

# L'étude, le calcul et la construction d'un drone de photographie aérienne

## INDEX

<b>Notions de base</b>	1
<i>L'hélice</i>	
<i>Le moteur brushless</i>	
<i>L'adaptation du moteur à l'hélice</i>	
<i>Les caractéristiques primordiales</i>	
<b>Pourquoi un quadricoptère, quelques explications.</b>	2
<b>La taille et le type d'hélice</b>	
<i>L'efficacité de l'hélice, le n10N et le n100W</i>	3
<b>La position de l'hélice</b>	6
<b>Choisir un moteur d'essai</b>	7
<i>Evaluation du KV du moteur d'essai</i>	
<i>Formules et paramètres</i>	8
<b>Choisir l'hélice</b>	
<b>Choisir le moteur du quadricoptère</b>	10
<i>Importance du KV</i>	
<i>La méthode</i>	
<i>Les étapes</i>	11
<b>Choisir la batterie LiPo</b>	
<b>Résumé</b>	12
<i>Hélices</i>	
<i>Tension de fonctionnement</i>	
<i>Moteur d'essai</i>	
<i>Comparer des hélices</i>	
<i>Comparer les moteurs</i>	
<i>Choisir le meilleur couple moteur-hélice du quadricoptère</i>	
<i>La batterie</i>	
<b>Description du dossier Excel "Drone_V2.1"</b>	13
<i>Feuille de calcul n°1: Taille</i>	
<i>Feuille de calcul n°2: graph</i>	
<i>Feuille de calcul n°3: moteur test</i>	
<i>Feuille de calcul n°4: moteurs et mesures</i>	14
<i>Feuille de calcul n°5: base mesures</i>	
<i>Feuille de calcul n°6: adaptation</i>	
<i>Feuille de calcul n°7: test hélices</i>	
<i>Feuille de calcul n°8: moteurs</i>	15
<i>Feuille de calcul n°9: moteur-hélice</i>	
<i>Feuille de calcul n°10: LiPo</i>	
<i>Feuille de calcul n°11: pour info</i>	16
<i>Feuille de calcul n°12: mesures hélices</i>	

<b>Mode d'emploi du dossier Excel "Drone_V2.1"</b>	.....	17
<i>Feuille de calcul n°1: Taille</i>		
<i>Feuille de calcul n°2: graph</i>		
<i>Feuille de calcul n°3: moteur test</i>		
<i>Feuille de calcul n°4: moteurs et mesures</i>	.....	18
<i>Feuille de calcul n°5: base mesures</i>	.....	19
<i>Feuille de calcul n°6: adaptation</i>		
<i>Feuille de calcul n°7: test hélices</i>	.....	20
<i>Feuille de calcul n°8: moteurs</i>	.....	21
<i>Feuille de calcul n°9: moteur-hélice</i>		
<i>Feuille de calcul n°10: LiPo</i>		
<i>Feuille de calcul n°11: pour info</i>	.....	22
<i>Feuille de calcul n°12: mesures hélices</i>		

## L'étude, le calcul et la construction d'un drone de photographie aérienne

Je m'efforcerai de rendre ce texte accessible à tous. Le calcul nécessite l'utilisation de formules qui pourront paraître compliquées mais sont à la fois commentées et intégrées dans une feuille de calcul Excel facile d'emploi.

### **Notions de base**

#### *L'hélice*

Une hélice déplace de l'air vers l'arrière et c'est ce déplacement d'air qui génère la force de traction. L'air a une masse volumique (+/- 1,25 Kg/m<sup>3</sup>) et cette masse s'oppose à son déplacement et à la rotation de l'hélice. Il faut alors appliquer à l'hélice une force d'autant plus grande qu'on l'applique à proximité de l'axe de rotation. Il s'agit d'un couple, généralement exprimé en N.m (Newton mètre), c'est le produit d'une force par une distance. Cette distance est le rayon d'un cercle autour de l'axe de rotation auquel la force s'applique perpendiculairement ( $C = F \times d$ ). Le moteur qui fait tourner l'hélice lui fournit un couple égal au couple résistant de l'hélice mais en sens opposé. Ce couple augmente avec la vitesse de rotation, comme la puissance. La puissance est le produit du couple par la vitesse de rotation, généralement exprimée en Watts ( $P_m = C \times v_a$ ),  $v_a$  en radians/sec.

#### *Le moteur brushless*

Le moteur brushless se comporte comme un moteur à courant continu et ses performances correspondent aux mêmes formules mathématiques. Cependant, il n'est pas possible de mesurer facilement la tension qui lui est fournie. Les variateurs de vitesse fournissent des impulsions de forme carrée (par tout ou rien) à une fréquence élevée (par exemple 8000 fois par seconde). On peut toutefois connaître la puissance utilisée en mesurant la tension et le courant fourni par la batterie au moyen d'appareils de mesure pour modélistes. La puissance est le produit de la tension par le courant ( $P = V \times I$ ). La tension s'exprime en Volts et le courant en Ampères. La vitesse de rotation est liée à la tension tandis que le couple est lié au courant.

#### *L'adaptation du moteur à l'hélice*

Il est évident que le moteur doit pouvoir fournir assez de puissance pour faire tourner l'hélice à la vitesse permettant de produire la force de traction maximale voulue. Pour un multicoptère, cette traction doit être au moins 2 fois plus importante que le poids de la machine en ordre de vol. Cela permet d'assurer assez de stabilité et de maniabilité. Il faut aussi que le rendement du moteur en vol stationnaire soit optimal. Le rendement est le rapport de la puissance mécanique (hélice) à la puissance électrique fournie par la batterie. Le moteur est le siège de pertes de puissance de deux types: "fer" et "effet Joule". Les pertes "fer" sont liées aux frottements et aux courants de Foucault, elles sont l'équivalent d'une perte de courant. Cette perte de courant est mise en évidence lorsqu'on fait tourner le moteur à vide (sans hélice) et qu'il consomme pourtant du courant. Les pertes par effet Joule sont liées à la résistance des fils électriques au passage du courant, elles sont responsables de l'échauffement des bobinages. C'est l'équivalent d'une perte de tension. La tension réellement utile ( $V_{utile} = V - r.I$ ) est amputée du produit de cette résistance interne par le courant qui y circule. Pour pouvoir voler longtemps, il faut rechercher un moteur ayant le meilleur rendement en vol stationnaire (ou proche du stationnaire, statistiquement le plus fréquent).

#### *Les caractéristiques primordiales*

Les caractéristiques primordiales à obtenir sont la stabilité et l'autonomie. La stabilité s'obtient par le choix et le paramétrage d'un contrôleur de vol adéquat, l'autonomie s'obtient par le choix d'un ensemble hélices-moteurs efficace et une conception de machine de grande taille, légère mais solide et de type quadricoptère.

## Pourquoi un quadricoptère, quelques explications.

La force de traction d'une hélice dépend autant de la puissance fournie que du diamètre des hélices. Autrement dit, prendre des hélices deux fois plus grandes permet de consommer deux fois moins d'énergie!

$$F = k (D^2 P^2)^{2/3}$$

F la force de traction

k un coefficient

D le diamètre de l'hélice

P la puissance mécanique nécessaire

Construire en surface permet de minimiser le poids par rapport à la taille. La surface n'augmente qu'en raison du carré alors que le volume augmente en raison du cube de la taille d'un objet. Ceci explique qu'il ne faut pas hésiter à concevoir une machine de grande taille qui sera proportionnellement plus légère. La légèreté de la machine influe directement sur l'autonomie mais aussi sur la solidité. Les matériaux les plus indiqués sont les plaques et tubes en fibres de carbone, la visserie aluminium et les pièces issues de l'impression 3D en PLA.

Avec des moteurs équidistants à la périphérie de la machine, il est évident que la taille des hélices sera d'autant plus petite que le nombre de moteurs sera grand. Au niveau de l'autonomie, le quadricoptère est donc un meilleur choix que l'hexacoptère. Démonstration:

$$\text{de } F = k (D^2 P^2)^{2/3} \rightarrow F^3 = k D^2 P^2 \rightarrow P^2 = F^3 / k D^2 \rightarrow P = F^{3/2} / k^{1/2} D$$

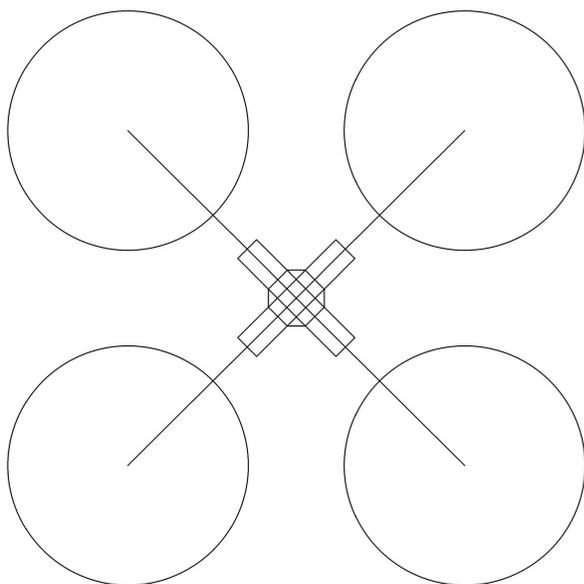
Le rapport des puissances  $P_h$  (pour l'hexacoptère) et  $P_q$  (pour le quadricoptère) est

$$P_h / P_q = (F^{3/2} / k^{1/2} D_h) / (F^{3/2} / k^{1/2} D_q) \rightarrow P_h / P_q = (F^{3/2} k^{1/2} D_q) / (F^{3/2} k^{1/2} D_h) = D_q / D_h$$

Les puissances nécessaires pour un hexacoptère et un quadricoptère sont donc dans le rapport du diamètre des hélices 6/4, soit 1,5. L'hexacoptère engendre donc 50% de perte d'autonomie par rapport au quadricoptère de même taille, à condition de conserver le même poids de machine, ce qui est impossible! La seule utilité de l'hexacoptère est de pouvoir éventuellement sauver la machine en cas de défaillance d'un moteur.

## La taille et le type d'hélice

La taille des hélices doit donc être la plus grande possible, sans pour autant qu'elles entrent en collision avec le centre du châssis ou entre-elles. Personnellement, je choisis la taille des hélices en divisant par 2 la classe du quadricoptère (classe 900, soit 450 mm  $\approx$  18 pouces). L'aspect général de la machine se présente comme ceci:



Le centre du châssis occupe un espace approximatif de 60% du diamètre des hélices (270 mm pour des 18 pouces).

La puissance théorique à fournir à l'hélice peut se calculer par la formule suivante:

$$P = D^4 P_a N_n^3 N_h K_p$$

D: diamètre de l'hélice

$P_a$ : pas

$N_n$ : vitesse de rotation (trs/min)

$N_h$ : coefficient du nombre de pales

(2 - 3,2 - 4,4 pour 2, 3 et 4 pales)

$K_p$ : coefficient correcteur propre à l'hélice

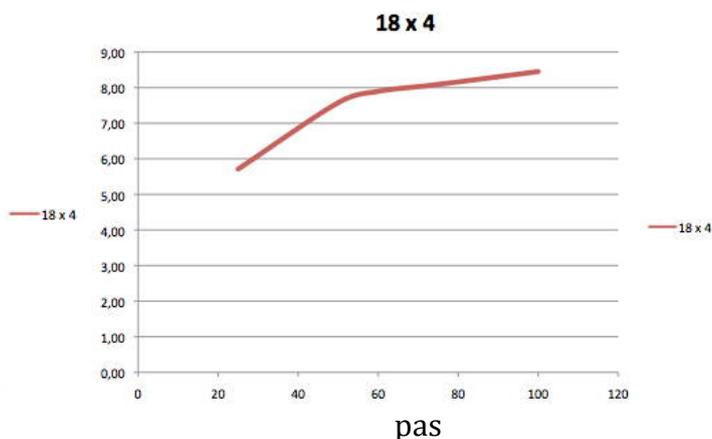
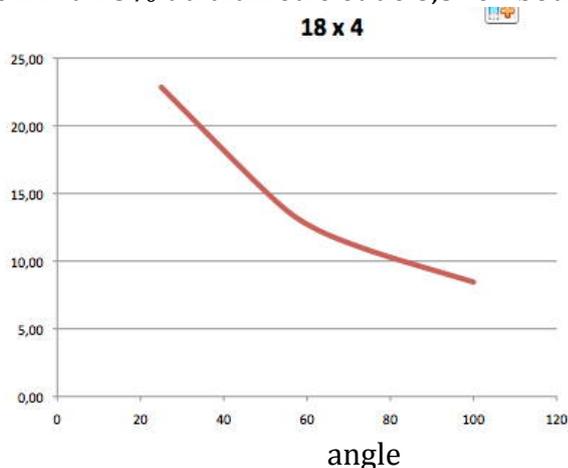
Le point important est que la puissance dépend du pas mais surtout du cube de la vitesse de rotation.

Le coefficient  $N_h$  du nombre de pales augmente plus vite que le nombre de pales ce qui indique bien qu'il faut choisir une hélice de type bipales. Il faut choisir le plus petit pas possible car la pale d'une hélice est

comme une aile, au-delà de l'angle de finesse maximum, le rapport portance/trainée diminue. L'efficacité d'une hélice en traction statique est meilleure avec un petit pas.

Au premier coup d'œil, chacun voit bien que l'angle que fait le profil des pales d'une hélice avec son plan de rotation est plus important au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'axe de l'hélice. Cela est bien normal puisque cet angle détermine de quelle distance un point de l'hélice se déplace vers l'avant à incidence nulle (comme si l'hélice tournait dans une motte de beurre), ce qu'on appelle le pas.

J'ai mesuré quelques angles sur une hélice 18 x 4 en carbone et constaté que le pas est supérieur à celui annoncé sur l'entièreté de l'hélice, le minimum étant de 5,7 et le maximum de 8,45. L'angle d'incidence est de 22° à 25% du diamètre et de 8,5° en bout de pale.



Que le pas ne soit pas constant, c'est déjà moins normal mais que, partout sur la pale, il soit supérieur ou inférieur au pas annoncé, voilà qui est surprenant! C'est une très bonne raison de choisir des hélices à petit pas, d'autant que j'ai souvent trouvé des angles supérieurs à 15° sur 25% du diamètre de l'hélice. La part de la traction par unité de surface de l'hélice dépend du carré de la vitesse de déplacement de cette surface. Comme la vitesse est d'autant plus grande que la surface en question est loin de l'axe de rotation, sa traction est finalement proportionnelle au cube de la distance qui la sépare de l'axe. L'endroit sur l'hélice où la traction par unité de surface est moyenne se trouve à 80% du diamètre. En dessous de 70% du diamètre la traction par unité de surface ne représente plus que 25% du maximum. Jusqu'à 55% du diamètre de l'hélice la traction par unité de surface est d'environ 10%. Je pense que l'hélice idéale pour un quadricoptère est constituée de 2 pales d'hélicoptère.

En théorie l'angle d'incidence d'une hélice à un emplacement sur son diamètre D est:

$$\alpha = \text{arc Tg} (\text{Pas} / \Pi \times D)$$

Lorsque l'hélice ne se déplace pas, son angle d'incidence est l'angle que son profil forme avec son plan de rotation. C'est le cas en vol stationnaire, la traction statique sera fonction de la vitesse de rotation et égale au poids de la machine. L'angle d'incidence des pales ne varie pas quelle que soit la vitesse de rotation.

L'hélice d'un avion qui se déplace n'est pas dans la même situation et l'angle d'incidence change car la distance parcourue (d) par l'avion tandis que son hélice fait un tour s'enlève du pas.

$$\alpha = \text{arc Tg} ((\text{Pas} - d) / (\Pi \times D))$$

A incidence nulle, l'avion avance de la valeur du pas à chaque tour d'hélice mais il n'y a aucune traction (puisque incidence nulle). Pour obtenir une traction il faut une incidence, la vitesse de déplacement de l'air vers l'arrière de l'hélice doit donc être plus grande que celle de l'avion, c'est ce qu'on appelle le glissement.

#### L'efficacité de l'hélice, le n10N et le n100W

Les hélices sont souvent accompagnées des qualificatifs n10N et n100W. Le n10N représente la vitesse de rotation en trs/min à laquelle l'hélice fournit une force de traction statique de 10 Newtons (1020 grs). Le n100W est la vitesse de rotation en trs/min à laquelle l'hélice demande une puissance mécanique de 100 Watts. En théorie, la force est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation tandis que la puissance l'est au cube. Le n10N et le n100W sont déterminés par des mesures effectuées sur les hélices

mais ne correspondent pas entièrement à la théorie pour toutes les vitesses de rotation. La théorie prévoit que la force de traction sera proportionnelle au carré de la vitesse et que la puissance sera proportionnelle au cube de la vitesse mais ce n'est pas ce que l'on constate généralement.

On calcule la force et la puissance en fonction de la vitesse de rotation, du n10N et du n100W:

$$F = 1019,7 \times (n / n10N)^2$$

$$P = 100 \times (n / n100W)^3$$

Ces formules répondent à la théorie mais la pratique (surtout en modélisme) est rarement conforme à la théorie. Il est préférable d'utiliser ces formules:

$$F = k_f (n/1000)^{\text{exp}_f}$$

$$P = k_p (n/1000)^{\text{exp}_p}$$

Ces formules correspondent mieux aux valeurs que l'on relève lors de mesures mais nécessitent de trouver les coefficients et exposants adéquats.

**Le dossier Excel "Le drone" intègre ce type de formules à partir de la version 2.1.**

$k_f$  et  $k_p$  sont des facteurs multiplicatifs tandis que  $\text{exp}_f$  et  $\text{exp}_p$  sont des exposants de  $n / 1000$ . La différence entre ces formules et les précédentes réside dans le fait que les exposants sont différents, c'est eux qui changent l'allure des courbes. Les coefficients  $k_f$  et  $k_p$  changent l'inclinaison des courbes tandis que les exposants  $\text{exp}_f$  et  $\text{exp}_p$  en modifient la courbure.

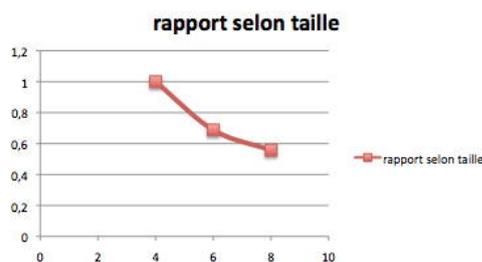
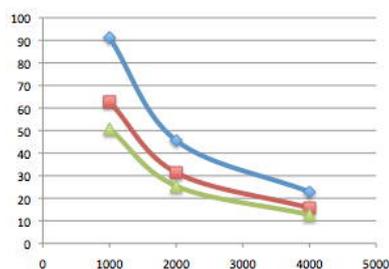
L'efficacité de l'hélice en fonction de sa vitesse de rotation (en grs/watt) peut donc se calculer aussi:

$$\text{Eff} = F / P = (10,197 / n) \times (n100W^3 / n10N^2)$$

On voit que plus la vitesse de rotation est élevée, moins l'hélice est efficace!

Voici une comparaison de 3 hélices semblable, ayant donc le même rapport entre le diamètre et le pas. Il s'agit d'hélices APC E 6 x 4, 9 x 6 et 12 x 8. Quelle que soit la vitesse de rotation, le rapport de leurs efficacités respectives ne varie pas mais l'efficacité diminue quand la taille de l'hélice augmente. Cependant, il ne faut pas perdre de vue qu'elles ne font pas le même travail. La puissance augmente bien plus vite que la taille.

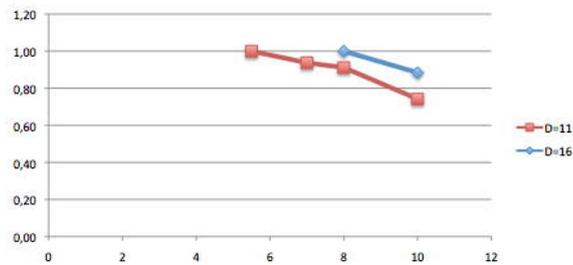
		n10N	n100W	RPM	1000	2000	4000	rapport	RPM = 2000
APC E	6x4	21685	16143	Eff	91,22	45,61	22,80	1	0,14 Watts
APC E	9x6	9373	8147	Eff	62,76	31,38	15,69	0,69	1,4 Watts
APC E	12x8	5734	5473	Eff	50,84	25,42	12,71	0,56	3,7 Watts



Lorsque l'on choisit une hélice de taille plus importante, on choisit généralement un pas plus petit, de manière à utiliser la même puissance du moteur.

Pour 100W

	D	pas	n10N	n100W	Efficacité	rapport
APC E	11	5,5	7289	6714	8,65	1,00
APC E	11	7	6825	6087	8,11	0,94
APC E	11	8	6527	5740	7,89	0,91
APC E	11	10	6550	5198	6,42	0,74
APC Sport	16	8	3400	3587	11,35	1,00
APC Sport	16	10	3400	3373	10,04	0,88



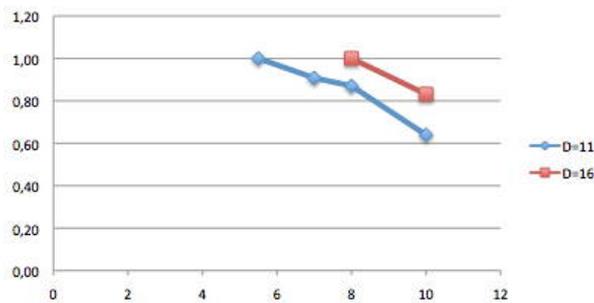
A puissance égale, l'effet du pas est négatif sur l'efficacité des hélices de même diamètre. Il est donc préférable d'utiliser une hélice plus grande avec un pas plus petit.

Puisqu'à puissance égale l'efficacité est meilleure avec un pas plus petit, elle est meilleure aussi pour une même force de traction ( $Eff = F / P$ ).

pour 10N

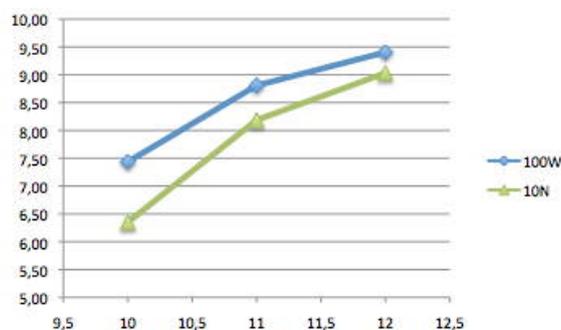
	D	pas	n10N	n100W	efficacité	rapport
APC E	11	5,5	7289	6714	7,97	1,00
APC E	11	7	6825	6087	7,23	0,91
APC E	11	8	6527	5740	6,94	0,87
APC E	11	10	6550	5198	5,10	0,64
APC Sport	16	8	3400	3587	11,97	1,00
APC Sport	16	10	3400	3373	9,96	0,83

L'effet est même plus important à force égale qu'à puissance égale (exposant = 1,5), ce qui est normal car la puissance évolue comme le cube de la vitesse alors que la force évolue au carré. Exemple de l'APC E 11 x 10 (à 100W → 0,74 et à 10 N → 0,64):  $0,74^{1,5} = 0,64$



Voici maintenant l'évolution de l'efficacité en fonction du diamètre pour une puissance de 100 Watts et pour une traction de 10 Newtons (1019,7 grs).

		n10N	n100W	Pour →	100 W	10N
APC Sport	10	6	8450	13,41	7,44	6,35
APC Sport	11	6	6811	13,94	8,81	8,19
APC Sport	12	6	5698	12,86	9,40	9,03



Non seulement l'efficacité augmente quand on diminue le pas (pour un même diamètre) mais elle augmente aussi avec le diamètre (à pas constant). Il est donc évident que l'efficacité sera encore meilleure avec un diamètre plus grand et un pas plus petit. Ce qui est recherché en vol stationnaire, c'est une force de traction avec la plus grande efficacité. Voici la comparaison de 3 hélices à 100 Watts et à 10 Newtons. La progression de l'efficacité est énorme lorsqu'on augmente le diamètre tout en diminuant le pas.

			n10N	n100W	100 W	10N
APC E	12	8	5734	5473	9,29	8,87
APC E	13	8	5074	5037	10,05	9,98
APC E	14	7	4417	4843	12,26	13,44

Cependant, il y a parfois des surprises. A titre d'exemple, voici la comparaison de 3 hélices à 100 Watts et à 10 Newtons. Ce sont des hélices qui peuvent convenir à un quadricoptère de 2 à 3,5 Kg.

			Eff	à 100W	à 10N
RCTimer	13	4		9,17	8,70
RCTimer	13	6,5		10,28	10,32
RCTimer	14	4,7		9,65	9,39

Ici, l'hélice 13 x 6,5 est plus efficace que la 13 x 4 et cela est étrange mais la 18 x 4 analysée plus haut était étrange aussi du point de vue des angles d'incidences. Dans les deux cas, il s'agit d'hélices en carbone pour multicoptères. Il faut donc mesurer et comparer les hélices pour ne pas se tromper.

### ***La position de l'hélice***

L'air qui passe dans l'hélice est accéléré et les perturbations de son écoulement que les éléments de la machine engendrent sur son passage sont plus dommageables après cette accélération. Il est donc avantageux de positionner les hélices en dessous du moteur plutôt qu'au-dessus.

## Choisir un moteur d'essai

### Evaluation de la puissance du moteur d'essai

Il est question ici de mesurer les différentes hélices qui pourraient convenir avec un moteur de puissance suffisante. Je mesure la puissance, la tension et le courant de batterie mais ces mesures sont entachées d'erreurs. La tension de batterie n'est pas la tension appliquée au moteur, celle-ci dépend de la manette des gaz et des pertes dans le variateur de vitesse ainsi que dans le système de mesure du courant (ampèremètre ou autre). Le courant est aussi légèrement différent de la mesure puisqu'il comprend aussi celui qui traverse le récepteur de télécommande et le variateur de vitesse. La puissance mesurée ( $P = V \times I$ ) donne une bonne indication MAIS IL S'AGIT DE LA PUISSANCE ELECTRIQUE. La puissance électrique comporte les pertes du moteur et ces dernières ne sont pas négligeables ( $P_m = P - \text{pertes}$ ). La puissance mécanique, celle qui sert à faire tourner l'hélice, s'exprime  $P_m = P \times \eta$  ( $\eta$  est le rendement du moteur). Acheter différents moteurs pour tester les hélices a un coût qu'il est possible d'éviter. En prenant comme base de départ une efficacité d'hélice de 8,5 grs/Watts, soit  $\approx 120$  Watts/Kg. Par exemple, chaque moteur d'un quadricoptère muni d'hélices 18x4 et d'un poids de 4,25Kg devrait utiliser 125 Watts mécaniques en stationnaire. Pour garantir une bonne manœuvrabilité, chaque moteur devrait pouvoir fournir une traction d'au moins deux fois celle fournie en stationnaire (rapport traction/poids > 2). La puissance pour fournir 2 fois plus de traction peut être évaluée comme suit:

De la formule  $F = k_f (D^2 P^2)^{2/3}$ , il découle que  $P = k_p F^{3/2} / D$

Le rapport des puissances est donc de

puissance mécanique A l'hélice		puissance électrique $\eta = 0,8$
$2^{3/2}$ soit $2,83 \times 125 = 350$ Watts	pour un rapport traction/poids de 2	$\approx 440$ Watts
$2,5^{3/2}$ soit $3,95 \times 125 = 490$ Watts	pour un rapport traction/poids de 2,5	$\approx 610$ Watts
$3^{3/2}$ soit $5,19 \times 125 = 650$ Watts	pour un rapport traction/poids de 3	$\approx 810$ Watts

Cela indique qu'un moteur d'essai de +/- 600 Watts serait un bon choix. Il permettra de comparer les performances des hélices pour choisir la meilleure.

### Evaluation du KV du moteur d'essai

Le KV d'un moteur brushless est un paramètre qui indique à quelle vitesse tourne le moteur en fonction de la tension qui lui est appliquée (nombre de tours par minute et par volt). Puisque le moteur tourne d'autant plus vite que la tension est élevée, le choix du KV dépend de la batterie utilisée. Les batteries LiPo sont caractérisées par leur capacité et leur tension mais aussi par leur courant maximum. Le courant maximum indiqué par un chiffre suivi de la lettre C répond à la formule  $I_{max} = \text{Capacité} \times C$ . Par exemple une batterie de 10000 mAh, soit 10 ampères avec  $C = 10$  donne un courant maximum de  $10 \times 10 = 100$  ampères. Ce paramètre C est également responsable du poids de la batterie. Plus C est élevé et plus la batterie est lourde par rapport à la tension qu'elle délivre, ce qu'il faut éviter. Puisque  $P = V \times I$ , il est préférable d'utiliser une batterie de plus forte tension afin de diminuer le courant maximum nécessaire et de permettre le choix d'une batterie plus légère (C plus faible). Ce choix implique un KV plus faible mais le choix du KV dépend également de l'hélice. Le KV doit être suffisant pour obtenir la vitesse de rotation avec laquelle on obtient la traction maximale (rapport traction/poids > 2).

La force de traction dépend de la masse volumique de l'air " $\rho$ ", d'un coefficient de traction propre à l'hélice " $C_t$ ", du carré de la vitesse de rotation " $n$ " et du diamètre de l'hélice " $D$ " élevé à la puissance 4.

$$F = \rho \cdot C_t \cdot n^2 \cdot D^4$$

F : la force de traction

$\rho$  : la masse volumique de l'air en  $\text{kg/m}^3$ , soit  $1,225 \text{ kg/m}^3$  à 0 m d'altitude en atmosphère standard ( $15^\circ\text{C} - 1013 \text{ hPa}$ )

$C_t$  : le coefficient de traction

$n$  : la vitesse de rotation de l'hélice

D : le diamètre de l'hélice

J'ai simplifié cette formule comme suit:  $F = 1,084.10^{-9}.n^2.D^4$  d'où  $n = 30373 \times F^{1/2} / D^2$ . Il suffit d'utiliser le diamètre en pouces et la force de traction en grammes pour obtenir la vitesse de rotation en tours/minute avec une précision suffisante. Par exemple pour fournir 2300 grs de traction, mon hélice 18 x 4 doit tourner à  $30374 \times (2300)^{1/2} / 18^2 = 30373 \times 47,96 \times 5832 = 4505$  trs/min. Avec une batterie 6S (6 éléments LiPo) le KV minimum est

$$KV_{\min} = n / V_{\text{utile}} = n / (V - r_i \cdot I) = n / (V - r_i (P / V)) = n V / (V^2 - r_i \cdot P).$$

Dans mon exemple avec le moteur d'essai de 600 Watts ayant une résistance interne de 0,1 Ohm

$$KV_{\min} = 4505 \times 22,2 / (492,84 - (0,1 \times 600)) = 231$$

Pour résumer, le moteur d'essai sera un 600 Watts avec un  $KV_{\min}$  supérieur à 230. Avec les gaz au maximum et ce KV, la vitesse de rotation de l'hélice serait de 4500 trs/min, juste suffisante pour le vol stationnaire. Mais il est préférable de disposer d'un moteur permettant d'obtenir la traction maximale. Pour résumer, si l'on dispose déjà d'un moteur permettant d'atteindre 1,5 fois la traction du vol stationnaire, il peut être utilisé pour les essais d'hélices. Si on ne dispose pas d'un tel moteur, il est préférable d'en choisir un dont le KV permettra d'atteindre la traction maximale, améliorant ainsi les chances de choisir un moteur d'essai qui pourrait devenir un des moteurs définitifs du quadricoptère. Utiliser un moteur de test dont on dispose déjà mais de trop faible puissance permet d'éviter l'achat d'un nouveau moteur mais toutes les hélices devront être testées à nouveau avec le moteur qui sera choisi pour le quadricoptère et il devra être comparé par calcul avec d'autres pour s'assurer qu'il est le bon choix. Dans le cas contraire, il deviendra un moteur de test, lui aussi.

### *Formules et paramètres*

**Puissance:**  $P_{\text{électrique}} = P_{\text{mécanique}} / \eta$  avec le rendement estimé au départ à  $\eta = +/- 0,8$

**KV:** en fonction de la plage des vitesses de rotation, des valeurs maximales de puissance et de courant ainsi que des pertes dues à la résistance, on détermine la plage des KV possibles.

$$KV_{\min} = RPM_{\min} * I_{\max} / (P_{\max} - (r_i \times I_{\max}^2)) \text{ avec RPM, le nombre de tours par minute}$$

$$KV_{\max} = RPM_{\max} * I_{\max} / (P_{\max} - (r_i \times I_{\max}^2))$$

**Nombre d'éléments de batterie:** une tension élevée demande moins de courant pour fournir la même puissance et c'est ce courant qui détermine principalement les pertes ( $r_i \times I^2$ ). De plus, la technologie des batteries engendre un rapport énergie/poids d'autant plus défavorable que le courant maximal est élevé. Il est donc préférable de choisir une tension haute ( $I = P / V$ ). Il y a cependant une limite car le KV du moteur devra alors être plus faible et il n'est pas toujours facile de trouver le moteur adéquat.

**Résistance interne du moteur:** la résistance des bobinages du moteur est, avec le courant, responsable des pertes, il est bon qu'elle soit la plus faible possible.

**Courant à vide:** le courant à vide est celui qui est consommé alors que le moteur tourne sans hélice. Il est inutile et doit être le plus faible possible.

**Courant maximum:** le courant maximum dépend des pertes que l'échauffement des bobinages ( $r_i \times I^2$ ) met en évidence. En estimant le rendement à 80%,  $I_{\max} = 0,8 \times P_{\max} / V$ .

### **Choisir l'hélice**

Le choix de l'hélice se fait par mesures avec le moteur test. Elles sont comparées entre elles pour trouver celle qui produira la traction de sustentation (stationnaire) en utilisant le moins de PUISSANCE MECANIQUE. La puissance mécanique ne peut être mesurée simplement, elle est calculée à partir de la PUISSANCE ELECTRIQUE. Il faut donc avoir connaissance des paramètres du moteur avec le plus de précision possible. En effet, des hélices différentes devront tourner à des vitesses différentes pour fournir la même traction et si le rendement du moteur varie beaucoup dans cette plage de vitesses, les résultats peuvent conduire à des erreurs de jugement. Il est alors possible (mais rare) qu'une hélice ayant les meilleurs résultats se révèle par la suite moins bonne. Une hélice jugée moins bonne peut s'avérer meilleure avec un autre moteur. Il arrive qu'une hélice ne puisse pas être choisie parce qu'il

n'existe pas de moteur qui lui corresponde exactement, par exemple si aucun moteur disponible ne permet d'obtenir le rapport traction/poids suffisant ou ne correspond pas à d'autres critères, comme un poids de moteur trop élevé.

Chaque hélice pressentie pour équiper le quadricoptère sera mesurée. On notera les paramètres suivants: puissance, courant, vitesse de rotation, traction. Si on ne dispose pas d'un appareil qui mesure la puissance, on mesure alors la tension de batterie que l'on multiplie par le courant mesuré.

La tension appliquée au moteur n'est pas la tension de batterie mais une tension moyenne des impulsions fournies par le variateur de vitesse. Elle est calculée par la formule suivante:

$$V_m = (P_{\text{élec}} / (I - I_0)) + (r_i \times I)$$

Le rendement, rapport entre la puissance fournie par la batterie et celle reçue à l'hélice est:

$$\eta = (V - (r_i \times I)) \times (I - I_0) / (V \times I) = P_{\text{méc}} / P_{\text{élec}}$$

La puissance mécanique, numérateur de la formule ci-dessus est:

$$P_{\text{méc}} = (V - (r_i \times I)) \times (I - I_0) = \eta \times P_{\text{élec}}$$

On calcule deux valeurs spécifique de chaque hélice: le n100W et le n10N, respectivement la vitesse à laquelle l'hélice demande 100 Watts mécaniques et celle à laquelle elle fournit une traction de 10 Newtons. Ces valeurs ne sont constantes pour l'hélice qu'en théorie car en pratique on relève des différences significatives. Pour minimiser l'importance entre la théorie et la pratique, 2 solutions sont possibles:

#### 1) Solution selon n10N et n100W

On calcule n100W et n10N pour une traction proche de celle du vol stationnaire. La puissance mécanique devrait varier en fonction du cube de la vitesse de rotation, le n100W permet donc de calculer la puissance nécessaire en fonction de la vitesse de rotation.

$$P_m = \rho \cdot C_p \cdot n^3 \cdot D^5$$

$$n_{100W} = n * (100 / P_m)^{1/3} \rightarrow n_{\text{sta}} = n_{100W} / (100 / P_{m_{\text{sta}}})^{1/3} \rightarrow P_{m_{\text{sta}}} = 100 * (n_{\text{sta}} / n_{100W})^3$$

La traction devrait varier en fonction du carré de la vitesse de rotation, le n10N permet de calculer la traction fournie en fonction de la vitesse de rotation.

$$F = \rho \cdot C_t \cdot n^2 \cdot D^4$$

$$n_{10N} = n * (10 / F)^{1/2} \rightarrow n_{\text{sta}} = n_{10N} / (10 / F_{\text{sta}})^{1/2} \rightarrow F_{\text{sta}} = 10 * (n_{\text{sta}} / n_{10N})^2$$

Il est probable que cette solution donne des résultats qui s'éloignent progressivement de la réalité pour des vitesses supérieures.

#### 2) Solution selon $F = k_f (n/1000)^{\text{exp}_f}$ et $P = k_p (n/1000)^{\text{exp}_p}$

A partir des mesures effectuées, il est préférable de déterminer les facteurs et exposants des formules avec la feuille Excel *adaptation* (Le drone\_V2.1). On obtient ainsi des valeurs plus précises quelle que soit la vitesse considérée.

$$F = k_f (n/1000)^{\text{exp}_f} \rightarrow n = (F / k_f)^{1/\text{exp}_f}$$

$$P = k_p (n/1000)^{\text{exp}_p} \rightarrow n = (P / k_p)^{1/\text{exp}_p}$$

L'efficacité de l'hélice est l'élément déterminant le choix de l'hélice.

$$\text{Eff} = F / P_{m_{\text{sta}}}$$

## Choisir le moteur du quadricoptère

Tout ce qui précède le choix du moteur est basé à la fois sur la taille du quadricoptère, de ses hélices et sur le poids estimé de la machine. Or, le poids peut avoir été mal estimé, notamment parce que le poids des moteurs n'est pas connu au départ. Choisir le moteur du quadricoptère, c'est donc aussi refaire tous les calculs en fonction du poids réévalué de la machine, opération qui peut aboutir à changer le choix des hélices, etc... De plus, le meilleur choix de motorisation n'est pas forcément celui qui correspond à la meilleure hélice mais au meilleur couple hélice-moteur disponible sur le marché. Il est donc vivement recommandé de disposer d'un tableur informatique pour se décharger de tous ces calculs fastidieux et "définitivement provisoires". Dans l'appréciation de l'efficacité des différents couples moteur-hélice, il faut tenir compte du poids du moteur. Tant que le couple moteur-hélice ne soulève pas son propre poids, son efficacité est nulle. L'essentiel étant de comparer l'efficacité en vol à différents rapports de traction (stationnaire et 1,5 x stationnaire par exemple). Le calcul de l'efficacité sera effectué pour diverses valeurs de traction auxquelles on enlève la différence de poids du moteur concerné par rapport à celui des moteurs comparés qui est le plus lourd. Ainsi, les calculs tiennent compte du fait que l'utilisation de moteurs plus légers aboutit à une machine plus légère.

Le choix du moteur s'effectue de la même manière que pour le moteur de test mais cette fois il est indispensable qu'il puisse amener le rapport traction/poids à celui choisi (au moins 2). La force de traction maximale ( $F_{\max}$ ) est déterminée par ce coefficient traction maximale/poids ( $k_{t/p}$ ).

### Importance du KV

Le KV est le paramètre le plus important car c'est lui qui fait économiser le plus de poids.

Explication: l'élément le plus lourd du quadricoptère est la batterie (une LiPo 6S 10000 mAh fait plus de 1 Kg.) et transporter des éléments Lipo inutilement est à éviter. Le KV ne doit pas être tel qu'il permette de faire tourner le moteur plus vite que nécessaire. C'est donc le coefficient traction/poids qui détermine le KV conjointement avec la tension de batterie ( $F_{\max} = m \times k_{t/p}$ ). Le meilleur choix est celui d'un KV qui fait tourner le couple moteur-hélice à la vitesse qui crée la traction maximale lorsque la puissance et le courant du moteur sont maximums.

$$KV = RPM_{\max} / (V_{\max} - (r_i \times I_{\max}))$$

Un KV trop faible conduira à une machine aux réactions molles. Un KV trop élevé conduira à une machine plus réactive que souhaitée et dont il faudra peut-être limiter les gaz à la télécommande pour ne pas endommager les moteurs. S'il fallait limiter les gaz de manière à réduire de plus de 3,7 volts la tension envoyée au moteur, cela signifierait que l'on transporte inutilement un élément de batterie. Par exemple, emporter une batterie 6S alors qu'une 5S suffirait (pour obtenir le rapport traction/poids souhaité) conduit à diminuer le temps de vol en proportion du rapport des poids exposant 1,5. Sur un quadricoptère de 3 Kilos dont la batterie 6S ferait 1 kilo, un élément pèse 166 grs et représente 5,5% du poids de la machine, mais son transport représente 8,4% de la consommation:  $(105,5 / 100)^{1,5} = 1,084$ .

### La méthode

Pour avoir une bonne idée de l'autonomie qu'aura la machine, il faut savoir quelles seront les différentes forces de tractions utilisées en vol et en quelles proportions. La plupart du temps, en photographie aérienne, la traction est celle qui permet le vol stationnaire ou des déplacements doux. On peut estimer cette traction à 1,25 x la traction en stationnaire. Pour visualiser la manière dont évolue l'efficacité du couple moteur-hélice, on choisi d'effectuer les calculs pour 3 valeurs de traction: en stationnaire, maximale et pour une valeur intermédiaire ( $F_{\text{int}}$ ).

$$F_{\max} = M * k_{t/p} / 4 = F_{\text{sta}} * k_{t/p}$$
$$F_{\text{int}} = (F_{\text{sta}} + F_{\max}) / 2$$

## Les étapes

A partir de la force de traction à obtenir, on calcule la vitesse de rotation nécessaire:

$$n = n_{10N} / (10 / (F_{sta} * 0,00981))^{1/2}$$

ou

$$n = (F / k_f)^{(1 / \exp f)}$$

0,00981 est destiné à passer des grammes aux Newtons.

A partir de la vitesse de rotation, on calcule la puissance MECANIQUE nécessaire:

$$P_{méc} = (n / n_{100W})^3 * 100$$

ou

$$n = (P / k_p)^{(1 / \exp p)}$$

A partir des paramètres d'hélice (puissance mécanique et vitesse de rotation) et des paramètres du moteur (KV et courant à vide), on calcule le courant nécessaire:

$$I = (KV * P_{méc} / n) + I_0$$

A partir de la vitesse de rotation, du courant, du KV et du courant à vide, on calcule la tension nécessaire:

$$V = (P_{méc} / (I - I_0)) + (I * r_i)$$

A partir du courant et de la tension, on calcule la puissance ELECTRIQUE nécessaire:

$$P_{élec} = V * I$$

Ayant la force de traction et la puissance électrique nécessaire, nous avons l'efficacité globale:

$$Eff = F / P_{élec}$$

Lorsque qu'un couple moteur-hélice est le meilleur en efficacité pour une valeur de traction intermédiaire (dans la moitié inférieure de la plage des tractions), on peut estimer que c'est le bon choix.

### **Choisir la batterie LiPo**

Le nombre d'éléments a été choisi plus tôt, le plus élevé possible. Le poids de la machine a déjà été estimé aussi mais le poids de la batterie est fonction de sa technologie et de l'énergie qu'elle contient. Cela produit des effets inattendus. Pour comprendre, il suffit d'imaginer une batterie avec énormément d'énergie mais que le quadricoptère ne peut pas soulever (temps de vol = 0). A l'inverse, il suffit d'imaginer une batterie très légère (1 grs) et donc avec peu d'énergie (1 mAh), pas le temps de décoller que la batterie est déjà vide! Dans les deux cas, le temps de vol sera plus court qu'avec une batterie d'un poids intermédiaire. Il faut calculer l'impact du poids de la batterie sur le temps de vol pour s'assurer de ne pas dépasser le courant maximum avec une batterie trop lourde ou de faire baisser le coefficient traction/poids maximal. Généralement, le temps de vol (en stationnaire) augmente avec la capacité de la batterie mais le coefficient traction/poids maximal diminue, ce qui diminue la maniabilité en vol.

## Résumé

### 1 Hélices

- diamètre des hélices proche de classe du quadri divisé par 2
- pas de l'hélice aussi faible que possible
- hélice de type bipale placée sous le moteur

### 2 Tension de fonctionnement

Choisir une tension de fonctionnement élevée afin de profiter de la technologie LiPo la plus légère (à courant maximum faible).

### 3 Moteur d'essai

A partir d'une efficacité d'hélice pour une traction de 2 fois le poids de la machine, calculer la puissance mécanique nécessaire et en déduire la puissance électrique pour un rendement supposé

Calculer le KV minimum et la puissance du moteur pour atteindre au moins 1,25 x la traction nécessaire au vol stationnaire pour les hélices à tester

Si on dispose d'un tel moteur, rien ne s'oppose à tester les hélices. Cependant, un moteur pouvant fournir la puissance nécessaire pour atteindre au moins 2 x la traction nécessaire au vol stationnaire est préférable, d'autant qu'il pourrait devenir un des moteurs de la machine.

### 4 Comparer des hélices

Relever pour différentes valeurs de traction, la vitesse de rotation, le courant et la puissance au moyen d'un testeur de batterie de modélisme

Calculer pour chaque hélice les valeurs de  $n_{10N}$  et  $n_{100W}$  ou mieux, les facteurs et exposants des formules  $F = k_f (n/1000)^{exp_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{exp_p}$ , qui permettront de choisir les moteurs de la machine. Pour évaluer la qualité de l'hélice, son efficacité est estimée en fonction de la puissance mécanique (puissance électrique X rendement). C'est la qualité de l'hélice qui est estimée, pas celle du moteur d'essai.

### 5 Comparer les moteurs

Calculer les performances des moteurs pour chaque hélice en fonction du poids de la machine et du coefficient traction/poids maximal (qui peuvent être modifiés pour différentes raisons).

### 6 Choisir le meilleur couple moteur-hélice du quadricoptère

Le choix s'effectue en fonction de l'efficacité du couple moteur-hélice à la traction statistiquement la plus utilisée (1,25 x traction du vol stationnaire).

### 7 La batterie

Calculer pour différentes capacités de batterie l'incidence de leur poids sur le temps de vol (en stationnaire) et sur le coefficient traction/poids maximal.

Eventuellement vérifier qu'un autre couple moteur-hélice n'est pas meilleur.

## **Description du dossier Excel "Drone\_V2.1"**

Les cellules en jaune sont protégées et nécessitent d'ôter la protection pour être modifiées.

Les cellules en vert sont celles qui sont prévues pour recueillir vos données. Les autres couleurs sont destinées à attirer l'attention.

### ***Feuille de calcul n°1: Taille***

Valeurs à encoder:

- taille
- poids

La taille du quadricoptère est l'espace en millimètres compris entre les axes de deux hélices opposées en diagonale.

Valeurs calculées:

- taille des hélices
- diamètre approximatif du centre du châssis

### ***Feuille de calcul n°2: graph***

Affichage en élévation de la forme du quadricoptère.

### ***Feuille de calcul n°3: moteur test***

Valeurs à encoder (première partie):

- diamètre des hélices
- efficacité estimée des hélices
- coefficient traction/poids maximal attendu
- rendement espéré du moteur
- nombre d'éléments Lipo
- résistance interne du moteur supposée

Il s'agit ici d'une première approximation des paramètres d'un moteur permettant de tester des hélices de la taille considérée.

Valeurs calculées:

- rapport puissance poids
- traction (par moteur) en vol stationnaire
- puissance mécanique nécessaire au vol stationnaire
- vitesse de rotation en vol stationnaire
- traction maximale attendue
- puissance mécanique nécessaire à la traction maximale
- puissance électrique nécessaire à la traction maximale
- vitesse de rotation nécessaire à la traction maximale
- KV minimum du moteur

Valeurs à encoder (deuxième partie):

- marque et type du moteur (anecdotique)
- puissance du moteur
- KV du moteur
- nombre d'éléments LiPo
- résistance interne du moteur
- courant à vide du moteur
- courant maximum du moteur

Valeurs calculées:

- KV minimum du moteur évalué pour la traction en vol stationnaire

- KV minimum pour la traction maximale ( $F_{sta} \times k_{t/p}$ )
- la plage des tractions possibles sans dépasser les valeurs critiques du moteur

En fonction des paramètres encodés, des remarques peuvent apparaître ou des impossibilités signalées. Un tableau est présenté dans la plage des tractions possibles sans dépasser les valeurs critiques du moteur (rouge).

Les valeurs affichées du tableau sont:

- vitesse de rotation
- puissance mécanique
- tension
- courant
- puissance électrique
- rendement du moteur

#### **Feuille de calcul n°4: moteurs et mesures**

20 moteurs sont déjà encodés

Valeurs à encoder:

- caractéristiques des moteurs ( $r_i$ ,  $I_0$ ,  $P_{max}$ , KV,  $I_{max}$  et poids)
- valeurs mesurées de l'hélice (RPM, traction, I et  $P_{elec}$ )

Un bouton permet de copier les valeurs de l'hélice dans *base mesures*

#### **Feuille de calcul n°5: base mesures**

39 hélices sont déjà encodées

Valeurs à encoder:

- caractéristiques des hélices (marque et type, diamètre, pas)
- valeurs mesurées de l'hélice (RPM, traction, Puissance mécanique) pour 10 vitesses de rotation
- éventuellement n10N, n100W et les facteurs et exposants des formules  $F = k_f (n/1000)^{exp_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{exp_p}$
- le numéro de l'hélice dont on souhaite trouver les valeurs à l'aide de la feuille *adaptation*

#### **Feuille de calcul n°6: adaptation**

Valeurs à encoder:

- n10N, n100W et les facteurs et exposants des formules  $F = k_f (n/1000)^{exp_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{exp_p}$

Un bouton permet de copier les valeurs de l'hélice dans *base mesures*

#### **Feuille de calcul n°7: test hélices**

Il est possible d'encoder 6 hélices présentes dans *base\_mesures*.

Valeur à encoder (par hélice):

- son numéro dans *base\_mesures*

Valeurs calculées:

- tension
- rendement
- puissance mécanique
- n100W
- n10N
- efficacité mécanique

Du point de vue de l'efficacité en vol stationnaire, la meilleure hélice est signalée en rouge ainsi que sa vitesse de rotation. Différents graphiques montrent

- pour chaque hélice, les puissances mécanique et électrique en fonction de la traction
- l'efficacité mécanique en fonction de la traction

- la divergence des vitesses de rotation calculées en fonction du n10N et du n100W et des **formules**  
 $F = k_f (n/1000)^{exp_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{exp_p}$

### **Feuille de calcul n°8: moteurs**

Il est possible de choisir 3 moteurs présents dans la feuille *moteurs et mesures* et de changer le poids de la machine ainsi que le coefficient traction/poids maximal.

Valeur à encoder (par moteur):

- son numéro dans *moteurs et mesures*

Valeurs utilisée (par moteur):

- marque
- type
- puissance
- KV
- nombre d'éléments LiPo
- résistance interne
- courant à vide
- courant maximum
- poids du moteur

Valeurs calculées pour chaque moteur et pour des tractions correspondant à 1, 1,5 et celle nécessaire au vol stationnaire multipliée par le coefficient traction<sub>max</sub> / poids:

- la vitesse de rotation, la puissance mécanique, le courant, la tension, la puissance électrique et l'efficacité globale

Pour prendre en compte le poids des moteurs, le calcul diminue la traction à atteindre de la différence de poids de chaque moteur par rapport au moteur le plus lourd. En effet, la machine est plus légère avec des moteurs plus légers. Un graphique est établi pour chaque moteur avec chacune des hélices.

### **Feuille de calcul n°9: moteur-hélice**

Il n'y a aucune valeur à encoder ici.

Divers tableaux et un graphique affichent l'efficacité des couples moteur-hélice testés et indiquent le meilleur choix du point de vue du rendement global dans la première moitié des valeurs de traction.

### **Feuille de calcul n°10: LiPo**

3 batteries peuvent être comparées au niveau de leur impact sur le temps de vol.

Valeurs à encoder:

- choix du moteur
- choix de l'hélice
- capacité et poids de chaque batterie
- pourcentage utilisé de la capacité de la batterie
- poids de la machine sans batterie

Valeurs calculées pour chaque batterie et pour des tractions correspondant à 1, 1,5 et 2 fois celle nécessaire au vol stationnaire:

- la vitesse de rotation, la puissance mécanique, le courant, la tension, la puissance électrique, l'efficacité globale et le temps de vol

Des graphiques montrent:

- l'efficacité selon le coefficient traction/poids
- le temps de vol selon le coefficient traction/poids
- l'évolution du temps de vol en stationnaire et du coefficient traction/poids maximal en fonction du poids de la batterie

***Feuille de calcul n°11: pour info***

Dans un but purement informatif, un tableau et des graphiques montrent les différences surprenantes que l'on peut constater entre le pas annoncé de certaines hélices et les valeurs relevées.

Un autre tableau associé à un graphique montre que la traction fournie par portion de pale de l'hélice diminue fortement en s'approchant de l'axe de rotation. Cette feuille disparaîtra dans les prochaines versions.

***Feuille de calcul n°12: mesures hélices***

Cette feuille disparaîtra dans les prochaines versions. Dans cette version 2.1, elle est remplacée par *test hélices*.

## Mode d'emploi du dossier Excel "Drone\_V2.1"

Ce mode d'emploi suit l'ordre des opérations et indique en titre la feuille de calcul correspondante. Les lettres et chiffres entre parenthèse indiquent les colonnes et rangée des feuilles Excel.

De manière générale, les valeurs à encoder se situent dans des cases vertes.

Les cases jaunes sont les résultats de calculs, elles ne peuvent être modifiées qu'en ôtant sa protection (menu Outils/Protection/Ôter la protection de la feuille).

Les autres couleurs sont destinées à attirer l'attention.

### **Feuille de calcul n° 1 : taille**

Cette feuille recueille les caractéristiques de base de la machine. Les premières valeurs à déterminer sont la classe du quadricoptère, définie par la distance entre les axes de moteurs opposés en millimètres, et le poids approximatif que devrait avoir la machine. Encodrez ces valeurs (E2 et E4) dans la première feuille de calcul: *taille*. Vous obtenez en retour un diamètre d'hélice conseillé (E6) et un diamètre approximatif de la partie centrale du châssis (Q19).

Un graphique montrant l'allure générale de la machine est présenté.

### **Feuille de calcul n° 2: graph**

Cette feuille présente l'allure générale de la machine.

### **Feuille de calcul n° 3: moteur test**

Cette feuille vise à déterminer si un moteur peut convenir pour tester les hélices qui devraient équiper le quadricoptère.

Décidez d'une taille d'hélice que vous encodrez dans le cadre **paramètres d'hélice** (G5), il vous est loisible de suivre ou pas le conseil d'hélice idéale (G4). C'est le diamètre d'hélice et le poids de la machine qui déterminent la vitesse de rotation attendue de l'hélice (G12).

Décidez d'une valeur d'efficacité d'hélice (G6) en vous basant sur votre expérience. Cette efficacité servira à calculer la puissance mécanique que devra fournir le moteur.

Attribuez un coefficient traction maximale/poids (G15) dans le cadre **paramètres machine**. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de la traction maximale sur celle nécessaire au vol stationnaire (poids). La valeur de 1,8 me paraît minimale, une valeur de 2 ou supérieure est meilleure pour la réactivité de la machine. Une valeur de 3 me paraît excessive. Passer de 2 à 3 pour ce coefficient a pour conséquence de multiplier la puissance nécessaire par  $(3/2)^{1,5} = 1,84$ , les moteurs seront sans doute plus lourds au détriment de l'autonomie de vol. La traction maximale (G16) et la puissance mécanique (G17) correspondante sont calculées.

Attribuez une valeur de rendement au moteur (G20), la puissance électrique maximale est alors calculée (G21). La vitesse de rotation (G22) est calculée en fonction de la traction maximale (G16).

Indiquez le nombre d'élément de la batterie (G24), la tension de batterie est calculée.

Indiquez la résistance interne du moteur (G27). Le KV minimum (G28) que le moteur devrait avoir est calculé en fonction de la tension maximale, de la résistance interne du moteur et de la puissance requise à la vitesse maximale.

**A ce stade, vous pouvez décider d'évaluer un moteur que vous choisissez parmi ceux déjà présents dans la feuille n°4 *moteurs et mesures* dont vous devez alors indiquer le numéro dans moteur test (D31). Il vous suffit ensuite d'utiliser le bouton "Importer ce moteur". Les paramètres du moteur apparaissent alors à l'endroit prévu pour l'encodage (cases vertes du cadre M3:U17) et de nombreuses valeurs sont calculées. Vous pouvez également choisir d'encoder les paramètres d'un moteur qui ne serait pas présent dans *moteurs et mesures*.**

Encodez la marque (N3) et le type (R3) de moteur, la puissance (R6), le KV (R7), le nombre d'éléments de la batterie (R8), la résistance interne (R9), le courant à vide (R10) et le courant maximal (R11). Les valeurs calculées apparaissent et, éventuellement, des remarques:

Valeur	Particularité du calcul	Remarque
Puissance		si trop faible pour traction maximale
KV		si trop faible pour traction maximale
Nb éléments LiPo		6 par défaut si non indiquée
Résistance interne		sans valeur, les résultats peuvent manquer de précision
Courant à vide	0 si non indiqué	sans valeur, les résultats peuvent manquer de précision
Courant maximum	$P_{\max} / V$ si non indiqué	si trop important
KV minimum	calculé pour traction max.	
RPM en vol stationnaire		précision ? (si Ri inconnue)
Tension en vol stationnaire		précision ? (si Ri inconnue)
Courant en vol stationnaire		si plus grand que $I_{\max}$
Puissance en vol stationnaire		

Un tableau (O22:AB28) montre, dans des cases jaunes, les valeurs que le moteur pourra atteindre lors de mesures réelles. La partie des valeurs que le moteur ne pourra pas atteindre apparaît en rouge. Les 3 raisons pour lesquelles le moteur ne peut fournir ces valeurs sont les suivantes:

- le courant serait trop important
- la puissance serait trop importante
- la tension de batterie ne suffirait pas

Dans l'ordre le tableau affiche la traction, la vitesse de rotation, la puissance mécanique, la tension, le courant, la puissance électrique et le rendement du moteur.

Un graphique montre l'allure des courbes des valeurs de ce tableau. Chaque courbe suit la proportion de sa valeur maximale à l'exception du rendement qui suit sa valeur exacte, forcément inférieure à 1.

La courbe de la puissance mécanique est cachée par la courbe de la tension car elles évoluent de la même manière.

Si vous avez encodé un moteur qui n'est pas présent dans la feuille n°4 *moteurs et mesures*, vous pouvez le copier sous un numéro que vous encodez (Y4) dans *moteur test*, à droite du bouton "copier dans moteur et mesures" qui effectue l'opération sur un simple click. Si vous avez indiqué un numéro sous lequel un moteur est déjà présent, un avertissement apparaît en rouge juste à droite du numéro (Z4).

#### **Feuille de calcul n° 4: moteurs et mesures**

Cette feuille détermine les puissances mécaniques à partir des puissances électriques mesurées. Elle permet l'encodage de moteurs et de mesures effectuées sur des hélices. 21 moteurs y sont déjà encodés.

Si votre moteur n'est pas présent dans la liste sur fond vert et cyan (A:I), vous pouvez l'y encoder. Toutefois, vous devriez l'avoir déjà encodé dans la feuille n°3 *moteur test* (afin de vérifier qu'il convient) et copié dans *moteurs et mesures*. Si c'est le cas, il vous reste à encoder le poids du moteur (colonne I).

Encodez la marque (M4), le diamètre (N4) et le pas (O4) de l'hélice testée.

Encodez le numéro sous lequel le moteur figure dans la liste (N6), les paramètres du moteur apparaissent sous le numéro encodé dans le même cadre (L6:O9).

Vous pouvez encoder jusqu'à 10 relevés (P:Z) à des vitesses de rotation différentes. Encodez la vitesse de rotation, la traction obtenue, le courant et la puissance électrique. Il est conseillé d'effectuer au moins 4 mesures pour des tractions réparties sur l'ensemble de la gamme. Les valeurs de puissance mécanique sont calculées (Q5:Z5) selon les paramètres du moteur, il faut donc vérifier que le moteur indiqué correspond bien à celui qui a servi aux mesures.

Copiez vos mesures d'hélice dans base mesures à l'aide du bouton "Copier dans base mesures". La copie s'effectue sous le premier numéro libre de *base mesures*, celui-ci est indiqué à droite et au dessus du bouton (P2).

## Feuille de calcul n° 5: base mesures

La raison d'être de cette feuille de calcul est d'indiquer l'hélice qui sera prise en compte dans la feuille *adaptation* pour déterminer les valeurs du n10N et du n100W ainsi que les facteurs et exposants des formules  $F = k_f (n/1000)^{\text{exp}_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{\text{exp}_p}$ .

La feuille *base mesures* reçoit les paramètres copiés depuis la feuille précédente: *moteurs et mesures* mais permet également l'encodage direct des paramètres. Il est possible d'encoder les valeurs de traction et de puissance mécanique pour 10 vitesses de rotation différentes. Les données sont:

- la dénomination de l'hélice: marque, diamètre et pas (B:D);
- les paramètres mesurés: RPM, traction et  $P_{\text{méc}}$  (F:O);
- les paramètres calculés: n10N, N100W et des facteurs et exposants des formules  $F = k_f (n/1000)^{\text{exp}_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{\text{exp}_p}$  (P:U).

Si vous n'avez pas mesurés vous-même les paramètres, l'encodage direct est utile. Si vous encodez ces paramètres directement, vérifiez que les valeurs de puissance sont celles de puissances **mécaniques et pas électriques**. Si vous ne disposez que de puissances électriques, encodez vos données dans *moteurs et mesures* ainsi que les paramètres  $R_i$  et  $I_0$  du moteur. Si les valeurs de  $R_i$  et  $I_0$  ne sont pas connues, les résultats manqueront de précision.

39 hélices sont déjà encodées. 5 hélices sont issues de mesures que j'ai effectuées, les autres proviennent du logiciel Drive Calculator. Les plages surlignées en vert correspondent à des **valeurs mesurées personnellement**. Les autres proviennent toutes du logiciel Drive Calculator. Certaines hélices provenant de Drive Calculator ont fait l'objet de simulation avec ce logiciel, ce qui a permis d'ajouter ou de corriger des paramètres. Les **valeurs surlignées en orange clair** ne posent pas de problème. **Les valeurs surlignées en orange vif** correspondent à des valeurs obtenues par simulation dans Drive Calculator mais qui n'étaient pas présentes dans la base de données du logiciel. Elles ont été intégrées à la feuille *base mesures* afin d'en déterminer les paramètres. Les **valeurs surlignées en rouge** ont les mêmes caractéristiques que celles surlignées en orange mais la simulation dans Drive Calculator a abouti à des résultats qui ne correspondaient pas aux valeurs d'origine de Drive Calculator.

Encodez les paramètres mesurés ou copiez les depuis *moteurs et mesures*, comme indiqué plus haut.

Indiquez le numéro de l'hélice dans le cadre jaune **pour adaptation** (Z1). Les valeurs déjà encodées ou calculées de l'hélice apparaissent dans le cadre jaune.

Passez à la feuille n°6 *adaptation*.

## Feuille de calcul n° 6: adaptation

La feuille *adaptation* sert à déterminer les valeurs du n10N et du n100W ainsi que les facteurs et exposants des formules  $F = k_f (n/1000)^{\text{exp}_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{\text{exp}_p}$ . Cela s'effectue en affectant des valeurs aux paramètres du **cadre vert (K5:P6)** de manière à faire coïncider les courbes des graphiques. Les mesures apparaissent dans le cadre jaune **mesures**. La dernière série de mesures est répétée automatiquement pour compléter les 10 possibilités de mesures afin de ne pas perturber l'allure des courbes (pas de zéro).

Des valeurs sont affichées pour les facteurs  $k_f$  et  $k_p$  dans le **cadre orange (G3:J16)** en tenant compte d'un exposant  $\text{exp}_f$  égal à 2 et d'un exposant  $\text{exp}_p$  égal à 3. Cela constitue une base de départ pour trouver les valeurs qui donneront aux courbes le plus de ressemblance à celles des mesures.

La courbe des tractions mesurées (à gauche) apparaît en bleu. La courbe des tractions calculées selon l'adaptation des facteurs et exposants en rouge et celle des tractions calculées selon le n10N en vert. La courbe des puissances mécaniques mesurées (à droite) apparaît en bleu. La courbe des puissances calculées selon l'adaptation des facteurs et exposants en rouge et celle des puissances calculées selon le n100W en vert.

Les valeurs éventuellement déjà présentes dans les données de la feuille *base mesures* sont affichées dans le cadre bleu **valeurs déjà dans la base de mesures** (K7:P10). Ces valeurs pourraient provenir d'une source quelconque et ne pas être correctes mais encoder les mêmes valeurs dans le **cadre vert (K5:P6)**

permet d'en vérifier la cohérence et de corriger les erreurs. Les valeurs de n10N et de n100W sont des valeurs moyennes calculées sur l'ensemble des mesures. Si aucune des valeurs du cadre bleu n'est présente dans *base mesures* le titre du cadre devient **pas de valeurs dans la base de mesures**. Les valeurs de traction et puissance figurant dans le **cadre jaune de droite (Q5:T16)** sont calculées en fonction des facteurs et exposants du **cadre vert (K5:P6)**, elles correspondent aux courbes rouge et peuvent être comparées à celles du cadre jaune de gauche **mesures** qui correspondent aux courbes en bleu. Les courbes affichées sont donc modifiées à chaque changement de valeur permettant ainsi d'approcher rapidement des valeurs adéquates.

Utilisez le bouton "Commencer" qui place des valeurs de départ dans le **cadre vert (K5:P6)**. Il s'agit des valeurs du **cadre jaune clair (K1:P4)** elles correspondent au tableau suivant:

facteur F	première valeur de la colonne G du cadre orange
exposant F	2
n10N	valeur moyenne de la colonne E du cadre jaune
facteur P	première valeur de la colonne H du cadre orange
exposant P	3
n100W	valeur moyenne de la colonne F du cadre jaune

Modifiez les valeurs selon la méthode suivante:

- pour les facteurs et exposants de traction (K6:L6) et de puissance (N6:O6);  
adaptez le bas de la courbe en rouge (adaptation) au bas de la courbe bleue (mesures) en modifiant le facteur, celui-ci change l'inclinaison de la courbe tandis que l'exposant change la cambrure de la courbe;  
si les parties supérieures des courbes rouges sont en dessous des courbes bleues, il y a lieu d'augmenter les exposants et de diminuer les facteurs;  
si les parties supérieures des courbes rouges sont au-dessus des courbes bleues, il y a lieu de diminuer les exposants et d'augmenter les facteurs.
- pour le n10N (M6) et le n100W (P6);  
diminuez les valeurs encodées si les courbes vertes sont en dessous des courbes bleues, et augmentez les valeurs encodées si les courbes vertes sont au-dessus des courbes bleues.

Utilisez le bouton copier situé en dessous du graphique "traction" pour transférer les **valeurs (C55:H55)** en bonne place dans la feuille *base mesures*.

### Feuille de calcul n° 7: test hélices

La feuille *test hélices* permet de comparer entre-elles jusqu'à 6 hélices choisies dans la feuille *base mesures* par simulation avec un moteur choisi dans *moteurs et mesures*. La comparaison est réalisée pour la gamme des tractions de la machine sur base des formules  $F = k_f (n/1000)^{\text{exp}_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{\text{exp}_p}$ .

Encodez dans le **cadre vert (J2)** de la feuille *test hélices* le numéro du moteur que vous avez choisi dans *moteurs et mesures*.

Encodez les numéros qui, dans *base mesures*, se rapportent aux hélices à comparer dans les cases vertes des **cadres jaunes (F10, F23, F36, F49, F62 et F75)**.

Les paramètres des hélices apparaissent et les calculs sont effectués dans tous les cadres jaunes. L'efficacité de chaque hélice est indiquée dans le **cadre jaune (T2:AD7)** ainsi que la vitesse à laquelle elle produit la traction de vol stationnaire. La meilleure hélice au point de vue de l'efficacité est signalée en rouge.

Pour chaque hélice, 3 graphiques montrent:

- les courbes des puissances **mécanique** et **électrique** en fonction de la vitesse de rotation
- les courbes d'efficacité **calculées selon les formules  $F = k_f (n/1000)^{\text{exp}_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{\text{exp}_p}$  et calculées selon n10N et n100W**

- les courbes des vitesses de rotation en fonction de la traction, **calculées selon n10N**, **calculées selon n100W** et calculées selon les **formules  $F = k_f (n/1000)^{exp_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{exp_p}$** . Les chiffres correspondant à ces graphiques sont indiqués à droite des graphiques (AQ:AV).

### **Feuille de calcul n° 8: moteurs**

La feuille *moteurs* effectue les calculs simulant jusqu'à 3 moteurs avec jusqu'à 6 hélices pour les valeurs extrêmes de la gamme des tractions et une valeur intermédiaire. Les moteurs sont à choisir en fonction de leurs numéros dans la feuille *moteurs et mesures* tandis que les hélices sont celles de la feuille *test hélices*.

Indiquez le rapport traction maximale/poids (E3) et le poids du quadricoptère (E4), ces cases permettent de changer les valeurs pour le calcul.

Indiquez (cases verte E6, E38 et E70) pour les moteurs 1, 2 et 3 les numéros qui sont les leurs dans *moteurs et mesures*. Les paramètres du moteur apparaissent et les calculs de rendement sont effectués pour chaque traction de chaque hélice dans les **cadres jaunes rendements moteur 1, 2 et 3**. Les autres valeurs calculées (vitesse de rotation, puissance mécanique, courant, tension, puissance électrique et efficacité globale) sont indiquées dans des cadres jaunes séparés en dessous des précédents.

Au dessus et à droite, un cadre jaune (P1:W10) reprend les paramètres des hélices.

Un graphique pour chaque moteur montre les courbes d'efficacité globale des hélices pour les 3 tractions indiquées. Ces valeurs de traction tiennent compte du poids des moteurs. Elles sont définies comme le poids de la machine sans les moteurs les plus lourds auquel on ajoute le poids des moteurs en cours d'examen. Les 3 tractions sont donc différentes d'un moteur à l'autre lorsque le poids du moteur est différent.

### **Feuille de calcul n° 9: moteur-hélice**

La feuille *moteur-hélice* présente l'ensemble des résultats du dossier:

- les paramètres des hélices (F1:V10)
- l'efficacité des couples moteur-hélice pour 3 valeurs de traction
  - traction en vol stationnaire (E15:P18)
  - traction intermédiaire (E20:P23)
  - traction maximale (E25:P28)
- l'efficacité maximale pour chaque traction avec indication de l'hélice qui l'atteint (F30:Q33)
- l'indication du meilleur moteur pour chaque hélice aux 3 valeurs de traction (C34:Q37)
- l'efficacité moyenne dans la moitié inférieure de la gamme des tractions pour chaque moteur et chaque hélice (G39:K49). Le meilleur **moteur**, la meilleure **hélice** et la meilleure **efficacité** sont signalées.
- Le **résumé** (F51:O54) indiquant:
  - l'efficacité maximale dans la moitié inférieure de la gamme des tractions
  - le numéro, la marque et le type du moteur permettant ce résultat
  - le numéro, la marque et le type d'hélice permettant ce résultat
  - le nombre d'éléments de la batterie LiPo
- un graphique présente les courbes de chaque hélice avec chaque moteur

### **Feuille de calcul n° 10: LiPo**

La feuille *LiPo* permet de comparer les performances qu'aurait la machine en fonction de l'hélice, du moteur et de 3 batteries utilisées. Essentiellement, il s'agit d'autonomie et de maniabilité. Chaque batterie a, en fonction de sa technologie, une certaine densité énergétique (Watts.Heures par Kilo) qui impacte directement la maniabilité (traction max/poids). La densité énergétique impacte également le temps de vol car non seulement la traction augmente avec le poids mais l'efficacité des hélices diminue.

Encodez la capacité et le poids des batteries à comparer (cases vertes C8:E9). Le poids de la machine sans batterie (O8) est calculé en tenant compte de la batterie la plus lourde.

Encodez le n° du moteur choisi (O3) et de la batterie choisie (O4). Tous les calculs impactant la consommation énergétique sont effectués pour chaque batterie. Un graphique de l'efficacité de l'hélice en fonction de la traction apparaît pour chaque batterie.

Encodez le pourcentage de la capacité de la batterie que vous comptez utiliser (I44) en tenant compte qu'il vaut mieux ne pas décharger complètement la batterie en vol. Les temps de vol (stationnaire) sont alors calculés pour chaque batterie. Un graphique présente la courbe du temps de vol en fonction de la traction pour chaque batterie. Vous constaterez que la batterie la plus légère a la meilleure efficacité (grs/watt) mais ne donne pas forcément la meilleure autonomie (temps de vol). Généralement, une batterie de plus grande capacité augmente le temps de vol mais au détriment de la maniabilité de la machine (traction<sub>max</sub>/poids). Il y a donc un compromis à trancher.

Encodez le poids de la machine sans batterie (I52). Celui calculé sur base du poids de la batterie la plus lourde figure dans le cadre (I7/p8) mais vous pouvez indiquer un autre poids. En effet, le poids de votre machine peut avoir été estimé pour une batterie de poids différent. Un graphique montre l'évolution du temps de vol et de la maniabilité (traction<sub>max</sub>/poids) en fonction du poids de la batterie pour la machine dont le poids sans batterie est celui indiqué. Vous remarquerez que le gain de temps de vol est de moins en moins sensible avec l'augmentation du poids de la batterie tandis que la maniabilité diminue fortement (à traction<sub>max</sub>/poids = 1, la machine ne vole pas).

### ***Feuille de calcul n° 11: pour info***

Dans un but purement informatif, la feuille *pour info* montre des mesures d'angles d'incidences effectuées sur 3 hélices: 13x4, 14x7 et 18x4. Un tableau et 6 graphiques montrent les différences surprenantes que l'on peut constater entre le pas annoncé de certaines hélices et les valeurs relevées.

Un autre tableau, associé à un graphique, montre que la traction fournie par portion de pale de l'hélice diminue fortement à l'approche de l'axe de rotation. La feuille *pour info* disparaîtra dans les prochaines versions.

### ***Feuille de calcul n°12: mesures hélices***

La feuille *mesures hélices* est la version précédente de *test hélices*, elle disparaîtra dans les prochaines versions. La différence entre ces feuilles est la suivante:

*test hélice* utilise les formules  $F = k_f (n/1000)^{\text{exp}_f}$  et  $P = k_p (n/1000)^{\text{exp}_p}$  avec des valeurs déduites des mesures;

*mesures hélices* calcule des valeurs de n10N et de n100W sur base de puissances mécaniques calculées à partir des puissances électriques et des paramètres du moteur.