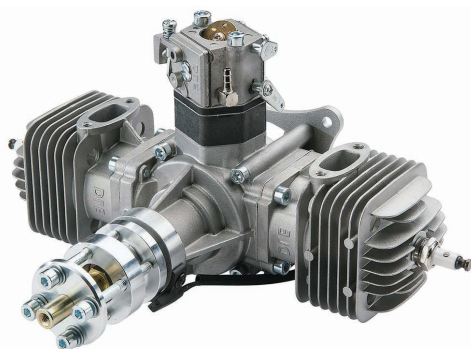
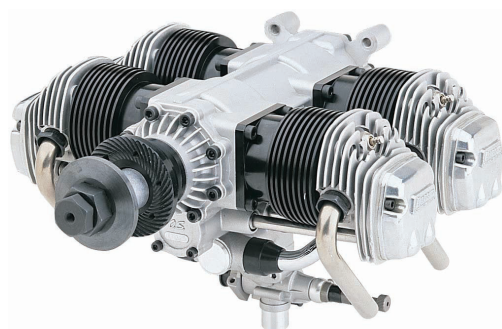
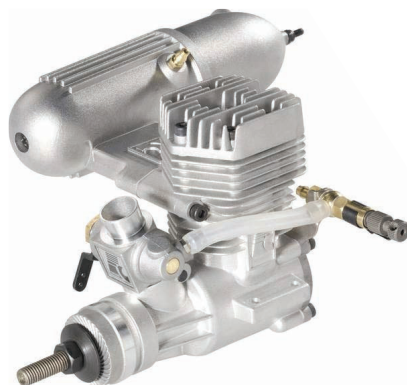


Théorie appliquée des moteurs [Deuxième partie]

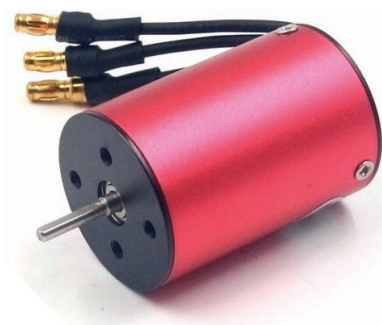
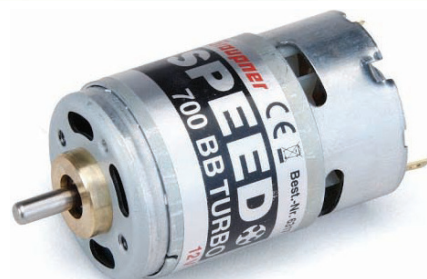
Après les hélices, je vous propose de vous faire découvrir les principes de fonctionnement de nos moteurs, tant électriques que thermiques. Toujours suivant la même approche : d'abord en essayant de montrer le sens physique et la logique des choses, puis en esquisant quelques modélisations numériques, sans oublier au passage de corriger quelques idées reçues. Certains se sentiront peut-être frustrés par le manque de détails techniques sur la construction et le fonctionnement interne de nos moteurs, je m'en excuse par avance. Mais là n'est pas l'objet de cette série d'articles, qui se concentre avant tout sur la manière dont fonctionnent globalement nos motorisations, et non sur comment cela est obtenu dans le détail.



Divers exemples de moteurs thermiques

En cohérence avec le premier dossier, nous allons continuer à manipuler la notion de puissance, qui est le fil conducteur de l'hélice jusqu'au modèle ; avec son pendant indissociable, le rendement, qui quantifie les pertes tout au long de la chaîne de propulsion. Certes, nous verrons comment calculer et mesurer un couple moteur, grandeur physique tangible comme la traction de l'hélice, mais ce n'est en réalité pas ce qui va nous intéresser le plus. En effet, à l'issu de cette série d'articles, nous allons « raccorder » tous les éléments de la chaîne de motorisation pour, in fine, pouvoir les choisir correctement, et c'est là où la notion de puissance va révéler tout son intérêt par rapport aux grandeurs physiques plus classiques.

En cohérence avec le premier dossier, nous allons continuer à manipuler la notion de puissance, qui est le fil conducteur de l'hélice jusqu'au modèle ; avec son pendant indissociable, le rendement, qui quantifie les pertes tout au long de la chaîne de propulsion. Certes, nous verrons comment calculer et mesurer un couple moteur, grandeur physique tangible comme la traction de l'hélice, mais ce n'est en réalité pas ce qui va nous intéresser le plus. En effet, à l'issu de cette série d'articles, nous allons « raccorder » tous les éléments de la chaîne de motorisation pour, in fine, pouvoir les choisir correctement, et c'est là où la notion de puissance va révéler tout son intérêt par rapport aux grandeurs physiques plus classiques.



Divers exemples de moteurs électriques

Quelques généralités sur les moteurs

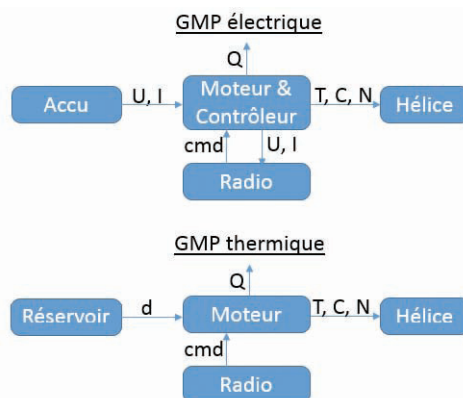


Schéma fonctionnel d'une motorisation (isolée de l'avion)

Le premier concept élémentaire à retenir est que, du point de vue de l'hélice, rien ne distingue vraiment un moteur électrique d'un moteur thermique ; dans les deux cas le moteur doit fournir le même couple (C), donc la même puissance mécanique à l'arbre (P), pour entraîner l'hélice à un régime donné (N). De son côté, l'hélice fournit une traction (T), que le moteur doit supporter et transmettre à l'avion (avec le couple). Le rendement

d'un moteur n'étant pas parfait, une partie de l'énergie consommée par le moteur est dissipée dans l'environnement, sous forme de flux thermique (Q). Ces grandeurs physiques s'expriment d'ailleurs dans les mêmes unités quel que soit le type de moteur. En particulier, même s'il est usuel de parler en CV (chevaux-vapeurs) quand il s'agit de la puissance des moteurs thermiques, l'unité de référence est le watt, comme pour les moteurs électriques. La similitude ne s'arrête pas là car, si on considère la chaîne de motorisation dans sa globalité, le fonctionnement n'est pas fondamentalement différent. Dans les deux cas, il s'agit de la conversion d'une énergie chimique (carburant liquide stocké dans le réservoir ou sous forme ionique dans la batterie) en une énergie mécanique (rotation d'un arbre moteur), et avec un certain flux d'énergie (d pour le débit carburant et I pour l'intensité du courant électrique). La différence fondamentale entre ces deux modes de propulsion est l'endroit où se produit le processus de dégradation chimique et la nature de l'énergie intermédiaire : d'un côté combustion interne au moteur avec génération de gaz sous pression, et de l'autre oxydoréduction externe au moteur (dans la batterie) avec génération de courant électrique.

Un autre concept essentiel à retenir : comme pour les hélices, le rendement d'un moteur n'est pas une constante. Il est nul quand le moteur ne fournit pas de puissance, par exemple quand il tourne à vide (aucun couple fourni) et quand il est bloqué (aucune vitesse). Le meilleur rendement se situe toujours à un régime plus proche du régime à vide (No) que celui du blocage, et le rendement chute de part et d'autre de ce régime. A noter que, pour les moteurs thermiques, on parle plutôt de consommation spécifique (généralement en g/(kw.h) : gramme par kilowatt et par heure), ce qui traduit le rendement de conversion de l'énergie chimique du carburant en l'énergie mécanique restituée à l'arbre.

Enveloppe d'utilisation d'un moteur

Deux conséquences pratiques découlent de la forme en cloche de la courbe de rendement, définissant la plage d'utilisation d'un moteur électrique :

- si on le charge trop (hélice trop grande), le courant augmente et le rendement baisse, ce qui augmente doublement la puissance non transmise à l'hélice. Cette dernière se traduit en échauffement du moteur, avec un risque d'endommagement s'il est trop important (les aimants perdent leur magnétisme et le vernis des fils de bobinage fond, jusqu'au « court-circuit fatal »).

- a contrario, si on charge trop peu le moteur (hélice de pas et/ou de diamètre trop faible), la puissance consommée est faible et le rendement est mauvais, ce qui réduit doublement la puissance transmise à l'hélice. Le moteur n'est alors plus qu'un poids mort pour l'avion. Une illustration classique du second cas de figure est l'utili-

sation d'un moteur-réducteur entraînant à faible régime une grande hélice à faible pas, misant tout sur la traction statique. Or, en vol, la traction chute fortement, donc la charge sur le moteur et in fine la puissance à l'arbre chutent aussi, avec un piètre résultat malgré l'impression trompeuse de forte puissance au sol.

Les bornes d'utilisation d'un moteur thermique se définissent de manière similaire à celle de son homologue électrique :

- si on le charge trop, le moteur force et chauffe, faute de refroidissement suffisant car l'hélice tourne moins vite. Des problèmes de carburation se posent aussi, car une vitesse de rotation trop basse donne une vitesse de passage de l'air dans le carburateur (qui est plein ouvert) insuffisante pour aspirer correctement le carburant. Cela rend le moteur très sensible aux variations de pression en entrée du carburateur : d'air, variant avec la vitesse de vol, et de carburant avec la pente de montée. C'est généra-

lement cette sensibilité qui fixe la limite d'utilisation d'un moteur, l'échauffement pouvant facilement être réduit par une augmentation de la richesse (et donc de la consommation de carburant).

- si on le charge trop peu, le moteur va s'endommager par sur-régime : usure globale rapide, ovalisation de la tête de bielle, casse de segments, etc. Ces phénomènes peuvent être largement aggravés par une lubrification insuffisante, avec des conséquences connues comme par exemple chez OS le « pelage » des chemises ABN ou la rupture de ressorts de segments sur les Wankel. Pourtant la documentation du constructeur est très claire : respectivement 18% et 25% d'huile mini, avec une part de ricin impérative pour le second et conseillée pour les premiers. En respectant ces préconisations et en faisant attention aux autres paramètres de fonctionnement (adaptation de l'hélice et réglage de la richesse), ces moteurs sont autrement plus durables qu'on peut l'entendre.

Conventions symbolique et formulaire

Pour tous les types de moteur :

- ➔ P_arbre : puissance à l'arbre, en W (watt)
- ➔ C_arbre : couple, en N.m (newton mètre)
- ➔ N : régime de rotation, en tr/min (tour par minute) ou tr/s (tour par seconde)
- ➔ N0 : régime de rotation à vide (couple nul)

Dans le cas d'un moteur électrique :

- ➔ P_elec : puissance électrique, en W (watt)
- ➔ U : tension d'alimentation, en V (volt)
- ➔ I : intensité du courant, en A (ampère)
- ➔ I0 : intensité du courant à vide
- ➔ η (eta) : rendement (sans unité)
- ➔ KV : constante de régime à vide, en tr/(min.V) (tour par minute et par volt)
- ➔ R (ou Ri) : résistance interne, en Ω (ohm)
- ➔ R0 : résistance interne à vide

Les relations entre ces variables :

- ➔ P_arbre (W) = C_arbre (N.m) x N (rad/s)
- ➔ P_elec = I (A) x U(V)
- ➔ eta = P_arbre / P_elec

Un rappel sur les unités :

- ➔ N (rad/s) = 2 x Pi x N (tr/s), avec Pi = 3.1416...
- ➔ N (tr/s) = 1/60 N (tr/min)
- ➔ 1 CV = 735 W (= 0.375 kW)
- ➔ 1 N ≈ 0.1 kgf (kilogramme force)

Comment caractériser les moteurs ?

Toutes les variables (couple, puissance, etc.) sont généralement représentées sous la forme de courbes établies en fonction du régime de rotation. Seules la condition plein gaz est étudiée, car le moteur est par nature capable de moduler sa puissance en-dessous (mais pas au-dessus...). C'est aussi le cas en automobile, les courbes de puissance et de couple ne sont établies que pied au plancher. Comme pour les hélices, la connaissance du fonctionnement [du point de vue de la puissance à fournir pour voler] de nos moteurs repose donc sur ces courbes, ainsi que les valeurs typiques en découlant, qui là aussi peuvent soit être mesurées sur banc d'essai soit calculées par des outils de simulation.

Trois types de banc d'essai permettent de les mesurer :

Banc dyno :

le moteur entraîne soit un frein (électromagnétique, à friction, à eau, etc.) soit des hélices de tailles suffisamment différentes pour couvrir toute la plage de régime utilisable du moteur. Les hélices ne servant que de frein, elles

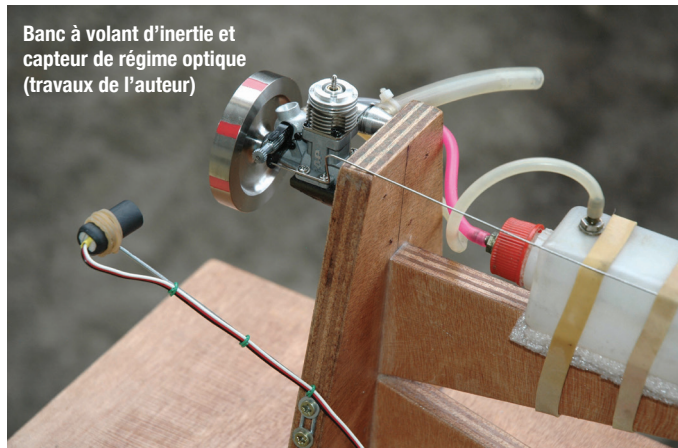
peuvent ici être recoupées sans état d'âme pour aller chercher des régimes élevés. Le couple et éventuellement la traction d'hélice (même si on a vu précédemment que cela avait une utilité très réduite) sont mesurés à chaque fois ; grâce à des pesons à ressort (voir essais de Pierre Delfeld) ou des balances, tandis que le régime est mesuré au compte-tour. C'est le banc le plus classique.

Banc à inertie :

Le moteur entraîne un volant d'inertie dont le régime de rotation est enregistré en temps réel. Le couple est calculé a posteriori, via la variation de régime rapportée à l'inertie. C'est un banc très simple à mettre en œuvre dans le principe, mais il nécessite un système d'acquisition rapide (plusieurs kHz) et une bonne caractérisation de l'inertie et de la traînée aérodynamique du volant. De plus, il n'est pas idéal avec les moteurs à la carburation trop sommaire, qui nécessitent un re-réglage du pointeau en fonction du régime.

Banc simple à hélice :

Plusieurs hélices de différentes tailles et de caractéristiques connues sont testées dans la plage de fonctionnement du moteur sur un simple banc de mise en route. Pour chacune, le régime est mesuré au compte-



tour et la puissance à l'arbre est calculée a posteriori grâce au coefficient C_{po} de l'hélice. Ce dernier peut être donné par le constructeur (voir le site APC par ex.), mesuré ou calculé (PredimRC par ex.). Sinon, à

défaut d'un calcul avec le C_{po}, on peut aussi utiliser l'outil de simulation d'hélice du logiciel DriveCalc. C'est la solution la plus efficace au moindre coût, il suffit de quelques hélices et d'un compte-tour.

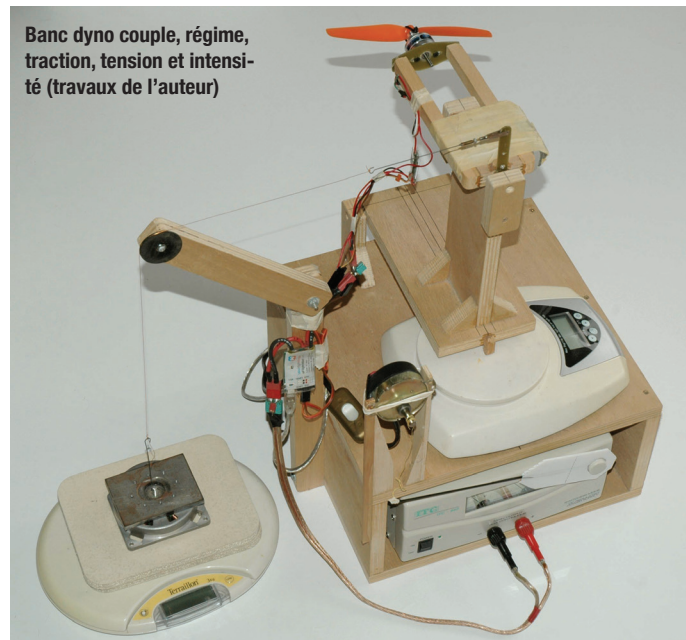
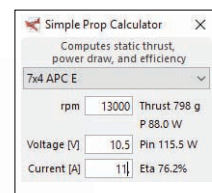
Hélice APC 7x4 Sport (données APC)

```

7x4 (7x4.dat) 12/24/14
===== PERFORMANCE DATA =====
(versus advance ratio and MPH)
DEFINITIONS:
J=V/nD (advance ratio)
Ct=T/(rho * n**2 * D**4) (thrust coef.)
Cp=P/(rho * n**3 * D**5) (power coef.)
Pe=Ct**2/Cp (efficiency)
V (model speed in MPH)
PROP RPM = 13000
    
```

V (mph)	J (Adv Ratio)	Pe	Ct	Cp	PWR (Hp)	Torque (In-Lbf)	Thrust (Lbf)
0.0	0.00	0.0000	0.1135	0.0473	0.140	0.678	1.467
2.3	0.03	0.0640	0.1129	0.0479	0.142	0.690	1.459
4.7	0.05	0.1251	0.1121	0.0488	0.145	0.702	1.449
7.0	0.08	0.1832	0.1112	0.0495	0.147	0.713	1.437
9.4	0.11	0.2385	0.1101	0.0502	0.149	0.723	1.423
11.7	0.14	0.2909	0.1087	0.0508	0.151	0.732	1.405
14.1	0.16	0.3406	0.1071	0.0513	0.152	0.739	1.384
16.4	0.19	0.3875	0.1052	0.0517	0.154	0.744	1.360
18.8	0.22	0.4317	0.1030	0.0519	0.154	0.748	1.331
21.1	0.24	0.4732	0.1005	0.0520	0.154	0.749	1.299
23.4	0.27	0.5120	0.0977	0.0519	0.154	0.748	1.265
25.8	0.30	0.5482	0.0946	0.0516	0.153	0.744	1.223
28.1	0.33	0.5818	0.0912	0.0512	0.152	0.737	1.179
30.5	0.35	0.6127	0.0874	0.0505	0.150	0.727	1.130
32.8	0.38	0.6409	0.0831	0.0494	0.147	0.711	1.074
35.2	0.41	0.6663	0.0783	0.0480	0.142	0.691	1.012
37.5	0.44	0.6889	0.0735	0.0464	0.138	0.668	0.950
39.9	0.46	0.7087	0.0685	0.0447	0.133	0.644	0.885
42.2	0.49	0.7256	0.0634	0.0428	0.127	0.616	0.820
44.5	0.52	0.7397	0.0582	0.0407	0.121	0.586	0.752
46.9	0.54	0.7510	0.0529	0.0383	0.114	0.551	0.683
49.2	0.57	0.7594	0.0474	0.0357	0.106	0.514	0.613
51.6	0.60	0.7640	0.0419	0.0328	0.097	0.472	0.541
53.9	0.63	0.7640	0.0362	0.0296	0.088	0.427	0.468
56.3	0.65	0.7579	0.0304	0.0262	0.078	0.377	0.393
58.6	0.68	0.7410	0.0245	0.0225	0.067	0.324	0.317
61.0	0.71	0.7013	0.0185	0.0187	0.055	0.269	0.239
63.3	0.73	0.6190	0.0124	0.0147	0.044	0.211	0.160
65.6	0.76	0.4409	0.0062	0.0107	0.032	0.154	0.080
68.0	0.79	-0.0057	0.0000	0.0068	0.020	0.099	-0.001

Hélice APC 7x4E (DriveCalc)



Régime au sol (tr/min)	13000	Type de pale	Normale
Régime à vide (tr/min)	16000	Diamètre (")	7.00
Cp0 : 0.048	Ct0 : 0.105	Pas géo. (")	4.00
eta_max : 65%	J_max : 0.57	Pas aéro (")	4.80
Graphique Cp Ct η vs J		T statique (gf)	582
		Nombre de GMP	1
		T statique tot. (gf)	582

Hélice type APC 7x4 Sport sous PredimRC (travaux de l'auteur)

Que ce soit au banc dyno ou au simple compte-tour, les essais avec hélices sont les plus favorables à la caractérisation de nos moteurs. D'une part le moteur est correctement refroidi par l'hélice, et d'autre part cela permet, pour chaque hélice, un

re-réglage optimal du pointeau des moteurs thermiques. Le banc dyno est le plus précis, car le couple est directement mesuré au lieu d'être déduit d'un coefficient C_{po}, qui présente une petite variabilité d'une hélice à l'autre. Quant au banc à

OS .10 FP

inertie, il donne des résultats immédiats, mais est le plus délicat à mettre en œuvre.

En utilisant la dernière méthode, le banc simple à hélice, s'improviser testeur de moteur est donc assez aisé, seuls quelques outils courants sont nécessaires (et même indispensables dans la caisse à outil de tout modéliste) :

- un jeu suffisamment important d'hélices pour couvrir la plage de régime plein gaz du moteur
- un compte-tour pour mesurer le régime de rotation, plus un bout de scotch papier (accroché à l'arbre ou sur la cloche du moteur) pour servir de cible lors de mesures à vide
- un ampèremètre et un voltmètre ou, encore mieux et plus pratique, un wattmètre.

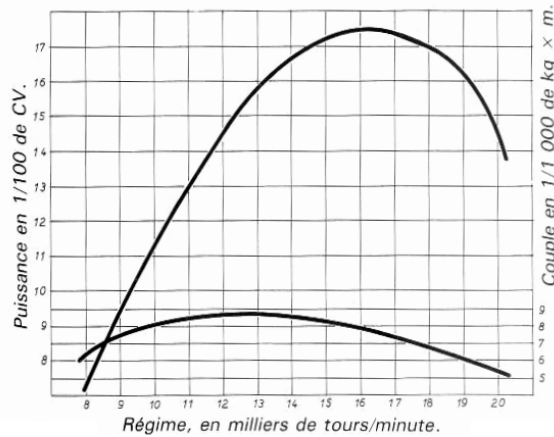
Les moteurs thermiques

Nous entrons maintenant dans le vif du sujet, en commençant par les moteurs thermiques.

Voici un extrait d'un essai réalisé par Pierre Delfeld qui, comme son alter-ego Peter Chinn côté US, a mis au banc un nombre considérable de moteurs dans les années 70 à 90 (voir rubrique liens / bibliographie).

Les courbes sont tracées en les faisant passer par les points (régime et couple) mesurés avec les différentes hélices testées, plus quelques-unes plus petites pour aller des chercher des régimes au-delà de la puissance maxi. Ces dernières ne sont pas représentées par Pierre Delfeld dans le tableau des essais, car inutilisables en vol. En effet, le moteur prenant naturellement des tours en l'air, que ce soit en palier et encore plus avec du badin, l'hélice doit être choisie de telle manière que le moteur tourne au sol à un régime inférieur à celui de puissance maxi, sous peine d'être en sur-régime en l'air. Et cela inutilement, puisque le moteur va fournir une puissance inférieure à la puissance max et se dégrader rapidement (plus la gêne sonore...).

Cette anticipation du régime en vol est la règle d'or de l'adaptation du moteur à l'hélice. Le choix du pas est à ce niveau primordial car, comme on l'a vu précédemment, un pas trop faible va faire mouliner le moteur dès que l'avion aura pris de la vitesse, avec un



Conditions des essais : Pression barom. 767 mm mercure. Température 21° C. Humidité relative 72 %. Glow-plug OS n° 1. Silencieux d'origine. Carburant 75/20/5 nitro.

Tableau des essais					
Hélices			Vitesse	Bruit (d B)	Pression
Dim.	Marque	Matière			
6 x 4	Dynamic	Nylon + fibres	16 450	83	32 mB
7 x 3	Super Record	Bois	15 000	81	31 mB
7 x 4	Tornado	Polyester + fibres	14 150	82	29,5 mB
7 x 4	Power Prop	Bois	13 050	80	26 mB
7 x 4	Dynamic	Nylon + fibres	11 600	79	24 mB
7 x 4	Super	Nylon + fibres	13 050	81	26 mB
7 x 5	Super	Nylon + fibres	11 450	80	25 mB
7 x 6	Dynamic	Nylon + fibres	10 600	79	20 mB
8 x 3,5	Power Prop	Bois	10 850	80	20 mB
8 x 4	Tornado	Polyester + fibres	10 700	81	18 mB

Diagramme de distribution : Transferts : 130° après PMH à 130° avant PMH (100°). Schnurle : 156° après PMH à 156° avant PMH (48°). Echappement : 107° après PMH à 107° avant PMH (146°). Admission : 140° avant PMH à 50° après PMH (190°).

Essai de l'OS .10 FP, revue MRA n° 585 d'août 1988 (travaux de Pierre Delfeld)

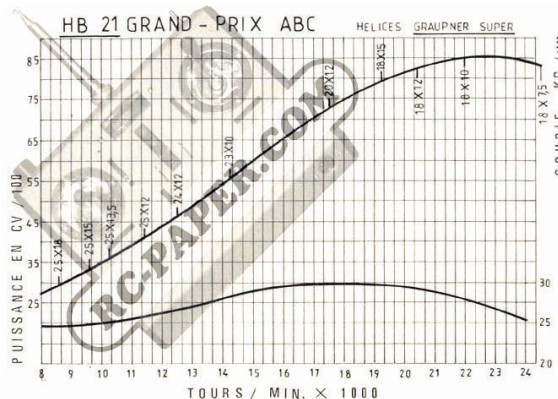


TABLEAU DES ESSAIS					
cm	Pas cm	Pouce	MARQUE	MATIERE	VITESSE
28	15	11 x 6	Graupner-Super	Nylon fibre	7 800 tours/mn
25	18	10 x 7			8 500
26,5	15	10,5 x 6			8 600
25	16,5	10 x 6,5			8 900
25	15	10 x 6			9 600
23	18	9 x 7			9 700
25	13,5	10 x 5,5			10 200
23	15	9 x 6			10 800
25	12	10 x 5			11 400
25	10	10 x 4			12 400
24	12	9,5 x 5			12 500
23	12	9 x 5			12 800
25	8	10 x 3			14 200
23	10	9 x 4			14 200
20	15	8 x 6			14 600
20	12	8 x 5			17 500
20	10	8 x 4			18 700
18	15	7 x 6			19 200
19	12	7,5 x 5			19 800
18	12	7 x 5			20 400
18	10	7 x 4			22 000
18	7,5	7 x 3			24 500

Essai du HB 21 GP-ABC, revue RCM N°26 de juin 1983 (travaux de J-C. Cousson)

rendement médiocre et un risque d'usure rapide du moteur.

On pourra regretter que ces essais détaillés soient passés de mode dans les revues depuis quelques années, même pour les moteurs thermiques qui ont encore le vent en poupe comme les gros cubes à essence et les multicylindres. Comment faire alors ? Là aussi, une petite recherche sur internet (forum, sites constructeurs) permet généralement de trouver quelques régimes avec différentes hélices. Via le Cpo de l'hélice, on peut alors recalculer la puissance associée et donc reconstruire une courbe puissance / régime à peu près correcte. Sinon, si on dispose du moteur, il est toujours possible comme vu de faire ses propres mesures sur banc d'essai.

Dernière possibilité, c'est l'exploration des archives d'essais de moteurs similaires (voir liens / bibliographie), en partant du principe que, à iso technologie (2 ou 4 temps, valve rotative ou à clapet, balayage en boucle ou Schnurle, sur roulements ou palier, avec pot classique ou résonateur, etc.) et carburant, la courbe de puissance sera toujours très similaire d'un moteur à l'autre si le régime max est similaire, même si 20 ans les séparent.

On pourra noter au passage que, pour une cylindrée donnée, la puissance max augmente significativement avec le régime que ce soit en 2 et 4 temps. Par exemple, dans les références « classiques » de chez OS, voici quelques moteurs de 3.5 cc de cylindrée, tous testés avec le même carburant standard (5% de nitro et 20% d'huile, essais de Pierre Delfeld et Peter Chinn) :

- ➔ .20 RC : 0.3 cv (220 W) à 13000 tr/min (palier lisse, balayage en boucle, pot standard)
- ➔ .20 FP : 0.4 cv (290 W) à 16000 tr/min (palier lisse, balayage Schnurle, pot standard)
- ➔ .21 FSR : 0.7 cv (515 W) à 22000 tr/min (roulements, balayage Schnurle, pot standard)
- ➔ .21 RX : 1.3 cv (955 W) à 32000 tr/min (roulements, balayage Schnurle, résonateur)

Pour rappel, il s'agit de puissance à l'arbre. Un moteur électrique de même puissance et, par exemple, d'un rendement de 75% consommera donc une puissance électrique de, respectivement, 293, 387, 687 et 1273 W pour fournir la même rotation d'hélice..

Les moteurs électriques

En modélisme, on distingue deux types de moteur électrique :

→ « brushed » : à aimants fixes et bobinage lié au rotor, avec distribution du courant par un collecteur tournant entre deux balais.

→ « brushless » : à aimants lié au rotor et bobinage fixe, avec distribution du courant par une électronique de commutation triphasée.

Le niveau de performance des premiers est sensiblement moins bon (versus le second) pour les moteurs à aimants ferrite, et presque équivalent pour ceux à aimants néodyme ou samarium-cobalt (Graupner Ultra, Robbe Keller, etc., pour ceux qui s'en rappellent), avec cependant une masse bien plus importante.

Les moteurs brushless peuvent être à rotor interne (« inrunner ») ou externe (cage tournante, « outrunner »), avec des différences de performance et de masse pas aussi flagrantes qu'on peut l'entendre. Ce qui distingue surtout ces deux technologies est le nombre de pôles magnétiques et le bras de levier entre les aimants et l'axe de rotation, les deux étant plus importants sur les cages tournantes et permettant d'obtenir des régimes plus bas. Les moteurs à cage tournantes présentent aussi l'avantage

d'un meilleur refroidissement, grâce à la rotation de la cage dans l'air ambiant.

Le fonctionnement d'un moteur électrique est bien moins simple à étudier qu'il n'y paraît, car ses performances sont interdépendantes de celles de l'accu qui l'alimente. En effet, pour un même nombre d'éléments donnés, la tension à l'entrée du moteur n'est pas une constante mais est fixée par un équilibre entre l'accu (aux performances très variables, suivant la marque, mais aussi l'âge et la température, nous le détaillerons plus tard) et le moteur : plus ce dernier est chargé et plus il consomme du courant, et plus le premier (à cause de sa résistance interne) voit sa tension baisser et module donc l'intensité à la baisse, et inversement.

Nous n'en dirons pas plus pour l'instant, l'accu sera étudié dans le troisième volet de cette série d'articles. Pour l'instant, nous considérerons dans tout ce qui suivra que la tension est une constante. C'est d'ailleurs pour cette raison que tous les essais sérieux de moteurs électriques se font avec une alimentation stabilisée (réglable, de préférence) et non avec un accu, de manière à parfaitement maîtriser la tension en entrée du moteur. Les essais sont ainsi indépendants de la variabilité importante des accus, et donc reproductibles et comparables entre eux.

Pour l'instant, penchons-nous donc sur le moteur, ou plutôt sur l'ensemble moteur-contrôleur qui sera considéré comme un objet unique du point de vue fonctionnel. Pour deux raisons : d'une part le contrôleur est quasi totalement transparent (autour de 0.1 à 0.2%, hors courant prélevé par le BEC pour alimenter la radio). La seule précaution à prendre est simplement de vérifier qu'il est compatible avec la tension et l'intensité d'utilisation. L'autre raison est spécifique aux moteurs brushless, leur fonctionnement étant intimement lié à celui du contrôleur et impossible sans ce dernier.

Si on considère donc l'ensemble moteur électrique et contrôleur globalement, un moteur « brushed » et un moteur « brushless » se comportent strictement de la même manière, indépendamment de leur technologie : le moteur peut être assimilé à une résistance en série avec une fem (force électromotrice). Il absorbe une puissance électrique et en restitue une partie en puissance mécanique à l'arbre, le reste étant perdu par échauffement (effet Joule).

En première approximation, on a les équations suivantes :

$$N \approx (U - R_0 \cdot I) \cdot KV$$

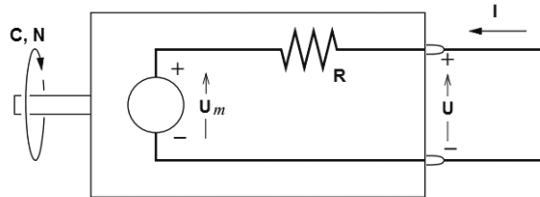
$$C \approx \frac{I - I_0}{KV} \approx \frac{(U - R_0 \cdot I) \cdot (I - I_0)}{N}$$

Avec : I_0 l'intensité à vide, R_0 la valeur à froid de R (noté aussi R_i) et KV la constante de régime à vide ramené à la tension (en tr/min/V).

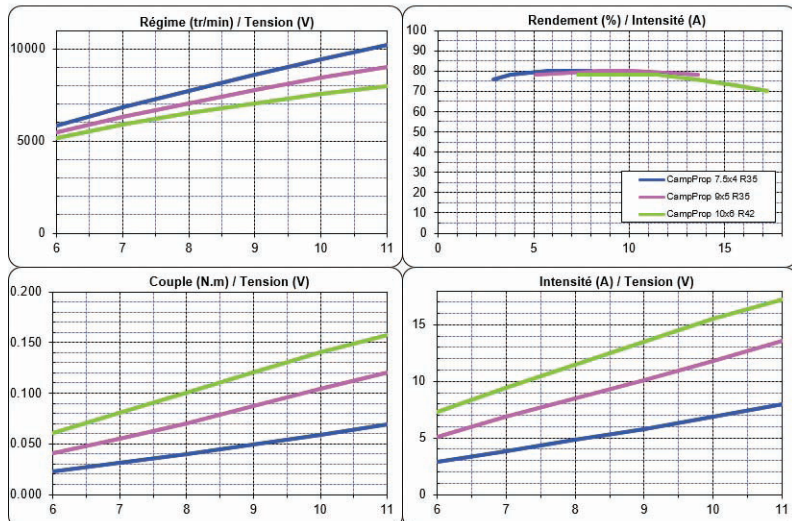
A noter : à vide et à la tension nominale d'utilisation du moteur, $R_0 \cdot I_0$ est en général largement négligeable devant U , on a alors : $KV \approx N_0/U$.

Il suffit donc de connaître I_0 , R_0 et KV pour caractériser un moteur électrique. Mais, manque de chance, les choses ne s'avèrent pas aussi simples en pratique car les deux premières valeurs ne sont généralement pas documentées par les constructeurs (ou mal). On peut les mesurer soi-même, ce qui est simple pour le KV (via l'approximation ci-avant) et I_0 , mais nettement plus délicat pour la résistance interne, comme le montre par exemple le papier d'Alain Kovaleff sur son blog :

<http://le-blog-modelisme-rc-de-hal.over-blog.com/2020/04/mesures-moteur-hyperion-h3025-08-sur-le-calmato.html>



Matériel essayé :	Moteur : TURNIGY C3530-1100	Valeurs typiques mesurées :	Rpm0 (10V) : 10500 tr/min	Conditions
	Type : BL sensorless rotor externe		I0 (10V) : 0.96 A	Temp = 20°C
	Contrôleur : MDHFLY 30A		Rendement max : 80% @ 10A	Alt = 200m



Modélisation d'un moteur électrique (quelle que soit sa technologie)

Courbes mesurées sur banc à tension réglable (travaux de l'auteur). A noter la bonne superposition des courbes de rendement (obtenues avec trois hélices très différentes pour couvrir toute la plage de fonctionnement du moteur), c'est un bon indicateur de la qualité des mesures.

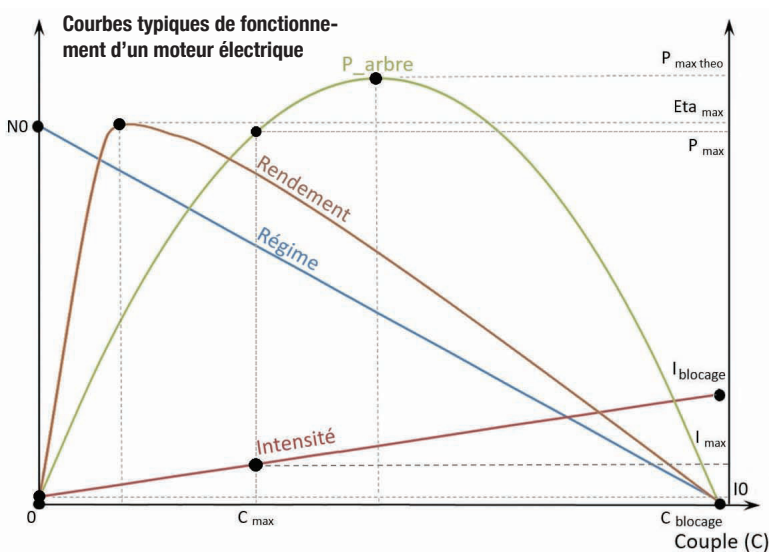
Sur ce papier, on notera que, si le KV mesuré correspond bien à la donnée constructeur (seulement 5% d'écart : 970 -> 1018), les autres valeurs mesurées diffèrent très sensiblement : +69% sur I_0 (3.5 A -> 2.2 A), +185% sur R_i (0.014 ohms -> 0.04 ohms). On peut légitimement se demander lesquelles sont justes (voir ci-après) et, surtout, que valent les calculs et logiciels de simulation basés uniquement sur ces valeurs. En particulier, on peut mentionner eCalc, vendu comme étant « the most reliable RC Calculator on the Web » et qui pourtant ne fournit aucune indication sur ses sources, les calculs utilisés ou le recalage entre les résultats et

la réalité. A contrario, DriveCalc n'utilise pas de valeur brute de R_o et I_o mais les recalcule à partir d'un panel de mesures au banc, panel auquel l'utilisateur a accès et qui fait l'objet d'une vérification de fiabilité (suivant l'étendue et le recouplement des mesures). Vous en tirerez les conclusions qui s'imposent. Mettons que toutes ces valeurs soient correctement connues, on peut alors tracer – grâce aux équations précédentes – ce type de graphique qui décrit tout le domaine de fonctionnement (plein gaz) du moteur, de la vitesse à vide au couple de blocage :

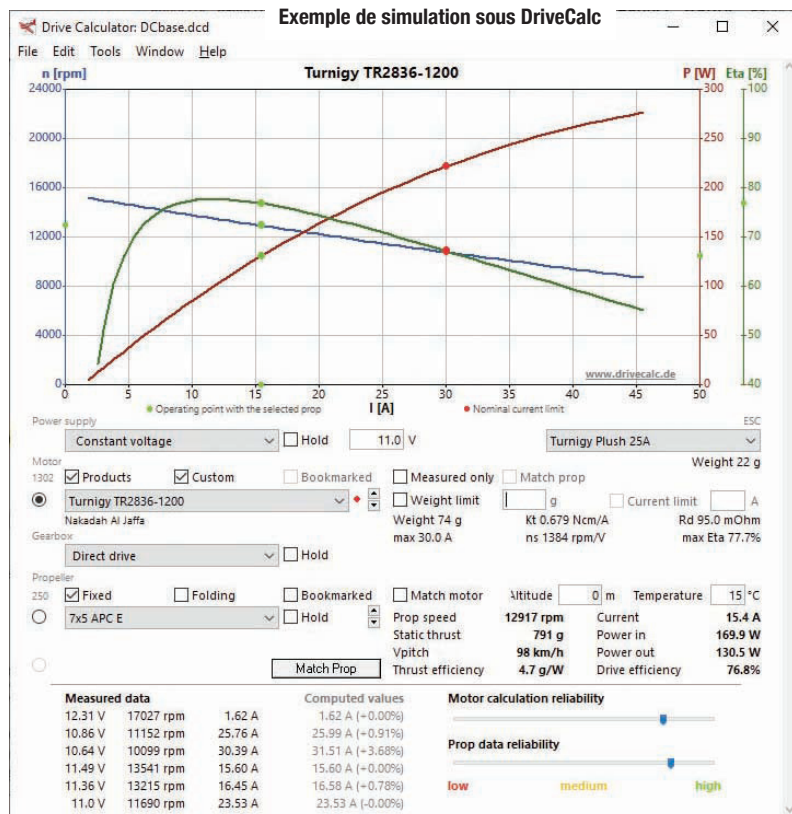
Comme les équations le suggèrent déjà, on peut observer que l'intensité est directement proportionnelle au couple (C), depuis l'intensité à vide (I_o) jusqu'à celle de blocage. Le régime (N) est quant à lui inversement proportionnel au couple (pour une tension donnée). Par contre, le rendement (et donc la puissance à l'arbre) ne sont pas du tout des droites. Sur ces exemples, le rendement maximum se situe à 85% du régime à vide (N_o). Entre cette vitesse et N_o (hélice trop petite), le rendement s'écroule très vite, le courant absorbé servant plus

à entretenir la rotation propre du moteur qu'à faire tourner l'hélice. Au-dessous (hélice plus grande), le rendement chute plus progressivement tandis que le courant augmente proportionnellement au couple, jusqu'au moment où la chaleur à dissiper par le moteur ($= (1-\text{rendement}) \cdot R \cdot I^2$) devient trop importante. Cela correspond à l'intensité maximum utilisable en continu (elle peut évidemment être supérieure en pointe, mais sur une courte durée), situé à environ 70% de N_o . Exactement comme pour un moteur thermique, le point de fonctionnement au sol (celui qu'on peut mesurer simplement)

devra se trouver à moins de 85% N_o , de manière à faire fonctionner le moteur en vol à un rendement pas proche de l'optimal. On peut noter que la puissance maximale délivrée par le moteur se situe à environ 50% N_o , mais cette puissance n'est pas atteignable car, à cause de l'intensité très élevée et du mauvais rendement à ce régime, le moteur va sur-chauffer très rapidement. Nos contrôleurs étant dépourvu de limiteur d'intensité, contrairement aux modèles industriels ou automobile, cela explique qu'il soit si facile de détruire un moteur en l'accouplant à une hélice plus grande que celles pour lesquelles il est conçu.



La même chose sur le logiciel de simulation DriveCalc, avec des graphiques tracés en fonction de l'intensité :



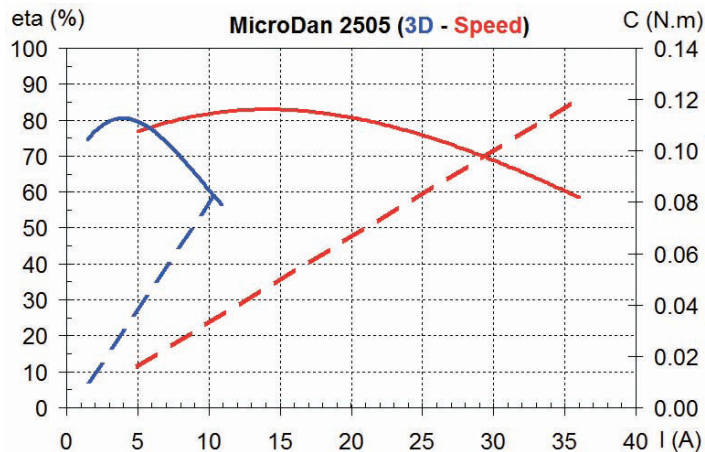
Les valeurs identifiées précédemment sont en fait universelles pour décrire le fonctionnement d'un moteur électrique, brushed ou brushless, cage tournante ou pas. Leur domaine de fonctionnement peut alors être résumé avec une simplicité assez remarquable :

- ➔ plage de fonctionnement acceptable en continu : 70% à 90% N_o (\approx KV.U)
- ➔ rendement maxi : à 85% N_o
- ➔ régime acceptable au sol : environ 65% à 80% N_o
- ➔ régime acceptable en vol : 70% à 85% N_o

A noter qu'il s'agit de valeurs en continu, ce qui correspond à l'usage normal sur nos modèles réduits volants. Sur de courtes durées (transitoires), comme c'est le cas en voiture RC, le courant maximum admissible et le couple associé peuvent être largement supérieurs.

Un autre point intéressant concerne l'effet du KV sur le couple et le rendement, facilement identifiable sur un moteur

décliné en deux bobinages très différents (le reste étant strictement identique), ici mesuré sur banc d'essais (ce n'est donc pas une simulation) :



Comparatif d'un moteur de KV 1160 et 2840 (travaux de l'auteur)

On retrouve bien la proportionnalité stricte entre le couple et le courant absorbé ainsi que I_0 (autour de 0.5 A ici). Le couple maximum du moteur de KV élevé s'avère sensiblement supérieur à celui de faible KV, pourtant synonyme de « plus coupleux » dans l'inconscient collectif. Ce qui est vrai, mais à iso-intensité et donc, pour une hélice donnée à iso-régime, une tension d'alimentation d'autant plus faible que le KV est élevé. Par contre, pour une tension d'alimentation et une hélice données, le moteur à plus fort KV tournera plus vite et cela avec une intensité et un couple plus importants. Côté rendement, on constate une bonification et un étalement significatif de la plage d'utilisation avec l'augmentation de KV. Cette comparaison montre aussi un point fondamental, formalisé par Guillaume Rouby dans ses travaux et que nous allons exploiter : pour une taille

de moteur et une tension d'alimentation données, plus le KV est important et plus le moteur est puissant. Ici, passer d'un KV de 1160 à 2840 (donc x 2.5) permet de sortir 3.5 fois plus de puissance ! Cela semble bien mystérieux, et pourtant la rai-

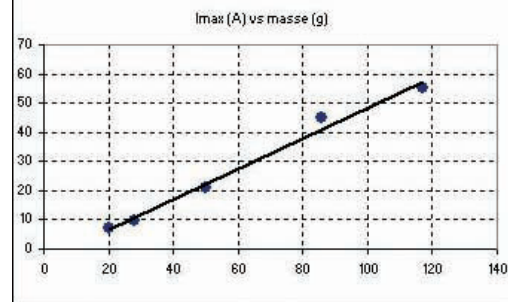
son est très simple : pour une taille de moteur donnée, on augmente le KV en réduisant le nombre de spires du moteur et en augmentant la section de ces dernières. En conséquence, la résistance interne du moteur est d'autant plus faible que le KV est important, et donc le moteur est capable de passer une puissance plus élevée

(pour une perte par effet Joule donnée), et inversement. Cette relation a été établie par Guillaume sous la forme $R_i = k / (KV \cdot m)^2$, avec k un coefficient dépendant de la qualité du moteur. Cette loi est là aussi universelle, et permet de corréler de manière fiable la masse, le KV et la puissance du moteur. En voici une illustration :

Corrélations masse / KV (travaux de l'auteur)

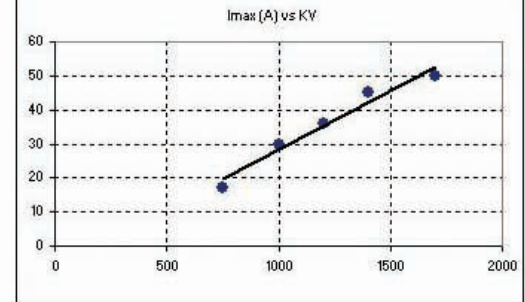
Iso-KV

Moteur	KV	Masse	Imax	I0	Ri
Turnigy AX-2203C	1400	20	7	0.2	0.5
Turnigy 2205C	1400	28	9.5	?	?
Turnigy D2826-10	1400	50	21	?	?
NTM 2836	1400	86	45	?	?
NTM 3536A	1400	117	55	?	?



Iso-masse

Moteur	KV	Masse	Imax	I0	Ri
NTM 2836	750	87	17	?	?
NTM 2836	1000	89	30	?	?
NTM 2836	1200	85	36	?	?
NTM 2836	1400	86	45	?	?
NTM 2836	1700	87	50	?	?



Nous avons alors le système d'équations suivant, établi sur la base des corrélations présentées ci-avant et permettant in fine de déterminer la masse et le KV moteur associés à la puissance électrique à passer et au régime souhaité :

$$m \approx 1000 \cdot kq \cdot \left(\frac{31 \cdot KV^{1.4}}{R_i - 0.05} \right)^{1/1.6}$$

$$R_i \approx \frac{U - N / KV}{I \cdot (1 + 0.07 \cdot N / KV)}$$

$$KV \approx \frac{N}{U \cdot kc}$$

$$\eta_{max} \approx (125\% - kq / 2) \cdot (15\% + kc)$$

Avec :

→ kq : indice de qualité du moteur, fixé par expérience à 0.85 (excellent, moteur type Hacker, etc.), 1 (normal, moteur type Turnigy, NTM, etc.) ou 1.15 (médiocre, moteur bas de gamme). Cet indice est directement corrélé au rendement maxi du moteur et donc à la masse associée. En effet, un moteur est, pour une puissance donnée à

fournir, d'autant plus léger que son rendement est bon.

- kc : taux de chargement du moteur, fixé en vol à 75% (moteur très chargé), 80% (normal) ou 85% (peu chargé, rendement max). Ce taux diffère de 5% de celui proposé dans « RC Aero Design », qui est basé sur la condition au sol alors que, dans la méthode qui clôturera ces articles, c'est directement le point de fonctionnement en vol qui sera étudié.

On notera que :

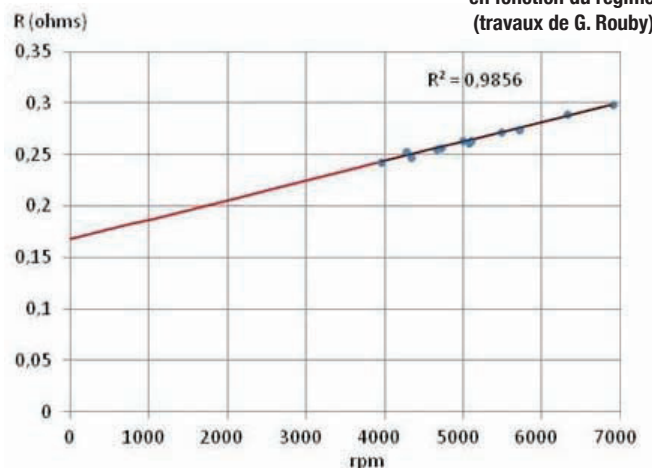
- le calcul de la masse fait appel à celui de R_i , en intégrant sa variabilité à la tension et à l'intensité traversant le moteur.
- le KV est bien une constante, mais il faut noter que sa valeur peut être affectée par le timing du contrôleur. Il faut donc être attentif à ce réglage sachant que, dans la grande majorité des cas le timing automatique des contrôleurs modernes est tout à fait pertinent.
- le rendement moteur est estimé sans utiliser la valeur calculée de R_i , de manière à éviter des calculs itératifs pour résoudre le système d'équations. C'est un peu moins précis mais, vous le verrez à la fin de ces articles, très largement en deça de toute la variabilité naturelle d'un GMP et plus que largement suffisant au regard du rendement propulsif global. En effet, suivant qu'elle est optimale ou pas, l'adaptation moteur / hélice / domaine de vol de l'avion peu jouer sur le rendement propulsif du simple ou double ; une approximation de quelques % sur le rendement moteur n'a donc aucune importance.

En conséquence, la connaissance des constantes classiques mais pas ou mal documentées que sont I_0 et R_0 n'est plus indispensable. Il suffit de disposer de la masse et du KV des moteurs, qui sont toujours connus avec un niveau de précision satisfaisant et/ou facile à mesurer par n'importe quel modéliste. Ce sont donc ces dernières constantes que nous allons utiliser pour définir les moteurs.

Ces corrélations présentent aussi un avantage décisif sur les calculs traditionnels basés sur R_0 et I_0 . Ces variables sont en effet considérées comme des constantes, or en réalité ce n'est pas le cas, elles varient sensiblement en fonction de la tension d'alimentation (et donc

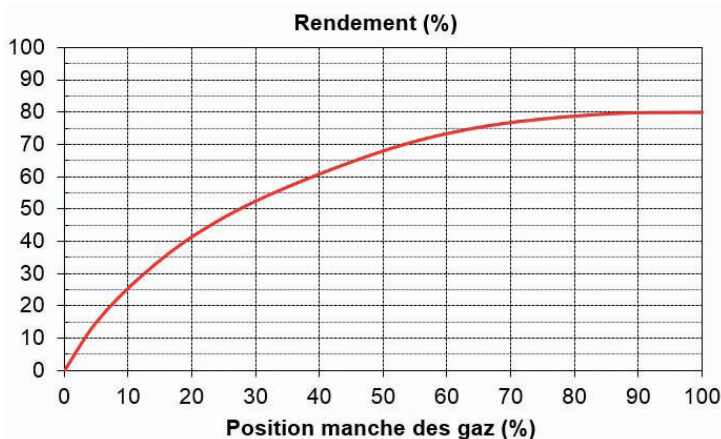
du régime à vide), mais aussi en fonction de la température du moteur. Pour compliquer les choses, cette dernière dépend à la fois de la température extérieure, de la puissance électrique absorbée par le moteur et des conditions de ventilation de ce dernier. D'où la variabilité importante des mesures de I_0 et R , ainsi que l'écart entre la réalité et les résultats issus de la modélisation traditionnelle ; par exemple, suivant cette dernière, le rendement maximum d'un moteur est censé s'améliorer avec la tension, or c'est en réalité plutôt une constante (l'augmentation de R contrebalançant celle de U).

Evolution de la résistance interne en fonction du régime (travaux de G. Rouby)



Une dernière remarque concerne le rendement aux régimes partiel, c'est-à-dire en modulant la consigne de gaz :

Mesure au banc de l'évolution du rendement à charge partielle (travaux de l'auteur)



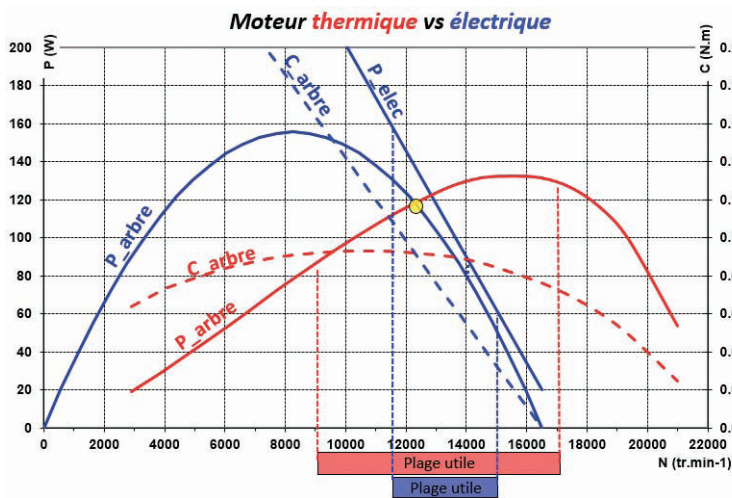
Ce graphique montre que le rendement d'un moteur chute sensiblement en dessous de 60-70% de la consigne de gaz. De manière concrète, un avion surmotorisé que l'on ferait voler tout le temps au tiers de gaz vera son autonomie amputée de plus de 30% (le rendement moteur passant ici de 80% plein gaz à 55% au tiers de gaz) par rapport au même moteur utilisé plein gaz avec une hélice plus petite ou par rapport à un moteur moins puissant utilisé plein gaz.

Autrement dit, pour un appareil destiné à un record de durée au moteur, il est nettement préférable de choisir le moteur au plus juste (avec une petite marge pour les phases de vol ascendantes) plutôt qu'utiliser un moteur plus puissant à régime réduit. Ou bien, dans une autre logique d'optimisation énergétique, il serait préférable d'alterner deux phases de vol, l'une de montée au moteur plein gaz et l'autre moteur coupé de plané au taux de chute minimum, de manière à exploiter au mieux chaque watt.

Comparaison des deux types de motorisation

Ici, loin de moi de rentrer dans des considérations partisans sur les mérites et vertus supposés ou réels de telle ou telle propulsion, l'idée est juste d'objectiver la comparaison du point de vue technique, c'est-à-

dire sur la capacité d'un GMP (groupe moto-propulseur) à faire voler un avion ou un planeur. La plus grande difficulté d'une telle comparaison est de définir une règle d'équivalence



pertinente entre ces deux motorisations. C'est une évidence, et pourtant rien de plus facile que de biaiser significativement les résultats en oubliant certains paramètres, même en étant de bonne foi. Pour illustrer cela, voici un exemple très parlant pioché dans les magazines auto : les moteurs diesels, électriques et thermiques y sont toujours comparés au travers de leur valeur de couple max. Comment alors expliquer alors qu'une sportive essence puisse accélérer bien plus fort qu'une berline diesel de même masse et de couple moteur identique ? L'explication est tout simple, on ne parle pas du

bon couple : mettons que la vitesse maximum de la sportive est de 20% supérieure à celle de la berline et que son moteur tourne 60% plus vite, il est donc plus réducté de 33%, ce qui donne un couple aux roues (le seul qui compte !) et, in fine, une accélération plus importants de la même proportion. Ceci étant posé, voici une proposition de règle d'équivalence a priori pas trop idiote :

- même puissance max continue à l'arbre.
 - plages d'utilisation continues centrées l'une avec l'autre.
- Passons maintenant à l'application pratique, avec d'un côté un petit moteur glow classique de 1.7cc (OS .10 FP ou LA, AP09A, Thunder Tiger GP10, etc.) et de l'autre un GMP brushless équivalent (type 3530 KV1600), moteurs que l'on trouvera classiquement sur des petits avions d'environ 1 kg et 1m d'envergure.

puissance mini). A contrario, la plage d'utilisation d'un moteur thermique va approximativement du simple (régime mini conditionné par la stabilité de carburation) au double (un peu au-dessus du régime de puissance maxi), voire bien plus comme démontré ci-avant avec le HB 21 GP-ABC (d'environ 8000 tr/min à 24000 tr/min !). Rien de neuf pourtant, il suffit le lire les bancs d'essais des moteurs, comme ceux de Pierre Delfeld et d'autres à la belle époque des moteurs glow, pour se rendre compte que les moteurs thermiques supportent une très large plage de dimensions d'hélice. On a parfois la mémoire courte, et je vous invite à parcourir nos revues anciennes dont la richesse est assez extraordinaire (voir rubrique liens / bibliographie en fin de cet article).

L'étroitesse de la plage d'utilisation d'un moteur électrique, versus celle d'un thermique, tient à la forme de la courbe de couple, qui diffère totalement :
 - électrique : droite à pente importante, décroissant linéairement en fonction du régime du blocage jusqu'à No.
 - thermique : courbe en cloche à faible pente avec un maximum à un certain régime.

En aparté : pour les véhicules roulants grandeur, la courbe de couple du moteur électrique a aussi ses avantages ; pour peu qu'on ne soit pas exigeant sur la vitesse de pointe et que le moteur soit piloté par une électronique sophistiquée limitant l'intensité (et donc le couple) dans les bas régimes, de manière à protéger le système d'un échauffement dommageable, elle permet en effet de se dispenser de boîte de vitesse, ce qui simplifie énormément l'architecture du véhicule.

Autre point intéressant : les régimes à vide (No) des moteurs équivalents sont très différents, ici autour 16500 tr/min pour le moteur électrique et 22000 tr/min pour le moteur thermique. En conséquence, le moteur thermique aura beaucoup plus d'allonge en vol. Si l'hélice a été correctement choisie, avec un régime au sol inférieur à celui de la puissance max et un pas correct, cette allonge est très fa-

cile à percevoir sans aucun outil de mesure, il suffit de tendre l'oreille lors d'une prise de badin : l'augmentation de régime est très nette pour un moteur glow et nettement moindre flagrante en électrique.

Maintenant, regardons la masse et l'autonomie, pour le point de fonctionnement commun à 120W : ici, le GMP thermique pèse au total autour de 200 g (moteur + bâti + hélice + servo de gaz 5g + réservoir de 100 cm³ et durites) hors carburant. Sa consommation plein gaz est d'environ 5 cm³/min de carburant, soit une masse totale de moins de 300g pour autour de 20 min d'autonomie plein gaz (!) et donc bien plus en modulant. La motorisation électrique équivalente [tournant la même hélice au même régime] nécessite environ 160 W électrique (avec un rendement moteur de 75%). Avec un accu LiPo 3S 2200 mah, la masse totale s'élève à environ 350 g, pour une autonomie plein gaz d'environ 9 min théorique (en comptant 11 V en moyenne à l'accu et en consommant jusqu'au dernier électron) et en pratique plutôt autour de 7 min (en laissant 20 % de charge à l'accu pour ne pas l'abîmer).

Le rapport puissance / masse

des deux GMP est donc à peu près équivalent, quoique ici légèrement en faveur du thermique. Par contre, le rapport autonomie / masse est d'environ 3 fois meilleur pour le thermique... ! Etonnant et même dérangeant, après tout ce qu'on a pu lire et entendre à ce sujet, n'est-ce pas ? Et pourtant, le temps n'est pas si loin où il était courant de voir voler un planeur de 2 m d'envergure et de 1 kg de masse, entraîné par un minuscule Cox 049 pesant seulement 60 g plein de carburant inclut (voir par ex. : <http://www.koralpe.biz/hi%20fly.html>) ! Soit approximativement la masse d'un moteur électrique brushless, sans accu ni contrôleur, qu'on mettrait aujourd'hui sur le même planeur. Certes, depuis les accus NiCd et les poussifs Mabuchi 540, les progrès de l'électrique ont été fulgurants et permettent des performances très convaincantes, bien aidé en cela par la miniaturisation et donc l'allègement des composants radio (qui, au passage, peut aussi bénéficier au thermique, on n'est pas obligé de mettre des servos standard sur un traîner), mais le ratio autonomie / masse est encore très largement en faveur du thermique. Les recherches du MIT sur un drone à très grande autonomie vont

aussi dans ce sens : <http://news.mit.edu/2017/drones-stay-aloft-five-days-0607>. De même, dans l'aviation grandeur, après une bulle de spéculation sur le vol électrique, il s'avère que les moteurs thermiques à carburant liquide ne sont pas prêts d'être remplacés. Par contre, beaucoup de recherches sont en cours pour remplacer les transmissions mécaniques entre le moteur et l'hélice (ou le rotor) par un système électrique (générateur – faisceau – moteur(s)) et ainsi permettre une distribution de la puissance sur plusieurs hélices ou rotors (avec toute la souplesse que cela permet).

Pour finir cette comparaison, toujours en restant parfaitement rigoureux et intellectuellement honnête, le moteur électrique dispose d'un levier d'adaptation important que n'a pas le thermique : on peut en effet changer la tension de l'accu, avec plus ou moins d'éléments, ce qui permet de significativement changer le régime à l'arbre et la puissance. Certes, on n'est plus du tout à iso GMP, mais cela donne à l'électrique une grande souplesse. On peut aussi ajouter le fait qu'un moteur électrique donné peut être décliné à des KV très différents, suivant le choix de bobinage (le temps où on bobinait soit-

même ses moteurs n'est pas si loin...), avec donc une large possibilité d'adaptation à l'hélice optimale (pour l'avion à motoriser), mais là non-plus on ne raisonne plus strictement à iso-motorisation.

Un dernier rappel : nous parlons toujours ici de fonctionnement en régime continu, avec peu de transitoires, qui est le propre des appareils volants. Toutes les conclusions données ici ne sont donc pas directement transposables aux véhicules roulants par exemple.

Réducteur

On a vu précédemment qu'un moteur est, pour une puissance donnée, d'autant plus léger et offrant un bon rendement que son KV est élevé. Il serait donc tentant d'utiliser des moteurs tournant le plus vite possible, mais cela suppose d'utiliser une très petite hélice, très bruyante et pas forcément compatible avec la taille du capot de l'appareil à motoriser. La solution consiste alors à utiliser un réducteur pour réduire le régime de rotation et augmenter le couple, et donc utiliser une hélice de taille plus adaptée à l'avion. Par exemple, avec un réducteur 1 :2, le couple à l'arbre est doublé et le régime réduit de moitié.

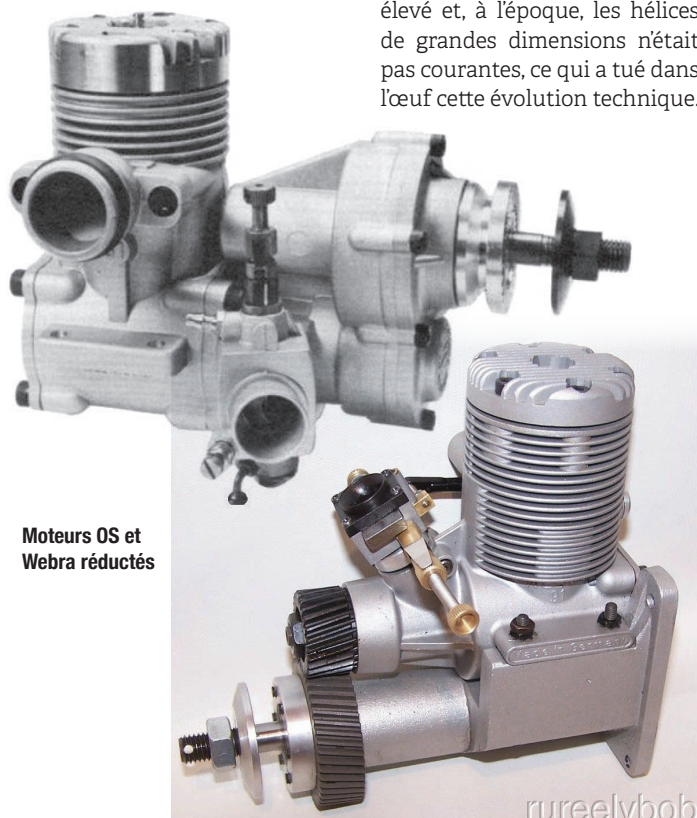
Exemple de réducteurs de la marque MPI



Voilà pour le principe. Mais pourquoi alors ce système ne s'est-il pas généralisé ? Premièrement, il y a la raison évidente du coût et de la complexité technique. Ensuite, et c'est là le plus important, il y a surtout une raison de masse et de rendement, avec un bilan mitigé : suivant la qualité de réalisation du réducteur, la masse et le rendement finaux de l'ensemble [moteur fort KV et réducteur] peuvent être moins bon que ceux d'un moteur simple équivalent en KV [à l'arbre d'hélice] et puissance. Dans ce cas, le mieux étant l'ennemi du bien, autant choisir la solution la

plus simple, la plus fiable et la moins chère, c'est-à-dire le moteur non réduit.

Cela vaut aussi pour les moteurs thermiques, d'autant plus puissants [à cylindrée donnée] qu'ils tournent vite et donc pouvant bénéficier d'un réducteur avec un intérêt certain. Certains moteurs Webra, et surtout OS à la belle époque des FSR et VE, étaient ainsi réalisés, avec dans le cas de ces derniers des réducteurs d'excellente qualité parfaitement intégrés au moteur. Quelques kits de réduction ont aussi été produits, notamment par Graupner. Seul bémol, le coût était très élevé et, à l'époque, les hélices de grandes dimensions n'étaient pas courantes, ce qui a tué dans l'œuf cette évolution technique.



Moteurs OS et Webra réduits

Liens - Bibliographie

Documentations sur les moteurs électriques :

- <http://g.rouby.free.fr/tempmoteur.htm>
- <http://aerotrash.over-blog.com/tag/motorisation%20electrique>
- <http://wissousmodelisme.free.fr/Download/BRUSHFOURDAN.pps>
- <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work>
- <http://techniquemodelisme.free.fr/Modelisme/explosion.htm>
- http://techniquemodelisme.free.fr/Modelisme/mot_elec.htm
- http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/motor1_theory.pdf
- http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/motor2_theory.pdf

Revue RC anciennes :

- http://rc-paper.com/liste_revues.php
- <https://rcbookcase.com/index.php>
- <http://clap54.free.fr>
- <http://sceptreflight.com/Model%20Engine%20Tests/Index.html>

Cet article très intéressant de Pierre Echancier, paru dans RadioModélisme n° 139 de juillet 1978 (voir lien vers le site RC-Papers dans la rubrique liens - bibliographie) montre d'ailleurs les recherches en cours sur ce sujet à l'époque. On pourra au passage se faire une idée sur le niveau de technicité dans notre loisir à l'époque, par exemple la relation entre la vitesse de vol et le rendement de l'hélice était déjà bien connue. L'auteur se prend à ré-

ver d'études en soufflerie des hélices, ce qui est devenu une réalité 40 ans plus tard. Peu de temps après, dans les numéros 177 et 178, cet excellent article de Gerald Revena montre une méthode d'adaptation hélice, moteur et avion. Dans le RCM n° 10 de février 1982, un excellent article d'Yves Baroux rappelle aussi ces principes techniques, complété par l'essai du réducteur Graupner 1/1.8 pour OS 90 FSR.

Je vous laisse juger sur pièce :

Quelles ont été les erreurs commises dans l'utilisation des réducteurs ? A mon avis, deux essentielles.

1. De croire pour la plupart des néophytes qu'en réduisant la vitesse de rotation de l'hélice ils allaient obtenir une puissance moteur supérieure alors qu'il n'en est, bien évidemment, rien. En effet, la seule chose que permette l'utilisation d'un réducteur est de faire tourner le moteur au nombre de tours correspondant à sa puissance maxi (entre 16 et 17 000 t/mn pour les schnurli-courants) tout en ayant une hélice tournant elle au nombre de tours correspondant à son rendement maxi pour une taille donnée. La conséquence que l'on peut tirer de ce qui précède est que, si l'on ne tient pas compte des pertes de rendement dues à la transmission (de 5 à 20 %), l'augmentation globale de puissance utilisable sera au mieux de 20 à 30 %.

2. De la mauvaise adaptation des hélices en fonction des modèles à tracter, de la puissance disponible et de la vitesse minimum à atteindre. Ce que trop de gens n'ont pas réalisé, c'est que pour atteindre avec un même avion des vitesses de translation comparables, il fallait multiplier le pas de l'hélice dans le rapport inverse à celui de la réduction introduite. Cet excès a même conduit à remonter des hélices qui avaient un pas tel qu'elles ne permettaient au régime maximum de ne dépasser que de quelques km/h la vitesse de décrochage de l'appareil, ce qui n'empêchait pas de relever une forte traction au point fixe. Enfin, dans le même ordre d'idée, certains ont cru bon de monter des réducteurs sur des avions qui se traînaient péniblement du fait de leur forte charge alaire avec un moteur classique ; alors pensez, avec les quelque 600 g supplémentaires du réducteur et un pas insuffisant !

Extrait de RCM n°10

Pas mal d'amateurs éclairés ont aussi adapté des Cox 049 avec un réducteur, qui servait en même temps de liaison entre plusieurs moteurs groupés en un seul, comme ce superbe bicylindre à plat :

Conclusion

Toujours en espérant que vous avez appris des choses sans toutefois que cela vous ait semblé trop rébarbatif, je vous donne rendez-vous au prochain épisode pour étudier les accus, leur interaction avec le moteur et, en bonus, quelques règles de bonne utilisation.

■ Franck Aguerre

<http://rcaerolab.eklablog.com/>

