

## Nouvelle étude de multicoptère photographique.

Je me suis demandé si il était possible de trouver une hélice plus efficace pour mon quadricoptère. Il est équipé d'hélices RCTimer 13x4 en carbone.

Lorsque, fin 2013, j'ai commencé l'étude pour réaliser mon quadricoptère, j'ai d'abord choisi la taille de la machine et donc celle des hélices. J'ai mesuré les paramètres des 13x4, 13x6 et 14x4,7 que j'ai comparés à ceux d'autres hélices trouvés dans le logiciel DriveCalc. Aujourd'hui, j'aimerais pouvoir emporter plus de poids pour mieux stabiliser mon appareil photo et diminuer les vibrations. Je vais donc être amené à augmenter la taille de la nouvelle machine.

J'ai cherché dans DriveCalc un ensemble hélice-moteur qui pourrait soutenir un stationnaire d'une machine de 3Kg et fournir un rapport de traction maximum de 3, soit 9Kg, et j'ai trouvé une hélice Tarot 18x5,5 et différents moteurs.

La surprise est de taille car la puissance nécessaire est très faible: 15,9 Watts mécaniques pour 750 grs par hélice. C'est trop beau pour être vrai, je suis d'ailleurs toujours persuadé que c'est impossible. De toute façon le prix de la Tarot TL2822 est prohibitif, j'ai donc trouvé une copie 8 fois moins chère chez Turnigy pour faire des mesures.

D'après mes calculs cette 18x5,5 devrait demander 46,4 Watts mécaniques pour fournir 750 grs à 2703 trs/min et mes mesures le confirme avec 45 Watts mécaniques à 2760 trs/min. C'est 3 fois plus qu'annoncé dans DriveCalc, il ne peut donc s'agir que d'une erreur de données fournies par Tarot dans DriveCalc. Le n100W annoncé est 4400 et celui de mon hélice est 3492. L'efficacité à 750 grs de traction statique est de 16,8 grs/W et pas de 47,4.

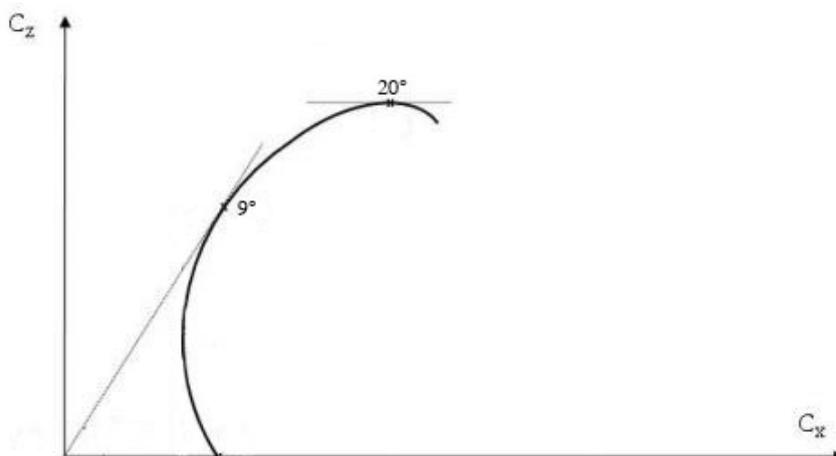
Pour comprendre ce qui détermine l'efficacité d'une hélice, j'ai d'abord cherché d'autres hélices et j'ai trouvé une Turnigy 18x4. Je me suis dit que moins de pas donnerait encore de meilleurs résultats à basse vitesse et donc aussi en stationnaire. Mais est-ce bien vrai?

La meilleure efficacité de l'hélice est atteinte lorsque le rapport entre la traction statique prévue et la puissance est le plus grand. C'est aussi lorsque le rapport portance/traînée du profil de l'hélice est le plus grand. Voyons donc si les mathématiques peuvent donner une solution.

Les formules respectives de la portance et de la traînée sont jumelles:

$$F_z = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_z \quad F_x = \frac{1}{2} \rho S C_x V^2$$

Finalement, on remarque que l'efficacité dépend du rapport des coefficients  $C_z/C_x$ . Ce rapport varie avec l'incidence du profil et est maximal au point de finesse maximale sur le graphique de la polaire.



L'angle approximatif de finesse maximale d'un profil est généralement autour de 9° et l'angle de décrochage se situe autour de 20°.

En stationnaire, l'angle d'incidence est l'angle de la pale par rapport à l'horizontale et il varie sur toute la longueur de la pale. Tous les paramètres varient le long de la pale et interviennent de la même manière pour Cz que pour Cx, ils n'ont donc pas d'influence sur l'efficacité "locale" de la pale. Deux endroits de même incidence auront le même rapport entre la puissance fournie et la force de traction résultante mais si la surface est plus grande ou si le nombre de Reynolds est plus grand, la puissance et la force seront plus grandes et elles auront plus d'importance dans le bilan de l'ensemble.

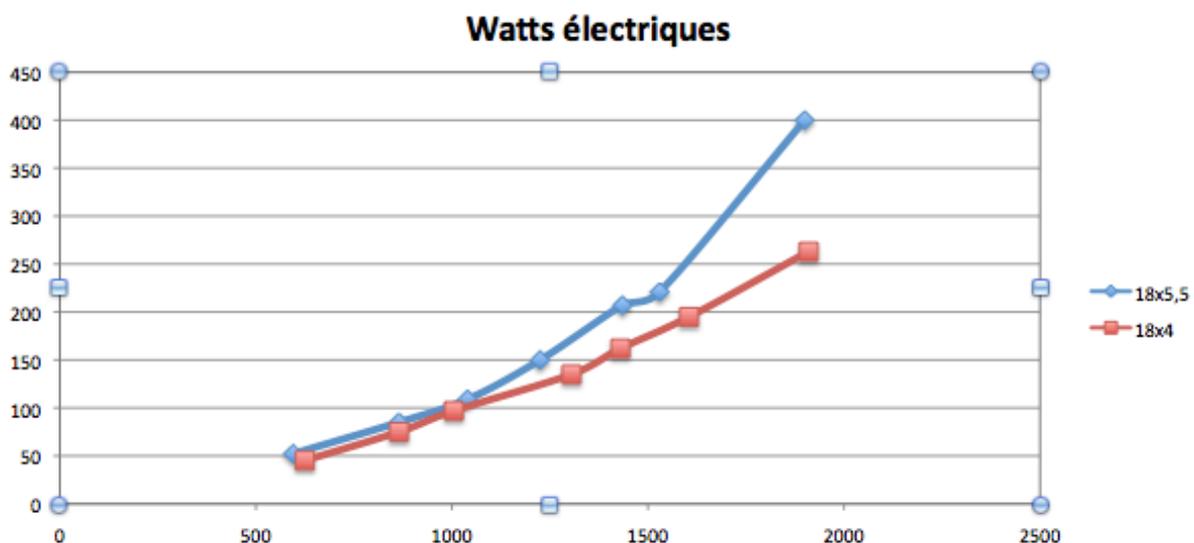
$$\text{Reynolds} = 68000 \times \text{corde} \times \text{vitesse}$$

L'importance qu'il y a lieu d'accorder à la portance et la traînée "locale" varie donc tout au long de la pale avec la corde et la vitesse. La corde change la valeur de la surface et du nombre de Reynolds, la vitesse change le nombre de Reynolds. L'importance du rapport Cz/Cx dans le bilan est proportionnelle à l'angle d'incidence (jusqu'à 20°), à la corde de profil et à la vitesse au carré. L'efficacité globale de la pale est proportionnelle au rapport de la somme de tous les Fz locaux sur la somme de toutes les puissances mécaniques liées aux couples engendrés par les Cx locaux.

$$\text{Couple} = F_x \cdot X \text{ rayon (position sur la pale)} \text{ et } \text{Puissance} = \text{Couple} \times \text{vitesse angulaire.}$$

J'ai fait chauffer le tableur Excel avec l'espoir de trouver des valeurs qui correspondent aux mesures et de pouvoir prédire le comportement d'une 18x4 à partir des valeurs de la 18x5,5. Sans grande surprise, j'ai trouvé une traction 1,57 fois trop grande et une puissance mécanique 1,5 fois trop petite. Pourquoi? Il y a de nombreuses imprécisions et approximations dans les mesures prises sur l'hélice. Je n'ai relevé que quelques positions sur l'hélice et j'ai considéré que les valeurs des points intermédiaires variaient de manière linéaire. Les imprécisions portent sur la position, l'angle d'incidence, la corde. La polaire choisie est celle que j'ai relevée d'un exemple de Clark Y trouvé sur internet. Les variations attendues en fonction du nombre de Reynolds ont été évaluées de la même manière. Je n'ai tenu aucun compte des Cz et Cx locaux pour les positions en dessous de 20% de la pale, ni des tourbillons en bout de pale. Hors, entre les points situés à 20% et à 90% de la pale, le Cx est divisé par 42, la traction est multipliée par 16 et la puissance est multipliée par 41, il s'agit donc de variations importantes. Je pense pouvoir estimer mes résultats comme satisfaisants pour prédire le comportement de la 18x4. J'ai donc appliqué un coefficient adaptatif pour obtenir dans Excel les résultats réels de mes mesures.

J'ai trouvé que l'hélice 18x4 devrait améliorer l'efficacité de 32,9% par rapport à la 18x5,5, elle passerait de 16,8 grs/Watts mécaniques à 22,16 grs/ Watts mécaniques.



La 18x4 consomme moins d'énergie, surtout à forte traction, mais en dessous de 1000 grs l'écart est faible. De plus, à 1000 grs les courbes se rapprochent alors qu'elles s'écartent en dessous et au-dessus de cette valeur de traction. Dès lors, il se pourrait qu'elles se croisent et que la simulation ne le montre pas. Hors, c'est justement à une valeur de traction proche (750 grs par moteur pour une

machine de 3 Kg) que se situe le vol stationnaire majoritairement utilisé en photographie aérienne. Je serai donc obligé d'acheter la 18x4 pour la tester et constater que les courbes ne se croisent pas. La 18x4 est bien celle qui convient le mieux.

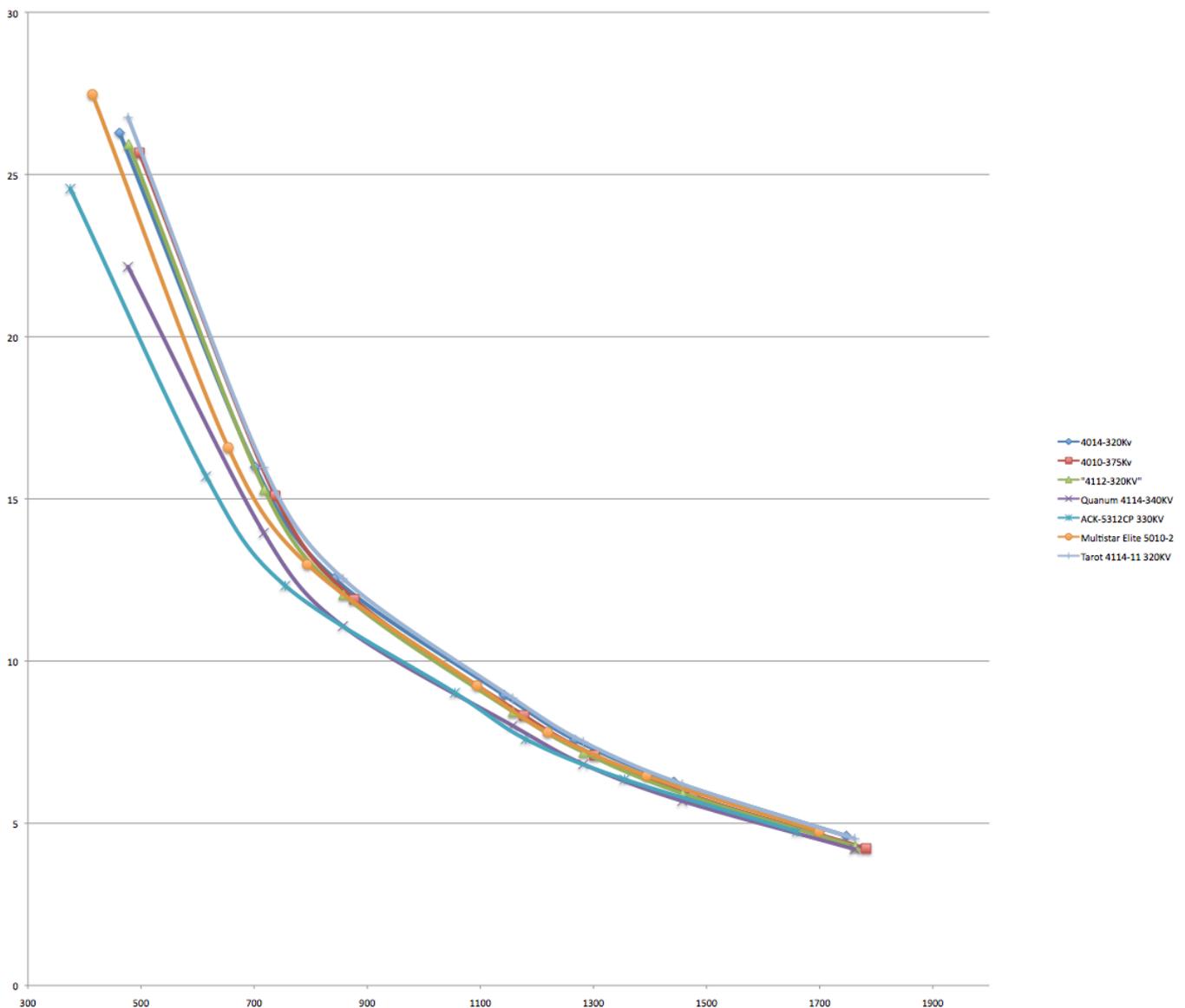
Reste à déterminer quel moteur conviendrait le mieux et avec quelle batterie!

Comme je ne peux me permettre d'acheter tous les moteurs pour effectuer des mesures, je vais me fier aux paramètres fournis pour calculer les rendements. J'ai choisi 7 moteurs pour les comparer: le Tarot 4114-11 320KV, les Turnigy Multistar 22 poles 4010 375KV, 4112 320KV et 4014 320KV, le Turnigy Multistar 5010 274KV, le Quantum MT Series 4114 340KV et l'ACK 5312CP 330KV. En partant des caractéristiques du moteur Turnigy 620KV avec lequel j'ai réalisé les mesures sur les hélices, je dispose des données sur la puissance mécanique nécessaire en relation avec la traction et la vitesse de rotation qui vont me permettre de calculer

le courant:	$I = (P \times KV / RPM) + I_0$
puis la tension:	$V = (P + R.I^2 + R.I_0) / (I - I_0)$
la puissance électrique:	$P_e = V.I$
le rendement:	$\eta = P_m / P_e$
l'efficacité:	$eff = F / P$
le temps de vol:	$t_v = 0,65 \times \text{Capacité batterie} \times 60 / I$

(temps de vol en minutes en utilisant 65% de la capacité en Ah)

**temps de vol 18x4 = f (traction - poids moteur)**



Mon but est d'obtenir le plus long temps de vol. Il convient, pour faire une comparaison équitable, de ne tenir compte que de la traction fournie diminuée du poids du moteur. C'est le moteur Tarot qui semble le meilleur mais il est limité à 20 Amp et ne délivre que 1910 grs avec ce courant, soit 1762 grs en enlevant le poids du moteur. Pour une machine de 4 Kg, le rapport traction maximale/Poids serait seulement de 1,7. Pour obtenir cette traction maximale, la tension doit être de 16,17 Volts, il faudrait donc utiliser une Lipo 5S mais limiter la valeur maximale des gaz à la télécommande.

Viens ensuite le Turnigy Multistar 4010 375KV mais il ne peut même pas supporter la tension d'un LiPo 4S et ne peut délivrer qu'environ 1750 grs, soit 1622 grs en enlevant le poids du moteur.

Viennent ensuite les Turnigy Multistar 4112 320KV et 4014 320KV à égalité pour les faibles tractions. Cependant, à forte puissance, c'est le 4014 qui prend l'avantage. Il est un peu plus lourd mais supporte 26 Amp et fournit +/- 2400 grs (+/- 2250 grs en enlevant le poids du moteur) à +/- 18,5 V (5S), il devrait même supporter un pack 6S et fournir 2500 grs de traction. Il n'y a aucune nécessité de limiter les gaz par sécurité et le rapport traction maximale/Poids serait alors de 3,2 sous 5S et de 3,3 sous 6S, ce qui assurerait une bien meilleure réactivité aux commandes.

Il n'est pas nécessaire de poursuivre les comparaisons car il est évident que les autres moteurs conviennent nettement moins.

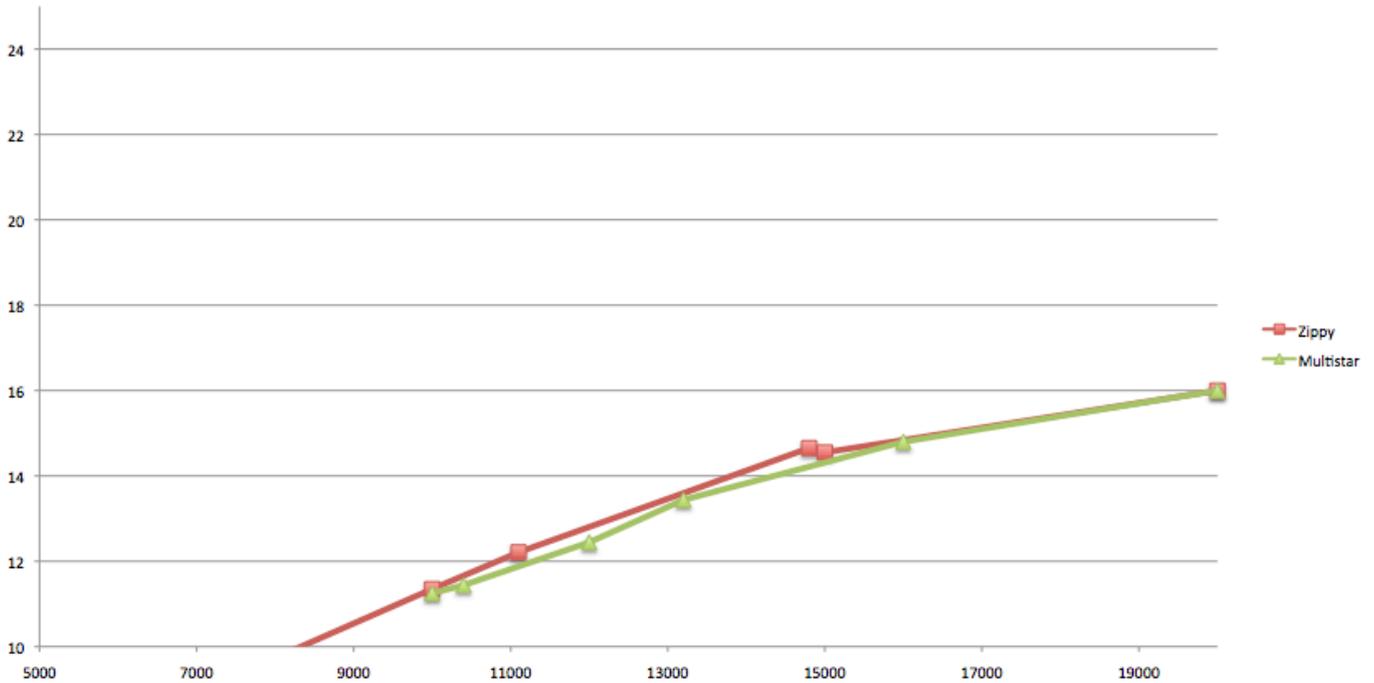
Le maître choix est donc le Turnigy Multistar 4014 320KV. Il faut maintenant choisir la batterie avec soin. Le choix de la batterie influe sur le poids de la machine et donc sur la consommation et sur le temps de vol. Mon quadricoptère actuel pèse 3Kg et dispose d'un pack LiPo 6S de 8000mAh. C'est le résultat d'un choix calculé car avec un pack de moindre capacité ou de plus grande capacité, le temps de vol serait moindre. Avec une capacité plus faible, le temps de vol diminue par manque d'énergie. Avec une capacité plus grande, le temps de vol diminue par consommation d'énergie à cause du poids. Lorsque j'ai fait le choix de ce pack LiPo, le pack Multistar 6S 10000mAh n'existait pas, il est plus léger bien qu'il fournisse plus d'énergie. Son courant maximal est de 10C, soit 100A, mais c'est bien suffisant pour 4 moteurs dont le courant est limité à 20A.

Comment estimer le temps de vol? Il dépend de la capacité du pack LiPo mais aussi du poids de la machine qu'il faut maintenant estimer. Si on enlève des 3035 grs de mon quadri actuel le poids de la motorisation (LiPo, moteurs, variateurs), il reste 1482 grs. La taille des hélices passant de 13 à 18, j'estime que ce poids passera à  $1482 \times 18 / 13 = 2052$  grs. Il faut encore ajouter une nacelle 3 axes de +/- 400 grs, soit 2452 grs. J'y ajoute le poids de la motorisation sans pack LiPo,  $2452 + (4 \times 163 + 23) = 3196$  grs. Le poids de la machine sera donc de 3196 + poids du pack LiPo. Ayant déjà les valeurs de courant, le temps de vol et le rapport traction maximale/poids peuvent être calculés.

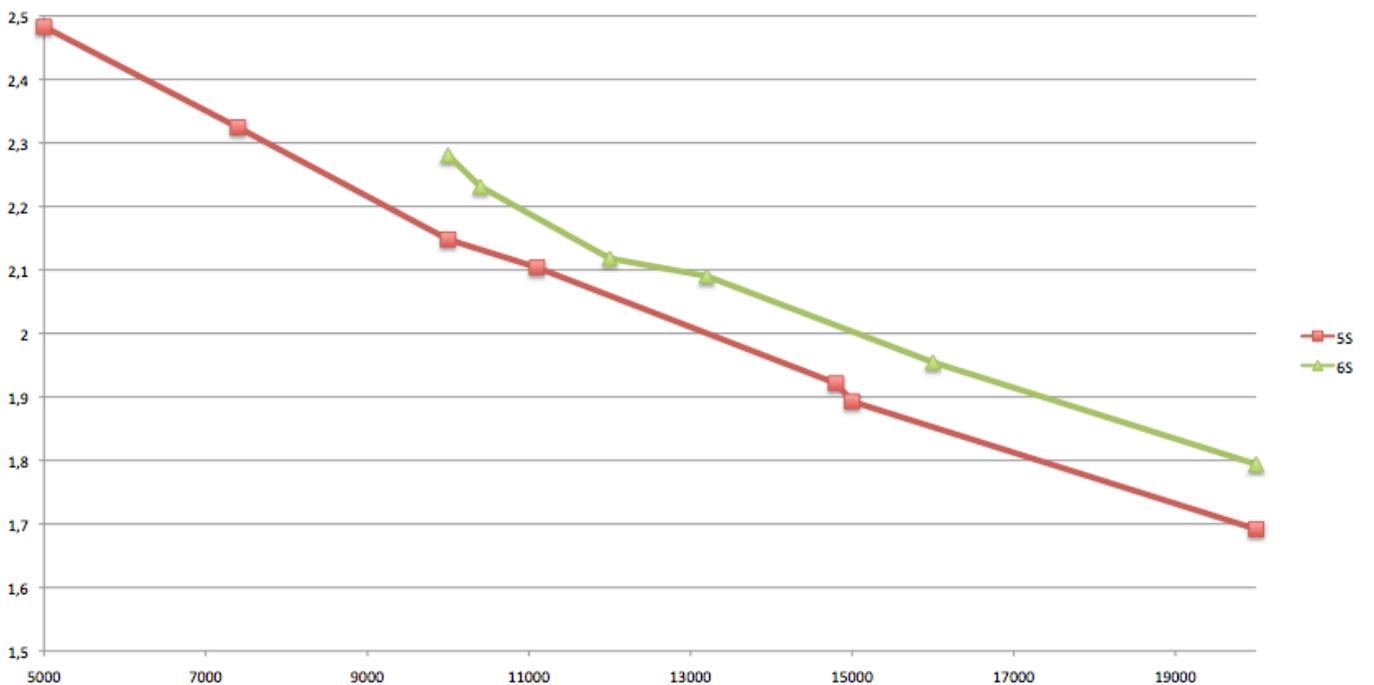
<b>Zippy 5S</b>		estimation		rapport
Capacité	poids LiPos	machine complète	temps de vol	traction max /poids
3700	424	3620 grs.	5,18 minutes	2,60
5000	590	3786 grs.	6,50 minutes	2,48
7400	848	4044 grs.	9,24 minutes	2,32
10000	1180	4376 grs.	11,30 minutes	2,15
11100	1272	4468 grs.	12,21 minutes	2,10
14800	1696	4892 grs.	14,21 minutes	1,92
15000	1770	4966 grs.	14,25 minutes	1,89
20000	2360	5556 grs.	16 minutes	1,69

<b>Multistar 6S</b>		estimation		rapport
Capacité	poids LiPos	machine complète	soit	traction max /poids
10000	804	4000 grs.	12,50 minutes	2,50
10400	1286	4482 grs.	12,48 minutes	2,23
12000	1525	4721 grs.	12,84 minutes	2,12
13200	1588	4784 grs.	13,60 minutes	2,09
16000	1920	5116 grs.	14,88 minutes	1,95
20000	1608	4804 grs.	20,6 minutes	2,08

## temps de vol

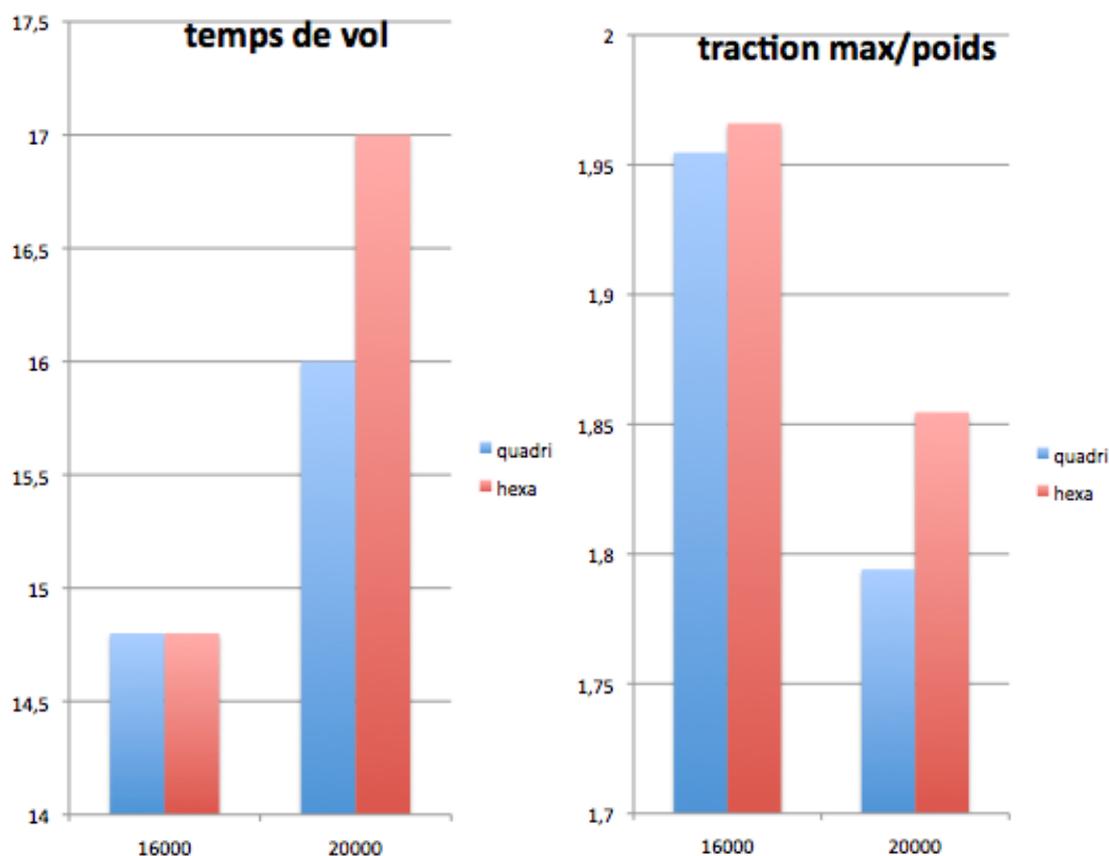


## traction max/poids



Les LiPos Multistar 10C prennent l'avantage car ils ont, en 6S, le même poids que les Zippy en 5S, ce qui leur donne un bien meilleur rapport traction maximale/poids. Cette configuration de machine fait apparaître qu'il n'y a pas de valeur de capacité optimale. Plus on augmente la capacité des LiPo et plus le temps de vol augmente. Par contre, le rapport traction maximale/poids (et donc la maniabilité de la machine) diminue. Dans sa configuration actuelle avec un appareil Olympus TG-4, ma machine pèse 3035 grs et a un rapport traction max/poids de 1,98 et un temps de vol de 16 minutes. La capacité des LiPos devra être d'au moins 16000Mah (pour voler 14'45") et le rapport traction maximale/poids sera donc d'au moins 1,95. Cela m'amène à m'intéresser au prix des LiPos. La minute de vol avec le 16000mAh est à 6,88 €/min, avec le 20000mAh elle est à 7,62 €/min. Le pack 20000mAh permet de voler plus longtemps mais avec un peu moins de maniabilité.

Ce pourrait-il qu'une version hexacoptère donne de meilleures performances? Je sais que ce n'est pas le cas pour mon quadri actuel qui serait bien moins performant en version hexacoptère mais je vais tout de même faire le calcul.



Seul le pack 20000mAh est intéressant en hexa car la maniabilité est légèrement meilleure et surtout le temps de vol passe de 16 à 17 minutes.

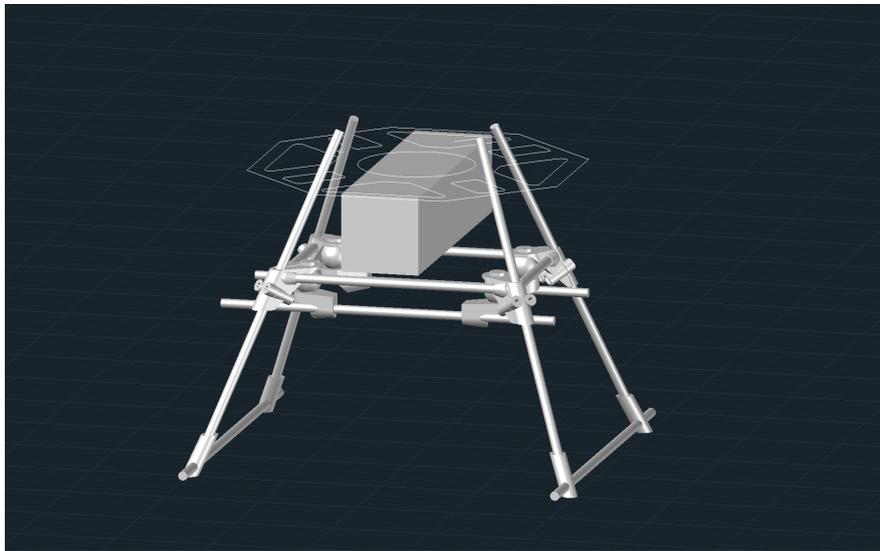
Je pense que le coût d'un tel hexacoptère n'est pas justifié par ses performances et la maniabilité d'une version quadricoptère est insuffisante. Ce projet ne peut donc être réalisé dans l'état, il faudrait revoir le poids à la baisse, calculer le poids de chaque pièce plutôt qu'extrapoler en fonction de la taille des hélices.

Ma motivation de départ était mon insatisfaction à propos de la fiabilité des prises de vues photographiques. Je dois prendre 3 photos pour être certain d'en obtenir une bonne à cause du manque de rigidité de la nacelle, surtout gênante lors de rafales de vent. La qualité photographique est au niveau souhaité avec l'Olympus TG-4 mais la maniabilité souffre du poids. Au départ, mon quadricoptère était équipé d'une GO Pro (différence 330 grs) munie d'une nacelle bien plus légère aussi. Le pilotage est devenu délicat au freinage de descente, je n'ose pas descendre en dessous de 40% des gaz car la remise des gaz engendre alors de l'instabilité se traduisant par de fortes oscillations. La machine pesant plus de trois kilos, munie d'un train d'atterrissage composé de 4 tubes de 6 mm en carbone n'encourage pas l'audace, d'autant plus que le remplacement d'un tube est compliqué (accès difficile aux vis).

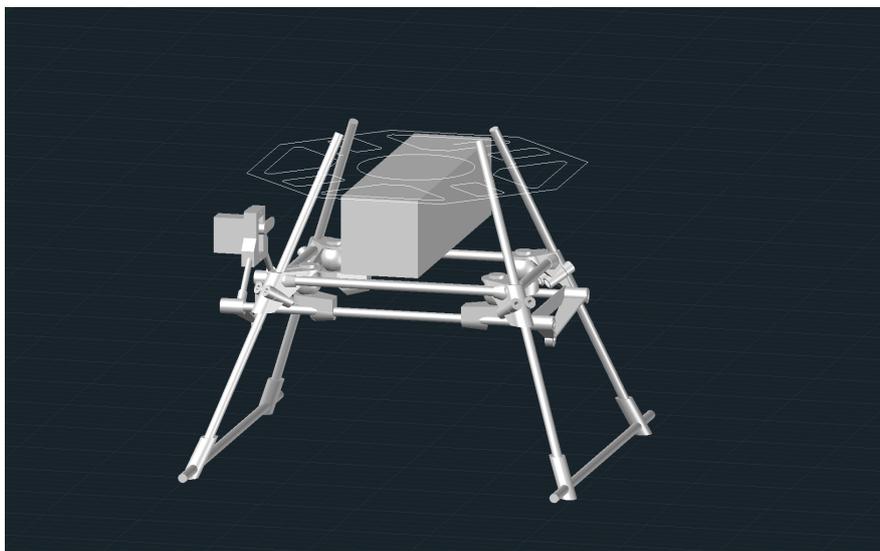
Dans l'immédiat et malgré tous ses défauts, je vais plutôt améliorer mon quadricoptère actuel en augmentant la rigidité de la nacelle de l'Olympus TG-4 tout en diminuant son poids. Mon idée est de renforcer les pieds du train d'atterrissage par un cadre en dessous de la batterie. Ce cadre transforme la partie haute du train en une pyramide tronquée fort rigide, il sera constitué de pièces imprimées en PLA et de tubes de carbone.



Les 4 premières pièces imprimées servent de support aux suspensions amortisseuses des vibrations. Un autre cadre vient ensuite s'adapter en dessous des suspensions.

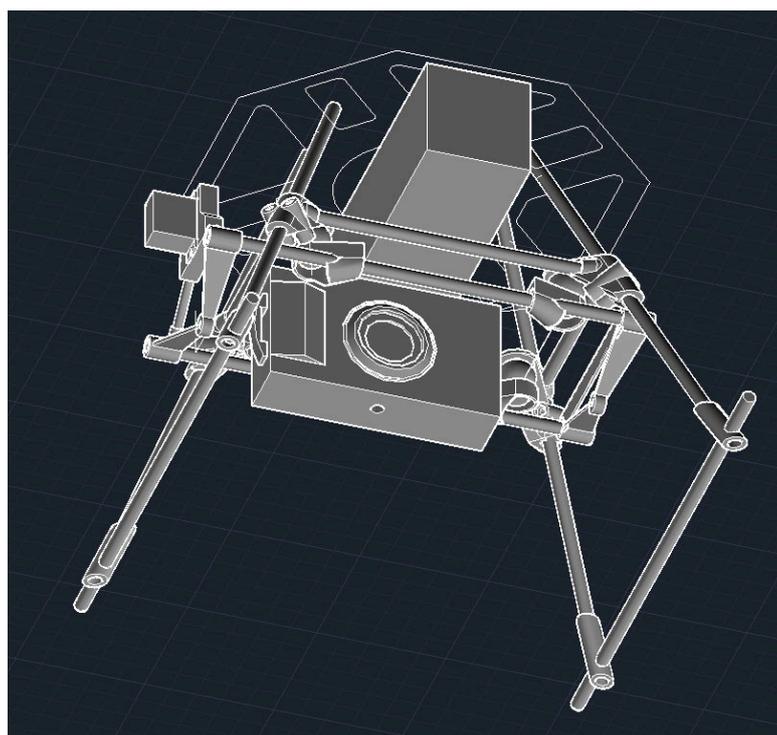
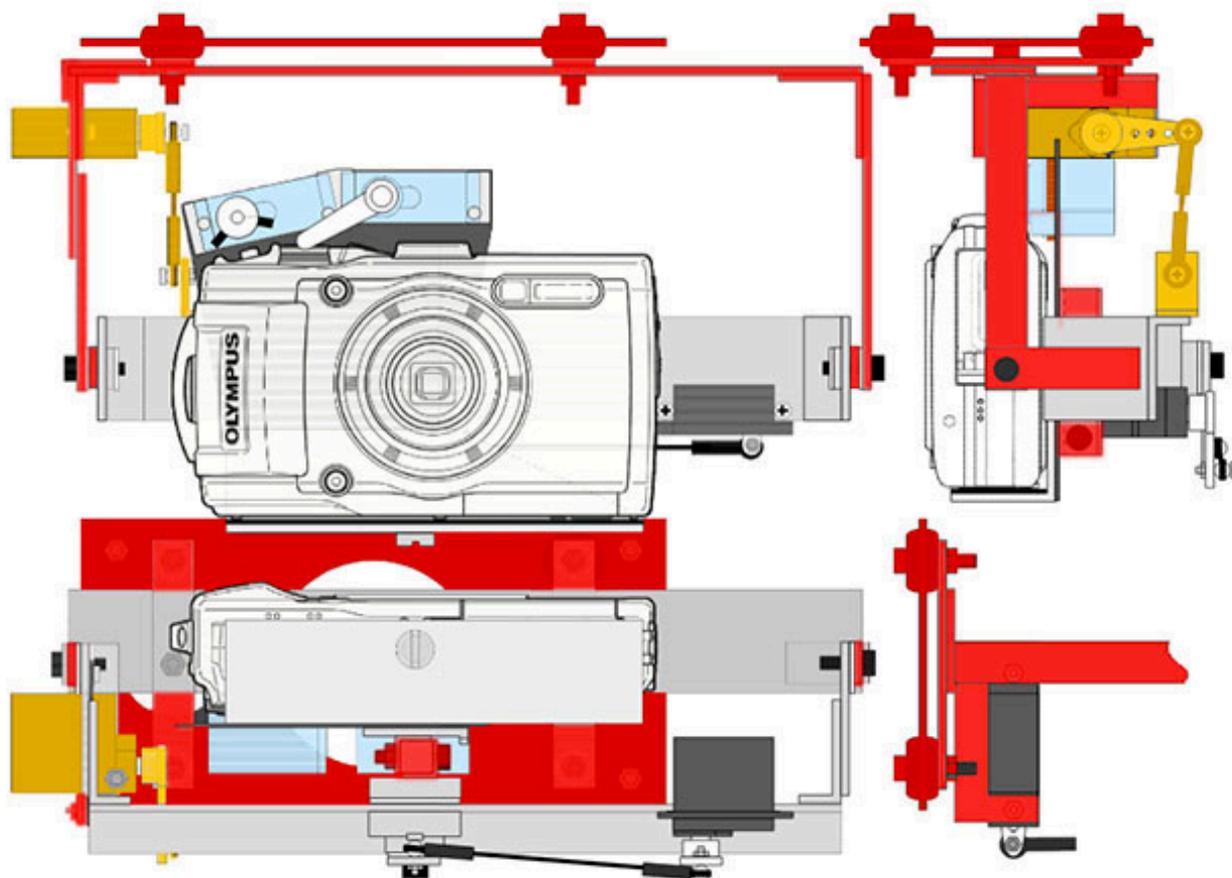


Il est aussi constitué de pièces imprimées et de tubes de carbone. Aux extrémités des tubes de carbone, d'autres pièces imprimées supportent l'axe de tangage de l'appareil photo.



Ces pièces sont conçues de manière à obtenir une bonne rigidité. Celle située à droite du quadricoptère supporte le servo de tangage de l'appareil photo. La suspension réalisée au moyen

de passe fils et de vis sur une plaque de carbone est remplacée par du plastic et des suspensions rondes avec gorges. L'armature de maintien de l'axe de tangage de l'appareil photo, également en aluminium et trop peu rigide, est remplacée par du plastic et des tubes de carbone. L'articulation en aluminium permettant de régler l'inclinaison par défaut de l'appareil photo est supprimée et remplacée par un réglage de la tringle de commande. Les pièces coloriées en rouge sont remplacées, celles en orange sont modifiées.



L'impression des pièces en PLA avance bien, il y aura une suite à cette étude.