

MINIMISATION DE L'ENERGIE DANS LES MACHINES A VOILURES TOURNANTES

François MARCEL marcelf@wanadoo.fr



Jacques BOYER boyer-j@wanadoo.fr

Pierre HERMET pihermet@club-internet.fr

Raymond DAUPHIN Raymond.dauphin@fr.thalesgroup.com

Journées Micro-Drones



18-20 Septembre 2002

MINIMISATION DE L'ENERGIE DANS LES MACHINES A VOILURES TOURNANTES

!!! Pour voler longtemps, il n'y a pas de petits gains, tout est important !!!

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 contenu est très vaste et revient à faire l'inventaire des gains énergétiques potentiels :

1. choix de la configuration des voilures tournantes
2. l'aérodynamique du rotor
3. la masse et la rigidité
4. la chaîne de transmission mécanique
5. la chaîne électrique
6. le comportement en vol

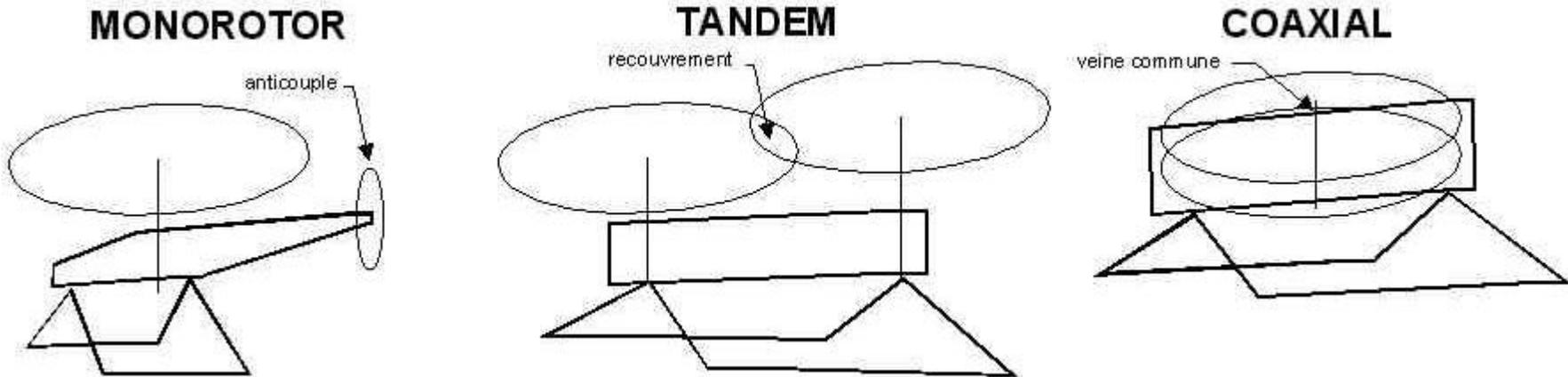
ANNEXE

- notre record

- nos travaux en cours

CHOIX DE LA CONFIGURATION DES VOILURES TOURNANTES

Rendement énergétique dépendant de la configuration => comparaison



Critères de comparaison **FAI*** => surface identique (3m² catégorie F3/F5, masse 5kg) et projections verticales

mono rotor (le rotor d'anticouple n'est pas pris en compte sauf si son plan est incliné) => **D**

bi rotors tandem ou côte à côte (s'il y a recouvrement, la surface commune n'est comptée qu'une fois) => **D/racine2**

bi rotors coaxial (une seule surface si l'espacement est inférieur à un rayon rotor) => **D**

Les configurations multi rotors (nx2) ne sont pas prises en compte

*FAI : Fédération Aéronautique Internationale

CHOIX DE LA CONFIGURATION DES VOILURES TOURNANTES

Unité pratique de comparaison => la **Puissance spécifique** [1] en W/kg

Attention : la puissance spécifique dépend fortement de la charge au disque => la comparaison ne s'applique qu'à des modèles directement concurrents

=> dimensions et masses très voisines

Exemple : machines limitées à 5kg

Mono rotor type F3 => 80 à 120W/kg

HBE_E (notre record) F5 => 42W/kg

(on peut faire mieux...)

articulé <= **Choix du type de rotor** [2] => **rigide**

Impact important sur la stabilité => déphasage / effet gyroscopique

Rotor articulé [3]

Rotor rigide (semi rigide)

Optimisation aérodynamique favorable

=> grand allongement

Contraintes mécaniques tolérables sans excès de masse

Contraintes mécaniques très défavorables :

=> excès de masse

=> aérodynamique défavorables (profils épais)

Applicable à tout type de configurations sauf aux rotors coaxiaux rapprochés

Réservé à des rotors coaxiaux rapprochés

[1] (puissance absorbée par le rotor / masse soulevée) à ne pas confondre avec la puissance embarquée => (puissance moteur / masse machine)

[2] non carénés

[3] libre en battement vertical et horizontal

Configurations **Tandem** <= choix énergétique difficile => **coaxial**

CONFIGURATION ROTOR	MONO		TANDEM / COTE A COTE		COAXIAL [2]		HYBRIDES
Nombre de rotors	1		2		2		nx2
Pertes aérodynamiques	Rotor de référence D [1] Pertes anticouple	0% 15%	Pertes par effet d'échelle (D/ 2) Pertes par recouvrement	2% 2%	Pertes pour rotor semi rigides	4%	Pertes par effet d'échelle (importantes)
Pertes mécaniques	vers l'anticouple	2%	de liaison inter rotor	4%	de liaison inter rotor	4%	
Pertes totales		17%		8%		8%	
Masse	Masse de référence	0%	2 x plus de pales mais plus légères. Pénalité châssis / transmission	qq%	Gain de masse sur châssis / transmission Pénalité de carénage	qq% ??%	

[1] D : diamètre du rotor, la comparaison entre les configurations se fait à surface identique

[2] Coaxial : configuration assimilable à un mono rotor dont le nombre de pales est double => rotors proches (de l'ordre de la corde). Contrarotativité 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

AERODYNAMIQUE DU ROTOR

Performances de translation <= Choix contradictoire => **performances de stationnaire**

- **Optimiser** la sustentation conduit à **uniformiser et minimiser** la vitesse du vent de Froude (moins l'air se dérobe sous le rotor, plus il est efficace)
- Choix d'un profil de stationnaire :
 - adaptés aux **faibles nombre de Reynolds** (plage 20000 à 100000)
 - avantage au **plus grand rapport Cz/Cx** [1]
- Conséquence : **profils très cambrés** (inconvenient : moment piqueur mais compensable) si possible à cambrure reculée (pour minimiser le moment piqueur)
- L'exploitation du profil est au moins aussi importante sinon plus que le choix du profil lui-même. Mais attention, entre un profil à finesse de 30 et un autre de 60, le gain énergétique ne sera que de l'ordre de 15% à 20% après optimisation de chaque solution
- Pour les petits modèles : le nombre de Reynolds devient un paramètre essentiel
- => **Comment trouver des experts de ce domaine (Reynolds<100.000) ???**

[1] pour une valeur élevée de Cz (autrement dit un profil pour lequel la finesse est maximale pour un Cz de 0,5 n'est pas très intéressant pour la performance de stationnaire)

AERODYNAMIQUE DU ROTOR

Diamètre & surface fixé Paramètres essentiels => nombre de pales, vitesse de rotation, corde

OPTIMISATION CHOIX HIERARCHISES	CONSEQUENCES FAVORABLES	CONSEQUENCES DEFAVORABLES	
Faible vitesse de rotation [1]	Gain en puissance spécifique	Faible nombre de Reynolds	Plus de pales ou grandes cordes
Faible charge au disque [2]			
Faible charge à la pale			
Grand allongement (petite corde)	Bonne efficacité	Faible nombre de Reynolds [3]	
Vrillage linéaire	Gain de l'ordre de 5%	aucune	
Triangulation [4]	Gain de l'ordre de 2%	aucune	
Bords marginaux	Efficacité à démontrer (empirisme)		
Carénage des rotors	Gain énergétique de l'ordre de 10%	Pénalité de masse à évaluer	

[1] Fort couple à transmettre, spectre vibratoire trop bas (rapports aux gyros)

[2] Sensibilité aux turbulences

[3] Flexibilité longitudinale ne favorisant pas la tenue des pales en statique (passage au dessus du châssis, anticouple)

[4] Forme en plan : de préférence un rectangle prolongé par un trapèze

AERODYNAMIQUE DU ROTOR

Expérimenter => Banc de mesure

Mesures aérodynamiques au banc constitué :

- d'un **poste de conduite** (PC plus boîtier d'interface avec le banc d'entraînement)
- d'un **banc électromécanique** d'entraînement de rotor

Paramètres :

- asservissement de la vitesse de rotation [1] avec séquence de démarrage automatique
- commande de l'angle de pas, commande du moteur
- mesure [2] de la vitesse de rotation, du couple, de la poussée, du courant et de la tension moteur
- paramétrage des paramètres internes du banc

Logiciel d'application spécialement développé :

- Séquencement des mesures préenregistrable
- Relevé automatique des courbes de couple et poussées en fonction de la vitesse de rotation (8 points[2]).
- Exploitation des résultats sur Excel

[1] la précision des mesures dépend de la qualité de l'asservissement

[2] le nombre d'échantillons prélevés pour chaque point de mesure est paramétrable

AERODYNAMIQUE DU ROTOR



AERODYNAMIQUE DU ROTOR

Modéliser le rotor => indispensable pour l'optimisation

3 domaines de modélisation* :

- **caractérisation du profil** utilisé via une soufflerie numérique (JavaFoil de Martin Epperle)
- **modélisation du rotor** (pales articulées libres ou avec moment de rappel) :
 - calcul aérodynamique (couple et poussée en fonction des paramètres fixés par l'utilisateur[1])
 - calcul mécanique (recul de pale, conicité, déformée de la pale longitudinale et transversale[2])
- **modélisation de la chaîne énergétique**

[1] le calcul mécanique (torsion résiduelle) est pris en compte dans le calcul aérodynamique

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

Outils d'optimisation : valeur cible et solveur

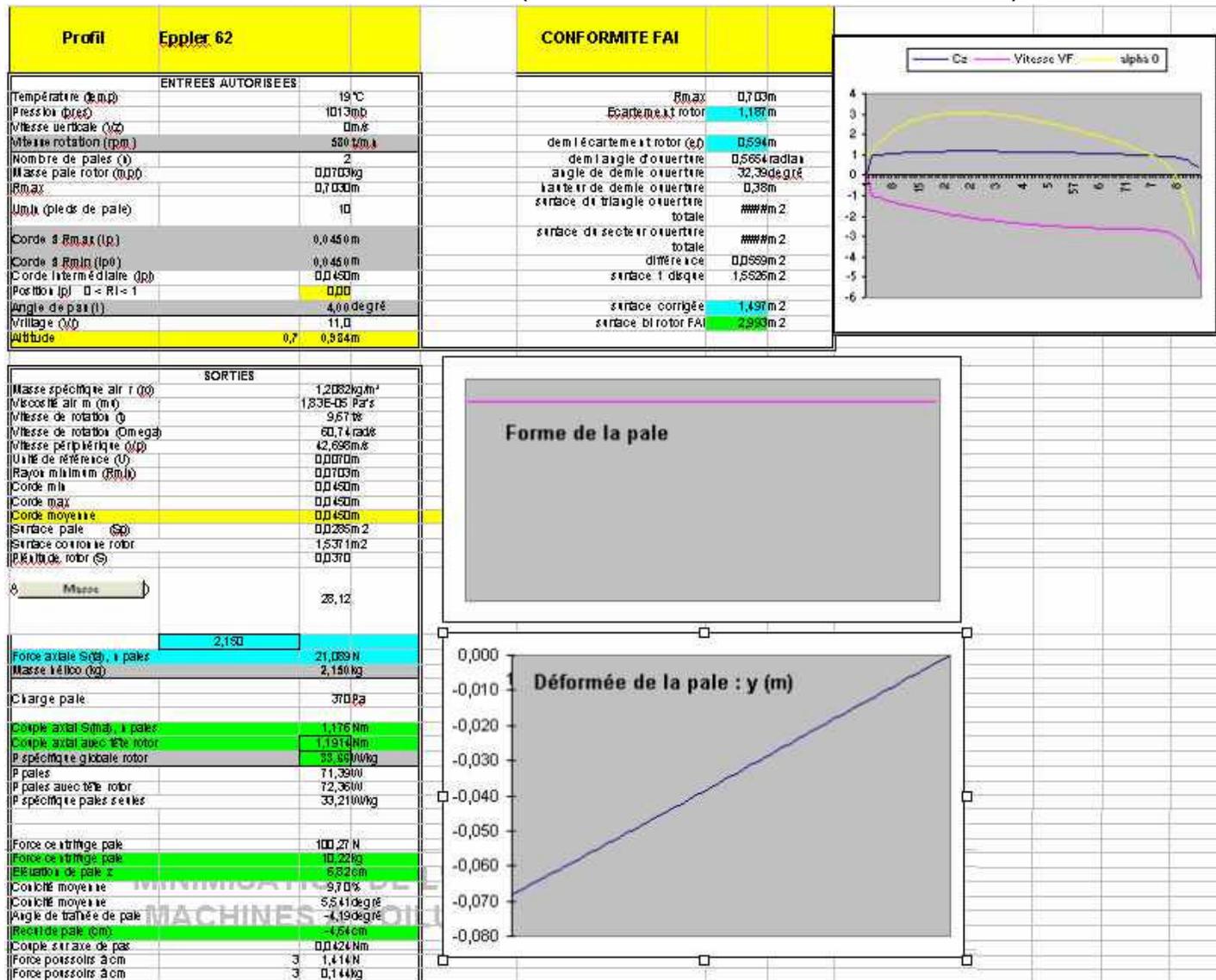
Vérification

La modélisation et les mesures expérimentales ont fait l'objet de comparaisons systématiques. Les écarts sont de l'ordre de quelques %

Connaissant la capacité des batteries et les pertes de la chaîne énergétique, les dispersions sur les durées de vol prédites ont été aussi de quelques %

*utiliser notre modèle PH72, nous consulter (ci après : aperçu partiel des entrées/sorties du tableur)

aérodynamique du rotor (MODELISATION DU ROTOR)



LA MASSE et LA RIGIDITE

La **performance** => directement liée aux gains de **masse** => cela ne doit pas se faire au détriment de la **rigidité**

Les structures

Le châssis

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

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. C'est 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).

LA MASSE (Les structures)



LA MASSE

Les matériaux

Les **matériaux** contribuent au **gain de masse**, leur rôle est **essentiel** => **savoir faire**

- 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...

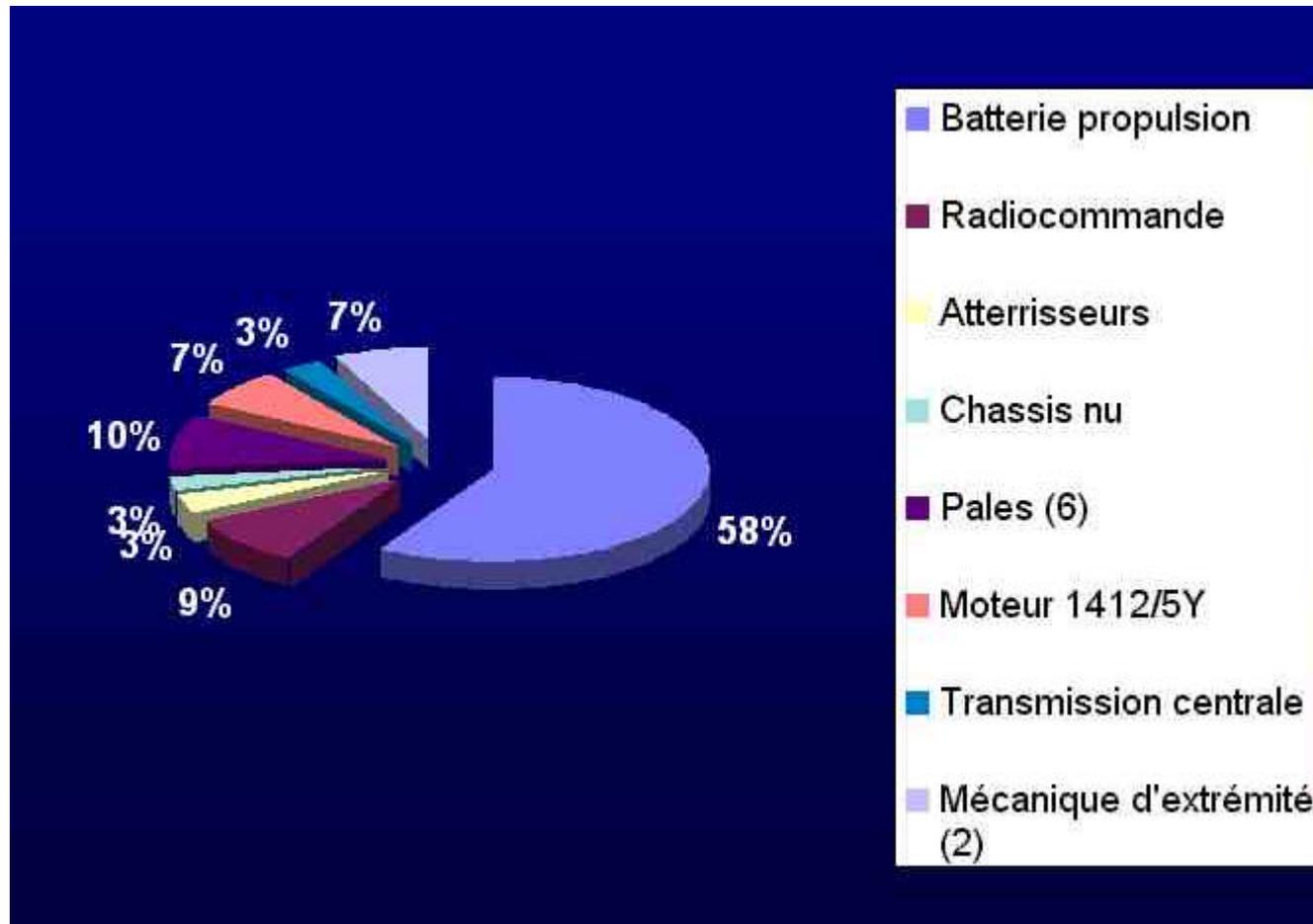
AU4G (2017A) le plus courant, ou mieux :

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
- 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)

LA MASSE (Exemple de budget des masses)



Masse totale = 4450gr

LA CHAINE DE TRANSMISSION MECANIQUE

Les **moteurs** tournent vite => les **réducteurs** sont **incontournables**

TYPES DE REDUCTEURS	REDUCTEURS A ENGRENAGES	REDUCTEUR EPICYCLOÏDAUX	REDUCTEURS A COURROIES SYNCHRONES
Pertes	très faibles	faibles	
Sens entrée/sortie	inverse	direct	
Rapport de réduction	importants	Très important	moyen
Changement de direction	Couples coniques	non	Vrillage nécessite un écartement important pertes importantes
Compacité	bonne	Très bonne	bonne
Entrée/sortie très écartées	Oui : arbre multipalier Avantage : faible perte Inconvénient : masse	Non : entrée/sortie coaxiale	Oui : courroie surdimensionnée Avantage : masse Inconvénient : pertes, battements

Réducteurs à **engrenages** => couples plastique/plastique ou plastique/métal en carter ouvert (autolubrification)
=> couples transmis peuvent être très supérieurs à ceux indiqués dans les catalogues

Réducteurs à **courroies** => compromis souplesse de courroie / tension de courroie difficile à trouver

=> tendeur obligatoire lorsque le rapport de réduction est important et l'écartement entré/sortie est faible

LA CHAINE ELECTRIQUE

Les sources d'énergie

Problème majeur => la **résistance interne** => dissipation dans la batterie

Types de batteries	NiCd	NiMh	Li_Ion
Rapport poids/capacité	Moyen (1)	Bon (1,3)	Excellent (>3)
Courant utilisable* maximum / temps	4 C /15mn	3 C /20mn	2 C /30mn
Autodécharge	moyenne	forte	négligeable
Utilisation	charger sur le terrain charge très rapide	charger sur le terrain charge rapide	charger un mois avant !!! charge lente

***Courant utilisable** => courant ne produisant pas des pertes excessives et permettant des vols d'assez longue durée. Courant à déterminer en fonction des exigences d'un cahier des charges.

=> **C** est la valeur de la capacité en Ah : 1**C** est le courant de décharge en 1 heure

=> considérer la chute de tension dans la résistance interne en plus de la tension nominale nécessaire au régime moteur

=> pour notre record on utilisait du Li_Ion entre 0,8C et 0,9C

Si le courant utilisable n'est pas suffisant :

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

LA CHAINE ELECTRIQUE

Les moteurs

Les moteurs sans balais (**brushless**) => un « **must** »

	Moteurs à balais	Moteurs sans balais (brushless)
Rendement / dissipation	70% / importante	90% / faible
Plage courant / tension	moyenne	supérieure
Compacité / masse	moyenne	très avantageuse
Entretien	à surveiller	aucun / grande fiabilité
Particularité		nouveaux moteurs sans capteurs de position rotor

La modélisation des « brushless » est simple à partir des paramètres : constante de vitesse (kV), courant de repos (I_0), résistance interne (R_i)

=> 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. Problème : nécessité de fabriquer des tôles spéciales...

=>Sujet de réflexion : peut on 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

LA CHAINE ELECTRIQUE

Les variateurs

	Pour moteurs à balais	Pour moteurs brushless
Concept	simple	complexe
Masse	légers	pénalisé par les étages de puissance
Perte / Echauffement	Faible (qq%, 2%)	
Fonctions annexes	Alimentation équipement radio : BEC (variateurs basse tension) Commande par couplage opto (pas de BEC) (variateurs haute tension) Séquenceur de démarrage pour les brushless	

Préférer les couples moteurs / variateurs du même constructeur. De telles motorisations peuvent avoir des pertes importantes lorsque la commande n'est pas poussée à son maximum

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

LE COMPORTEMENT EN VOL

Optimisation énergétique et stabilité

Antinomies	
Pales ultra légères (rotor à très faible constante de temps) <=>	=> stabilité et de résistance aux turbulences
Très faible charge au disque <=>	=> Résistance aux turbulences

Le compromis : travailler encore plus l'allègement des pales et les plomber à leur extrémités

La sensibilité du système aux turbulences 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 indispensable :

- stabilisation d'assiette asservie en vitesse
- stabilisation d'assiette asservie en position

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... Pourtant l'énergie cinétique de la machine en translation réduit l'effet déstabilisant des turbulences.

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

ANNEXE

NOTRE RECORD (29 juin 2001 => 1h 6mn 56s)



ANNEXE NOS TRAVAUX EN COURS

- Modélisation théorique relative à la stabilité, à la sensibilité aux turbulences et aux commandes (PH)
 - Cas des rotors à poussée vectorielle
 - Cas des rotors rigides
- Analyse vibratoire des corps en rotation (RD)
- Développement d'un ordinateur de bord (RD)
- Etude de carburants à fort pci (JB)
- Réalisation de pales et de têtes rotor à articulations élastiques (FM)