

Minimisation de l'énergie dans les machines à voilure tournantes

Par François MARCEL, assisté de Jacques BOYER, Pierre HERMET et Raymond DAUPHIN

pour Aerodes

Résumé— Cet exposé résulte d'un travail d'amateurs¹ et traite de ce que nous avons appris au cours de quatre années d'études sur les économies d'énergie à réaliser sur des machines à voilures tournantes. Le programme très vaste de cet exposé, consiste à faire l'inventaire des gains potentiels dans tous les domaines impliqués dans ce type de machine. Cela a abouti à démontrer les capacités de durée de vol d'une machine à moteur électrique par une tentative de record mondial réussie le 29 juin 2001 (1 heure 6 minutes 56 secondes).

I. INTRODUCTION

Les hélicoptères modèles réduits électriques ont souvent été décriés et considérés comme inintéressants en raison de durées de vol trop courtes. Cela est évidemment inhérent au stockage de l'énergie mais pas seulement : on peut démontrer que la conception de la machine y est aussi pour beaucoup. Ainsi l'approche qui nous a guidé a été la suivante :

Le but : démontrer la capacité de durée de vol des hélicoptères électriques

La démarche :

- expérimentation au moyen d'un banc d'essai de rotor
- modélisation de la machine : rotor et chaîne énergétique
- conception et construction d'un prototype
- démonstration par une tentative d'un record mondial
=> homologation FAI (29 juin 2001 => 1h 6mn 56s)

Le programme : revient à faire l'inventaire des gains énergétiques potentiels dans les domaines suivants :

- choix de la configuration des voilures tournantes
- l'aérodynamique du rotor
- la masse et la rigidité
- la chaîne de transmission mécanique
- la chaîne électrique
- le comportement en vol

Il n'y a cependant pas de secret : pour voler longtemps, il n'y a pas de petits gains, tout est important !

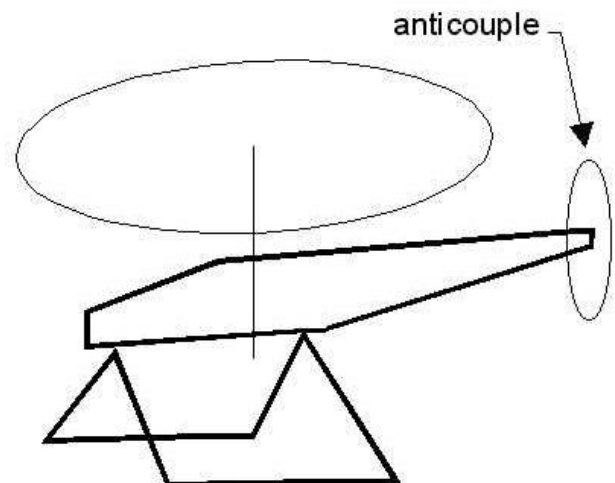
¹ François MARCEL, Jacques BOYER, Raymond DAUPHIN et Pierre HERMET ont créé l'association **Aerodes** dont le but est de partager et accroître les connaissances dans le domaine des aérodyne à voilures actives.

II. PROGRAMME D'OPTIMISATION

A. Choix de la configuration des voilures tournantes

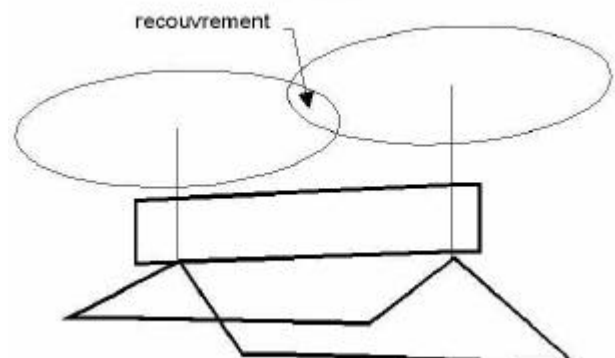
Le rendement des voilures tournantes dépend de leur configuration. Comparons alors les principales configurations selon les critères de la FAI². La comparaison se fait à masse et surface³ égales. Pour les modèles réduits des catégories F3/F5⁴ la surface maximale est de 3m² et la masse maximale de 5kg.

MONOROTOR



Dans ce cas seule la surface du rotor principal est comptée, soit approximativement $D=2\text{m}$ de diamètre

TANDEM



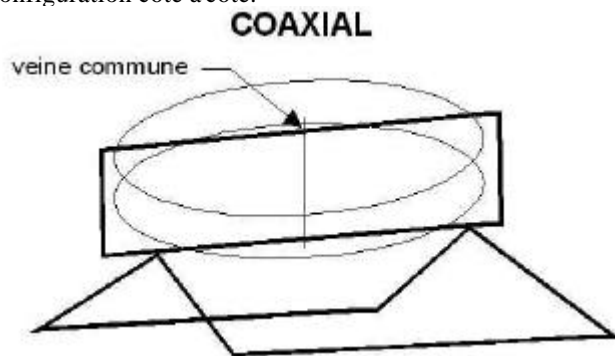
S'il n'y a pas de recouvrement, la surface des 2 rotors est

² Fédération Aéronautique Internationale

³ Surface en projection verticale

⁴ Thermique/Électrique

comptée, soit approximativement 1,4m de diamètre ($D/2$). S'il y a recouvrement, la surface de recouvrement n'est comptée qu'une fois. La règle est évidemment la même pour la configuration côte à côte.



La surface rotor n'est comptée qu'une fois si la distance inter-rotor est inférieure à un rayon (ce qui est le cas général), sinon deux fois.

Les configurations multiroteurs à $n \times 2$ rotors ne sont pas incluses dans le règlement. Il n'est pas précisé si les rotors peuvent être carénés.

Pour comparer les performances de ces configurations, il est pratique d'utiliser la **puissance spécifique**⁵ :

« Puissance absorbée/masse soulevée en W/kg »

A remarquer que la puissance spécifique est très sensible à la charge au disque. La notion de puissance spécifique s'applique donc à des modèles directement concurrents en termes de masse et de dimensions.

Pour donner un ordre de grandeur une machine F3 de 5kg va absorber de l'ordre de 80 à 120W/kg. Notre birotor en tandem optimisé pour le record absorbe 42W/kg, valeur qui peut vraisemblablement tendre vers 32W/kg.

Pour rester dans un cadre général, l'un des premiers choix à effectuer concerne la **liaison pales/rotor**. En effet le meilleur choix que l'on puisse faire est un rotor à pales libres ou **rotor articulé** (en vertical et horizontal). Les contraintes mécaniques sont alors tolérables et donnent la possibilité de grands allongements favorables à l'optimisation recherchée. Pour certaines configurations, on peut être amené à choisir un **rotor rigide** ou plutôt semi rigide, les contraintes mécaniques étant telles qu'il est pratiquement impossible de rester rigide, d'où renforcement des structures (profils épais défavorables à l'optimisation). Ce type de rotor est plutôt réservé à des configurations coaxiales dans lesquelles on recherche le rapprochement des rotors. Une autre caractéristique recherchée peut être l'annulation des effets gyroscopiques des rotors en contra-rotation. Le choix de la liaison pales/rotor entraîne des conséquences importantes sur le comportement dynamique de la machine en vol.

Pour en venir à la **comparaison des trois configurations** de base (mono rotor, bi rotor en tandem, bi rotor coaxial⁶),

⁵ à ne pas confondre avec la puissance embarquée : puissance maximale de la motorisation / masse machine

⁶ configuration assimilable à un mono rotor dont le nombre de pales est double => rotors proches (de l'ordre de la corde). La contrarotativité est plutôt un avantage => pas d'entraînement de la veine d'air

=> Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la configuration coaxiale n'est pas un cas particulier des rotors à recouvrement : le coaxial permet d'obtenir une veine d'air strictement commune pour les 2 rotors alors que les recouvrements de rotors produisent des accélérations locales tourbillonnantes, siège de pertes

intéressons nous aux pertes aérodynamiques et mécaniques ainsi qu'aux conséquences sur la masse machine.

Si on prend le **mono rotor** comme référence, on peut lui affecter arbitrairement 0% de pertes aérodynamiques pour le rotor principal, mais 15% pour l'anti-couple et 2% de pertes mécaniques pour la transmission anti-couple, soit une pénalité d'environ 17%.

Pour le **bi rotor en tandem**, on considère des pertes aérodynamiques par effet d'échelle (principalement liées au nombre de Reynolds et paramètres dépendants) sur le diamètre rotor ($D/2$), pertes de l'ordre de 2% ainsi que des pertes par recouvrement aussi de 2% si celui-ci est faible. Les pertes mécaniques de transmission inter rotor sont estimées plus importantes en raison du couple à transmettre : 4%. Soit une pénalité globale de 8%.

Dans le cas du **bi rotor coaxial**, on peut considérer des pertes aérodynamiques afférentes au choix structural (rotor semi rigide) de l'ordre de 4%. Les pertes mécaniques sont de même grandeur que pour le tandem : 4%. Soit une pénalité globale de 8%.

Du côté des pénalités de masse, la situation du bi rotor en tandem est considérée la moins avantageuse, la plus avantageuse étant le bi rotor coaxial.

Le bilan de cette comparaison conduit à écarter le mono rotor au profit du tandem ou coaxial, relativement difficiles à départager.

B. L'aérodynamique du rotor

1) Les choix

L'aérodynamique du rotor conduit à un choix contradictoire : on ne peut pas être optimisé à la fois pour le vol en translation et le vol en stationnaire vu que les distributions du vent de Froude et des vitesses relatives aux pales sont très différentes. Dans la suite de cet exposé on ne considère donc que l'aérodynamique du vol stationnaire.

Ainsi, optimiser la sustentation conduit à uniformiser et minimiser la vitesse du vent de Froude (moins l'air se dérobe sous le rotor et plus ce dernier devient efficace).

Le choix du profil est lié à son adaptation aux faibles vitesses de rotation, autrement dit aux faibles nombres de Reynolds⁷ (dans notre cas la plage est de 20000 à 100000). Il est avantageux de choisir un rapport C_z/C_x grand pour une valeur élevée du C_z ce qui conduit à des profils très cambrés. Il est préférable de choisir une cambrure reculée pour minimiser le moment piqueur de ce type de profil. Ce moment est toutefois compensable sous certaines conditions. Il faut considérer que l'exploitation du profil est au moins aussi importante sinon plus que le choix du profil lui-même. Cependant, entre un profil de finesse 30 et un autre de 60, le gain énergétique ne sera que de l'ordre de 15% à 20% après optimisation de chaque solution.

Un projet de rotor est en général abordé en travaillant à diamètre de rotor donné. Les paramètres essentiels sur lesquels on va travailler sont alors la vitesse de rotation, le nombre de pales et leur forme en plan. La hiérarchie de ces paramètres se présente comme suit :

La **vitesse de rotation** est le paramètre le plus important (traînée au carré de la vitesse) permettant un gain très significatif en puissance spécifique mais limité par le

⁷ ce domaine de l'aérodynamique semble mal connu. Il est pourtant essentiel dans le domaine des micro-drones.

domaine de Reynolds. En outre, une faible vitesse de rotation conduit rapidement à des limites pratiques de mise en œuvre car la conicité et le recul de pale finissent par prendre des valeurs intolérables.

Une faible **charge au disque** et/ou à la pale favorise également un gain en puissance spécifique. Ceci est obtenu par un plus grand nombre de pales ou de plus grandes cordes ce qui n'est pas toujours favorable pour la traînée.

Un grand **allongement** conduit à un gain appréciable en limitant l'influence des tourbillons marginaux. L'effet défavorable est une faible corde et une plage de Reynolds pénalisante.

Le **vrillage** (linéaire pour simplifier) est souhaitable pour une meilleure répartition du vent de Froude. Un vrillage optimisé permet un gain de l'ordre de 5%.

Une **forme en plan** en trapèze ou mieux un rectangle suivi d'un trapèze permet de gagner encore environ 2%.

Il existe probablement une géométrie de **bord marginal** amenant un gain supplémentaire. Dans le domaine du modèle réduit, la situation est encore malheureusement au stade empirique.

Enfin dans certains cas un **carénage** de rotor peut être envisagé (bi rotor coaxiaux rapprochés). Le bénéfice attendu peut être de l'ordre de 10%, mais amoindri par un excès de masse.

Dans tous les cas, l'optimisation est obtenue pour une valeur élevée de C_z , souvent supérieure à 1.

Les pourcentages en ce qui concerne les gains potentiels indiqués, sont issus de notre expérience acquise dans la modélisation.

2) La démarche expérimentale

La démarche expérimentale est essentielle pour quantifier les réalisations. Un banc de mesure a été mis en œuvre à cet effet. Il est constitué d'un **poste de conduite** (PC plus boîtier d'interface avec le banc électromécanique) et d'un **banc électromécanique** d'entraînement (télé-alimenté par le poste de conduite) représenté par la photo ci après.



Les **paramètres pris en compte** sont les suivants :

- asservissement de la vitesse de rotation avec séquence de démarrage automatique
- commande de l'angle de pas, commande du moteur
- mesure de la vitesse de rotation, du couple, de la poussée, du courant et de la tension moteur
- ajustement des paramètres internes du banc

Un **logiciel d'application** a été spécialement développé pour :

- le séquençage de mesures pré-enregistrables
- le relevé automatique des courbes de couple et poussées en fonction de la vitesse de rotation (8 points)
- L'exploitation des résultats sur Excel

En outre des pieds offrent la possibilité d'exploiter le banc à 1m ce qui permet d'obtenir des mesures en et hors effet de sol. Le rapport entre le diamètre rotor étudié et les dimensions du local est important pour la qualité des mesures, l'idéal étant de travailler en espace totalement ouvert.

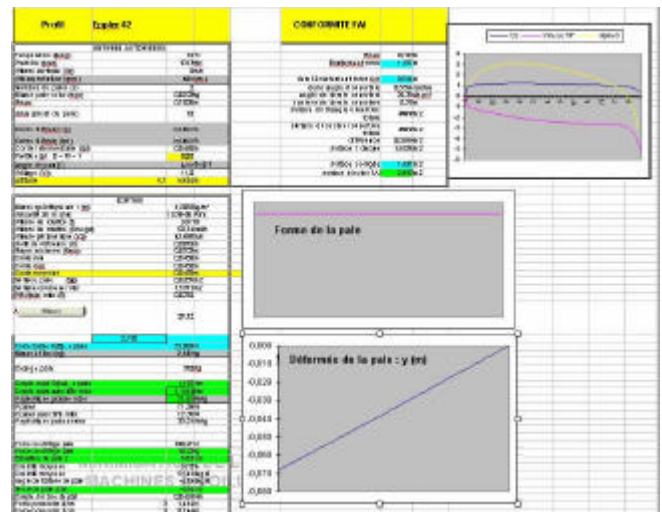
La précision de l'asservissement de la vitesse de rotation à la valeur de consigne est primordiale pour obtenir des résultats de qualité. Malgré cela un relevé statistique (une centaine d'échantillons par point de mesure) est nécessaire. La précision obtenue sur deux courbes réalisées en conditions atmosphériques identiques est de l'ordre du pour cent.

3) La démarche théorique

Modéliser le rotor est apparu comme indispensable pour l'optimisation. Le modèle comprend trois domaines :

- **caractérisation du profil** utilisé, via une soufflerie numérique (JavaFoil de Martin Epperle)
- **modélisation du rotor**⁸ (pales articulées libres ou avec moment de rappel) :
 - . calcul aérodynamique (couple et poussée en fonction des paramètres fixés par l'utilisateur)
 - . calcul mécanique (recul de pale, conicité, déformée de la pale longitudinale et transversale⁹)
- **modélisation de la chaîne énergétique**

Le **modèle PH72** utilise la méthode des éléments de pale ou méthode des anneaux (100) avec une formulation appropriée des effets marginaux tenant compte de la charge au disque. Il est implémenté sur Excel (la photo ci après représente une vue partielle des entrées/sorties du tableur).



A chaque projet on crée un nouveau tableur ou une famille de tableurs en fonction des options prises. L'outil

⁸ En fonction des paramètres atmosphériques, mais aussi du nombre de Mach, de l'effet de sol, etc...

⁹ déformée transversale : torsion résultante du moment (piqueur) du profil et du moment (cabreur) produit par la force centrifuge sous l'effet de la conicité

d'optimisation est la valeur cible (par macrocommandes) ou le solveur (plusieurs variables simultanées avec contraintes). Avec un peu d'expérience, l'optimisation manuelle en point à point est préférée car elle permet de prendre conscience de l'influence des divers paramètres. En fait, il existe non pas une solution optimale, mais une famille de solutions. L'optimum n'est pas « pointu ».

Toute la synergie de la démarche est obtenue par **comparaison** à tout moment entre les **modélisations** et les **mesures** sur banc. Les écarts enregistrés entre modélisation et mesures sont en général très faibles et de l'ordre de quelques pour cents. Les résultats ont aussi été consolidés par des mesures en vol réel (wattmètre embarqué). L'écart entre les durées de vol prédites et mesurées sont également de quelques pour cents.

C. La masse et la rigidité

C'est une évidence, la performance est directement liée aux gains effectués sur la masse. Néanmoins cela ne doit pas se faire au détriment de la rigidité des structures.

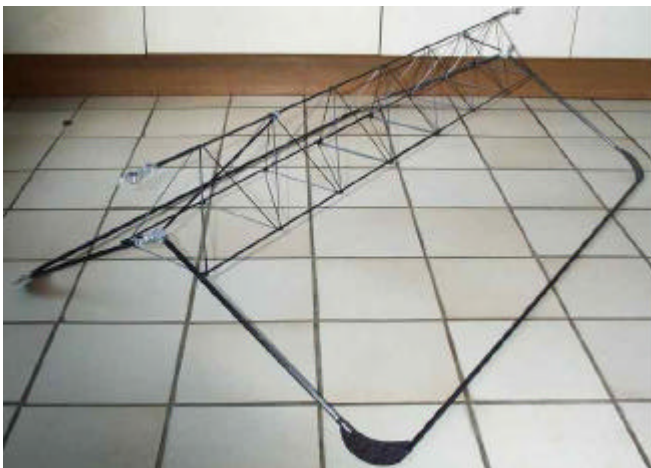
1) Les structures

Le **châssis** doit assurer une rigidité suffisante et ne pas entrer en résonance. Selon la conception, les gains de masse peuvent être importants. Privilégier les **structures périmétriques** : valable aussi bien pour le châssis que pour chaque pièce individuellement. A titre d'exemple :

Birotor en tandem : Le châssis, linéaire, lie rigidement les deux rotors

- structures tubulaires (bi-tubes) : simplicité, manque de rigidité, relativement lourd (masse 350gr)
- structure en treillis (3G: tubes et jonc carbone), rigidité «absolue» au niveau des nœuds (masse 90gr !)

Birotor coaxial : Une excellente solution pour minimiser la masse par la concentration des composants : châssis et arbres de transmission presque inexistantes. Les problèmes de rigidité sont plus simples à résoudre.



L'**atterrisseur** qui concerne tout type de machine est un point critique de conception :

- joue le rôle essentiel d'interface amortissante
- doit donner confiance au pilote (stabilité au sol, capacité à amortir, à glisser et si possible dérapier latéralement) et éviter les mises en résonances. Il constitue une pénalité de masse à minimiser.

Les **pales** doivent être à grande rigidité en torsion en raison du moment piqueur et des risques de flutter favorisés par des profils minces. Tissus carbone (ou mieux

carbone/kevlar) replié en périmétrie contre intrados/extrados, fibres à 45° (pas de demi coquilles). Le remplissage doit être le plus incompressible possible (époxy par exemple).

2) Les matériaux et le concept

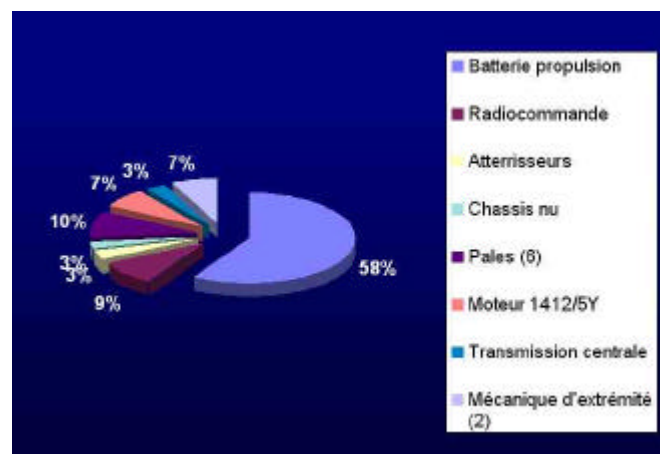
Les matériaux contribuent au gain de masse. Leur rôle est donc essentiel. La synergie est totale lorsque matériaux et concepts inventifs s'associent au développement des divers composants. Il est difficile d'en tirer une règle générale quand il s'agit de savoirs faire acquis au fil des années. On peut dire qu'un projet est abouti quand, avec du recul, on peut se dire que si c'était à refaire, on reprendrait les mêmes solutions. Heureusement ou malheureusement ce n'est pratiquement jamais le cas...

En résumé les choix de base sont les suivants :

- Tubes et joncs carbone (incontournables => les châssis, atterrisseurs, arbres de transmission, etc...)
- Plaques carbone pour les fonctions à ressort (suspension des porte-pales, atterrisseurs, etc...) et supports divers
- Tissus carbone ou mieux hybride carbone/kevlar (délicat à couper) pour les pales (fibres à 45°)
- L'aluminium (duralumin : aluminium+cuivre => série 2000) est le métal le plus intéressant pour les pièces usinées de liaison complexes, les moyeux, les manchonnages, etc...
 - . AU4G (2017A) le plus courant, ou mieux:
 - . AU4G1 (2024) qualité aéronautique
 - . AU2GN (2618A) qualité aéronautique voir www.lesnonferreux.com/index.html
- La visserie aluminium (sans problème sur une machine électrique) permet des gains très appréciables (difficile à trouver en dessous de M3)
- La visserie nylon (densité 1,15) n'est pas à écarter pour des cas très particuliers (articulation de pieds de pale : gros diamètre à faible densité). Avantage : visserie autofreinée
- Les plastiques divers : très décevants en terme de rapport masse/rigidité (à éviter le plus possible surtout pour des pièces usinées et non moulées)

3) Le budget de masse

La figure ci après est une synthèse d'un budget de masse pour une machine électrique performante. On remarquera essentiellement la capacité d'emport d'une telle machine qui atteint presque 60% c'est-à-dire la part de masse batterie.



D. La chaîne de transmission mécanique

Les moteurs électriques tournent vite, au voisinage de 15000t/mn. Les réducteurs sont donc incontournables. On distingue plusieurs types de réducteurs :

1) Réducteurs à engrenages droits ou coniques :

- En adoptant des couples plastique/plastique ou plastique/métal (pignon conique) en carter ouvert, on considère que les pertes sont très faibles.
- Ces solutions sont auto-lubrifiées et passent des couples très supérieurs à ceux indiqués dans les catalogues.
- Ce réducteur est inverseur et le rapport de réduction est important mais limité en général à 10 pour des raisons d'encombrement. La compacité est satisfaisante.
- Dans le cas d'entrées/sorties très écartées, on est amené à utiliser des arbres de transmission intermédiaires avec renvoi coniques. Cette solution est un peu lourde (plusieurs paliers) mais à faibles pertes.

2) Réducteurs épicycloïdaux :

- On ne les trouve en général qu'en carter fermé ce qui est facilité par leur très faible encombrement.
- S'ils ne sont pas trop miniaturisés on peut utiliser des couples plastique/plastique ou plastique/métal. Les pertes sont en principe faibles.
- Ces réducteurs n'inversent pas et leur rapport de réduction peuvent être important ainsi que les couples transmis.
- Les entrées/sorties sont nécessairement coaxiales

3) Réducteurs à courroies synchrones (courroies crantées) :

- Les pertes sont faibles ou pas très faibles selon la tension de la courroie. Le compromis souplesse de courroie / tension de courroie est difficile à trouver et dépend des applications.
- L'avantage réel réside dans la légèreté de cette solution.
- En principe l'inversion n'est pas possible sauf dans le cas de 2 enchaînements à rotation de 90° chacun (vrillage).
- Il est possible de changer la direction des entrées/sorties au détriment de pertes supplémentaires et seulement si l'écartement est au minimum de 8 fois le diamètre de la grande poulie.
- Dans le cas d'entrées/sorties très écartées, il faut un faible allongement de la courroie au couple nominal, soit un surdimensionnement et des pertes majorées (manque de souplesse). Le risque de battements n'est pas à négliger et il faut inventer des amortisseurs.
- Les rapports de réduction sont plus faibles qu'avec les engrenages. Un tendeur devient obligatoire lorsque la réduction est importante et l'écartement entrée/sortie faible.

E. La chaîne électrique

1) Les sources d'énergie

Bien que le problème le plus souvent cité soit celui du stockage de l'énergie, celui qui nous importe le plus est le transfert de l'énergie vers le moteur. Quand on dispose d'un modèle de batterie, le plus important est donc de connaître sa **résistance interne**.

Les rapports capacité/poids des principales technologies disponibles pour les machines volantes sont bien connus : si on affecte le NiCd du coefficient 1, le NiMh vaut environ 1,3 et le Li_Ion vaut au moins 3.

Si on définit le **courant utilisable** comme étant le courant ne produisant pas de pertes excessives et permettant des vols d'assez longue durée. Ce courant est à déterminer en fonction des exigences d'un cahier des charges. On peut alors définir un **courant utilisable maximum** (ou qu'il n'est pas souhaitable de dépasser) pour rester dans le raisonnable. Ce courant est alors défini en fonction de la capacité C (mAh) d'une batterie. La règle simple est alors la suivante :

- Pour du NiCd ne pas dépasser **4C**(mA) soit 15minutes
- Pour du NiMh ne pas dépasser **3C**(mA) soit 20minutes
- Pour du Li_Ion ne pas dépasser **2C**(mA) soit 30minutes

Pour notre record en Li_Ion on se situait entre 0,8C et 0,9C d'où des pertes internes minimales...

Si le courant utilisable n'est pas suffisant, il faut :

- doubler la capacité (mise en parallèle)
- augmenter le nombre d'éléments et choisir un moteur compatible en tension

Mais dans tous les cas il faut gérer la masse supplémentaire.

Enfin il faut être conscient que les batteries NiCd et surtout NiMh se caractérisent par une forte autodécharge mais une capacité de charge rapide qui les destinent à une utilisation directe sur le terrain de vol. L'effet « mémoire » du NiCd peut limiter ses performances. Le Li_Ion, condensateur quasi parfait, a donc une auto décharge pratiquement nulle mais demande une charge longue qui doit être préparée avant de venir sur le terrain.

2) Les moteurs

Les moteurs à aimants permanents sont soit à collecteur à balais soit sans balais (brushless). Les premiers ont des rendements de l'ordre de 70% et les seconds frisent les 90%. Quand on sait que les moteurs sans balais ont un rapport compacité/masse beaucoup plus favorable, sont sans entretien et d'une très grande fiabilité, le choix est rapidement fait entre ces deux technologies, hormis le prix. Les constructeurs sortent de plus en plus des moteurs brushless sans capteurs de position du rotor car les variateurs associés prennent en charge la séquence de démarrage.

Il est possible de réaliser des moteurs brushless à faible vitesse de rotation et fort couple (consulter : www.aerodesign.de/peter/) en adoptant une différence de une unité de nombre de pôles entre rotor et stator et un grand diamètre. En poussant ce concept à l'extrême, on peut se demander s'il est possible et avantageux de concevoir de tels moteurs pour application directe sans réducteurs sur des rotors coaxiaux: le rotor (aimants), extérieur, servant directement de tête rotor (à vitesse de rotation relativement élevée, de l'ordre de 2000t/mn) et stator au centre. Problème associé : nécessité de fabriquer des tôles spéciales...

3) Les variateurs

Les variateurs pour moteurs à balais sont simples et légers. Pour les moteurs sans balais le nombre d'étages de puissance les rend plus lourds.

Les variateurs basse tension (12V) fournissent l'alimentation de l'équipement radio (système BEC). Au dessus, l'alimentation de puissance et équipement radio sont séparés et la commande est souvent isolée par un coupleur opto.

En général les pertes sont faibles (quelques pour cents), mais il faut être attentif à leur rendement en cas d'utilisation continue à régime intermédiaire. Les variateurs brushless intègrent de plus en plus fréquemment le séquenceur de démarrage. On préférera les couples moteur/variateur du même constructeur pour être plus sûr du séquenceur de démarrage.

Il serait intéressant de disposer de variateurs effectuant un asservissement de la vitesse de rotation en rapport avec la tension basse de la batterie (valeur paramétrable).

F. Le comportement en vol

1) Optimisation énergétique et stabilité

L'optimisation énergétique n'est pas sans conséquences sur le comportement en vol. Ainsi :

- L'utilisation de pales ultra légères est antinomique de stabilité, en raison de la très faible constante de temps rotor associée, et de résistance aux turbulences
- Une très faible charge au disque est antinomique de résistance aux turbulences

Il est possible d'améliorer le comportement si les pales peuvent être encore allégée structurellement et plombée au bord marginal.

En outre, la sensibilité aux turbulences du système devient de plus en plus incompatible avec les réflexes d'un bon pilote à mesure que l'échelle du modèle diminue. Un système d'asservissement 3 axes devient alors indispensable. Deux approches¹⁰ sont possibles :

- stabilisation d'assiette asservie en vitesse qui réduit les rotations machine, en vitesse et amplitude, un peu à la manière d'une barre de Bell et nécessitant des corrections fréquentes de la part du pilote
- stabilisation d'assiette asservie en position qui permet, en moyenne, de conserver l'assiette d'origine, facilitant de façon appréciable la tâche du pilote

La mise en œuvre est cependant délicate en raison de la sensibilité des capteurs aux vibrations.

2) Vol dynamique et stationnaire

Le vol stationnaire est relativement gourmand en énergie (recyclage du vent de Froude)

Une réduction significative peut être obtenue en louvoyant continuellement par glissades latérales mais c'est un mode de pilotage à haute concentration et non sans risques... La situation en stationnaires est similaire avec un vent de face significatif (de l'ordre de 5 à 10m/s). On estime que le gain obtenu est dépendant à la charge au disque (ce qui n'a pas beaucoup d'effet sur notre machine de record extrêmement peu chargée). En outre, on constate que l'énergie cinétique de la machine en translation lisse l'effet déstabilisant des turbulences.

La réduction de la charge au disque entraîne un effet « planeur » considérable en translation et un effet « fusée » également considérable en vertical (effet renforcé par la présence d'un couple instantané avec les motorisations électriques).

III. CONCLUSION

Ce travail d'amateur, couronné par un record mondial de durée de vol, a permis de faire progresser les connaissances relatives à l'hélicoptère modèle réduit. Cependant, il reste encore des zones d'ombre importantes, notamment sur l'aérodynamique aux faibles nombre de Reynolds et sur la stabilisation de machines ultra légères.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Lefort et J. Hamann, L'hélicoptère "théorie et pratique", éditions Chiron
- [2] Rotary-Wings Aerodynamics, W.Z. Stepniewski, C.N. Keys, Dover publications USA

ANNEXE

« Notre record »

Voici 2 photos prises lors de notre record de durée, homologué FAI (1 heure, 6 minutes 56 secondes, le 29 Juin 2001) :

- La première montre les conditions moyennes du vol stationnaire maintenu pendant toute la durée de vol
- La deuxième prise par-dessous « fige » la position en quadrature des rotors (la forme de l'atterrisseur peut sembler bizarre, en fait son empreinte au sol est un hexagone)
- Les batteries sont constituées de 2x8 éléments Li_Ion 5,5Ah de Alcatel SAFT



¹⁰ approches dites « électroniques » sans barres de Bell.