique et notamment la simulation de l'écoulement d'air autour de l'aile va se poursuivre. La simulation numérique bidimensionnelle nous permettra peut-être d'optimiser significativement le profil.

Pour conclure, nous tenons à remercier l'entreprise Sensile pour son soutien matériel et théorique concernant les capteurs de forces. Sans l'aide de MM. Hertig et Goulpié du département de génie civil, les expériences en soufflerie n'auraient pas pu avoir lieu. Un grand merci à eux. Nous sommes de même très reconnaissants envers le prof. Floreano qui a rendu possibles ces recherches et avec qui nous avons eu d'innombrables discussions passionnantes sur le sujet.

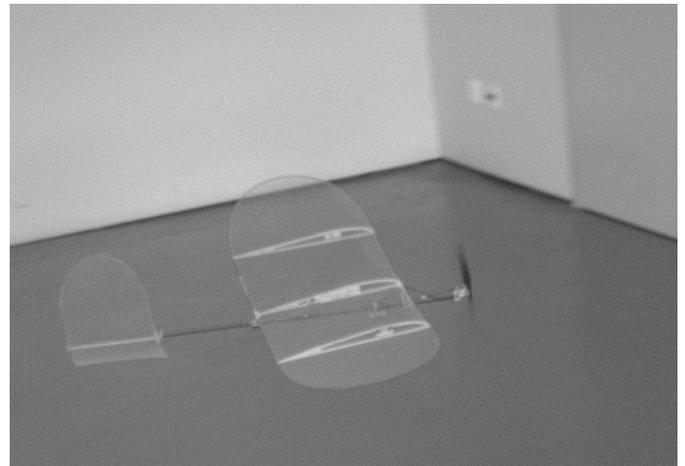


Figure 8 - Modèle C en vol

Références

[AVBFR] dmtwww.epfl.ch/isr/east/team/zufferey/project.html
 [EAST] dmtwww.epfl.ch/isr/east/
 [DIDEL] www.didel.com
 [JMQUCA] rm.netfime.com/jmquetin/tips5f.htm
 [JMQUIBT] rm.netfime.com/jmquetin/ibtscale.htm
 [NASG] www.nasg.com/afdb/list-airfoil-e.phtml
 [SENSILE] www.sensile.com
 [RobEvo] www.pourlascience.com/numeros/pls-284/art-5.htm
 [WES] www.idnet.de/homepage/scholl/

