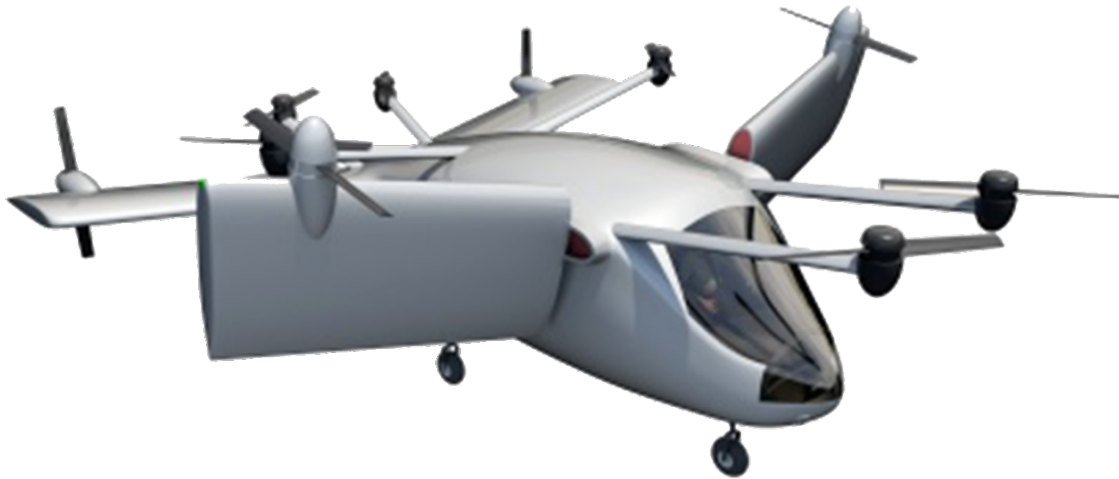


TECHNOPLANE

AERONAUTICAL INNOVATION



PROPULSION HYBRIDE DU MINI-BEE

Dimensionnement des hélices

PROJET AERONAUTIQUE 4^{ème} Année

Encadrant entreprise : Xavier DUTERTRE

Paul COUMAT – Marie GAUBERT – Pierre-Baptiste KARTEL

29/04/2020

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les personnes nous ayant aidé et ayant contribué à l'avancée de notre projet.

Tout d'abord, nous adressons nos remerciements à notre tuteur M. DUTERTRE Xavier, responsable du projet Mini-Bee, qui nous a coordonné et orienté tout au long de l'année afin que nous puissions avancer au mieux dans notre travail sur le Mini-Bee.

Nous tenons à également remercier M. DELILLE Christophe, notre responsable de promotion et le responsable de la filière automobile à l'ESTACA, pour nous avoir mis en relation avec notre tuteur et donné l'opportunité de travailler sur ce projet.

Enfin nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont été précieuses par leur aide et leur soutien tout au long de cette année : nos amis, professeurs et camarades de promotion.

SOMMAIRE

I.	TABLE DES FIGURES	4
II.	RESUME/ABSTRACT	5
III.	HIGHLIGHTS	6
IV.	INTRODUCTION	7
V.	CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	8
VI.	METHODOLOGIE/DEMARCHE	9
VII.	PRESENTATION DE L'ORGANISATION DU PROJET	10
VIII.	RESULTATS ET ANALYSES	13
	a. Nos hypothèses.....	13
	b. Théorie de Froude.....	14
	c. Poussée au point fixe	15
	d. Vitesse en bout de pale.....	16
	e. Débit d'air massique vers le bas	18
	f. Modélisation de la pale.....	19
	g. Comparatif avec les drones	20
IX.	CONCLUSION	23
X.	RETOUR D'EXPERIENCE	24
XI.	BIBLIOGRAPHIE	25
XII.	ANNEXES	26
	1. Caractéristiques détaillées de nos Protos :	26
	2. Descriptif du Cabri G2 :	27
	3. Descriptif du R44 :.....	28
	4. Descriptif du Vahana, Lillium Jet et Bartini Flying Car :	29

I. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Diagramme de Gantt.....	10
Figure 2 : Evolution du temps passé sur le projet.....	11
Figure 3 : Détails des heures passées sur le projet	11
Figure 4 : Robinson R44	13
Figure 5 : Cabri G2.....	13
Figure 6 : Bartini Flying Car	14
Figure 7 : Lillium Jet	14
Figure 8 : Vahana	14
Figure 9 : Tableau des résultats de la théorie de Froude.....	15
Figure 10 : Tableau des résultats de la poussée au point fixe	15
Figure 11 : Diagramme Puissance en fonction de la Poussée au point fixe	16
Figure 12 : Tableau des résultats de la vitesse en bout de pale	17
Figure 13 : Diagramme Vitesse de rotation en fonction de la vitesse en bout de pale	17
Figure 14 : Tableau des résultats du débit massique vers le bas	18
Figure 15 : Diagramme débit d'air massique vers le bas en fonction de la masse maxi	19
Figure 16 : Vue de face de la modélisation Catia de notre pale	19
Figure 17 : Vue latéral de la modélisation Catia de notre pale	20
Figure 18 : Proto R2	20
Figure 19 : Proto R1	20
Figure 20 : Fonctionnement des drones en vol stationnaire	21
Figure 21 : Fonctionnement des drones en rotation stationnaire	21
Figure 22 : Fonctionnement des drones en marche avant et en marche arrière	22
Figure 23 : Fonctionnement des drones pour incliner à gauche et à droite l'appareil	22

II. RESUME/ABSTRACT

Au commencement de notre projet, nous nous sommes beaucoup investis dans la compréhension de ses objectifs. Ensemble, avec notre tuteur, nous avons déterminé les différentes recherches que nous souhaitions entreprendre au fur et à mesure de l'année.

Nous avons tout d'abord commencé par modifier les documents présents sur le site collaboratif en mettant à jour les informations du Mini Bee. Après la validation des pales et du rotor, nous avons pu modéliser le profil Naca et ainsi déterminer les performances de notre appareil.

A la suite de cela, nous avons calculé la puissance nécessaire à la sustentation du Mini-Bee à l'aide la théorie de Froude mais également le débit d'air massique vers le bas ou encore la masse soulevée par une pale. Nous avons parallèlement étudié les cas de panne tout comme la poussée au point fixe et la vitesse de rotation en bout de pale. De même, pour vérifier la cohérence de nos résultats, nous avons régulièrement comparé le Mini Bee à 2 hélicoptères dans un premier temps puis à d'autres projets tel que le Vahana. Enfin, nous avons décidé de faire une comparaison avec un drone dans le but de mieux comprendre comment diriger le Mini Bee.

Investis - Compréhension - Objectifs – Ensemble - Cohérence - Comparaison

At the beginning of our project, we put a lot of effort into understanding its objectives. Together, with our tutor, we determined the different research we wanted to undertake over the course of the year.

We first started by modifying the documents on the collaborative site by updating the information on the Mini bee. After the validation of the blades and the rotor, we were able to model the Naca profile and thus determine the performance of our aircraft.

Following this, we calculated the power required to lift the Mini-Bee using Froude's theory but also the mass airflow down or the mass lifted by a blade. In parallel we studied the failure cases as well as the thrust at the fixed point and the rotation speed at the blade tip. Similarly, to check the consistency of our results, we regularly compared the Mini bee with 2 helicopters first and then with other projects such as the Vahana. Finally, we decided to make a comparison with a drone in order to better understand how to steer the Mini Bee.

Invested – Understanding – Objectives – Together – Coherence - Comparison

III. HIGHLIGHTS

Une première étape d'organisation et de répartition du travail entre chaque membre du groupe.

Recherche et découverte des formules scientifiques permettant de caractériser les pales.

Obtentions des premiers résultats avec les données connues du Mini-Bee.

Comparaison de ces résultats avec des appareils déjà existant afin de valider les résultats que nous avons obtenus.

Étude comparative des autres projets similaires au Mini-Bee afin de connaître ses principaux concurrents.

IV. INTRODUCTION

Au cours de notre quatrième année de formation à l'ESTACA en spécialité aéronautique, nous avons l'opportunité de travailler sur un projet. Ce dernier est à réaliser en groupe et a pour but de nous faire appliquer les connaissances théoriques que nous avons précédemment abordé en cours. Pour ce projet notre groupe est composé de Pierre-Baptiste KARTEL, Paul COUMAT et de Marie GAUBERT.

Nous avons tous les trois choisis de travailler en collaboration avec l'entreprise Technoplane sur le projet Mini Bee. Nous avons plus particulièrement travaillé sur la partie propulsion du Mini Bee et le dimensionnement des pales.

Le but de notre étude est de caractériser les pales du Mini Bee afin que celles-ci répondent au cahier des charges donné par Technoplane.

Dans un premier temps nous commencerons notre étude par un point sur le contexte de ce projet et ses objectifs. Par la suite nous expliquerons la méthodologie et l'organisation que nous avons adopté pour ce projet. Nous détaillerons ensuite les résultats que nous avons obtenu et les analyserons. Enfin nous finirons ce rapport par une conclusion et un retour d'expérience sur ce projet.

V. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Le projet Mini-Bee a été lancé en 2015 par M. Xavier Dutertre, président de l'entreprise Technoplane. L'objectif est de créer un Multicoptère de 2 ou 4 places avec une version ambulance pouvant embarquer 2 personnes et une civière. Le Mini-Bee est un projet collaboratif qui met en relation le travail d'étudiants de plusieurs écoles d'ingénieurs spécialisées chacune dans un domaine particulier. Les différents groupes de l'ESTACA, travaillant sur ce projet, sont chargés principalement de l'étude du système propulsif et de l'architecture de la structure de l'aéronef. L'entreprise Technoplane s'occupe de mettre en relation le travail des étudiants avec les industriels du milieu pour mener à bien le projet.

Aujourd'hui, le rôle principal de ce projet est de réaliser un appareil de transport médical comportant 2 places assises et un espace pour un brancard. C'est un projet très ambitieux et c'est pourquoi il est divisé en plusieurs parties et études.

Notre projet cette année concerne le système de propulsion hybride du Mini Bee. Nous avons deux objectifs principaux qui étaient la validation du modèle de pales choisi et l'étude des caractéristiques des rotors.

VI. METHODOLOGIE/DEMARCHE

L'objectif de notre projet est de caractériser les pales du Mini Bee afin de pouvoir choisir les pales qui correspondraient le mieux à l'appareil. Nous devons également connaître le fonctionnement des drones car ceux-ci se rapprochent du Mini Bee.

Pour cela nous devons dans un premier temps nous informer sur le Mini Bee. Nous avons donc fait des recherches sur la plateforme collaborative du Mini Bee pour en apprendre plus sur le projet. Grâce à cela nous avons donc pu commencer à effectuer des recherches sur les pales d'hélicoptère. En effet les pales d'hélicoptère sont celles qui se rapprochent au mieux de notre appareil. Ensuite nous avons trouvé plusieurs formules différentes pour calculer la puissance nécessaire, la vitesse de rotation, la masse soulevée ou encore le débit d'air massique vers le bas. Et avec ces différentes formules nous avons pu obtenir des premiers résultats.

Dans le même temps nous avons modélisé le profil Naca d'une aile afin de pouvoir faire des simulations numériques et voir si celle-ci pouvait convenir au mini Bee. De plus nous avons étudié le fonctionnement des drones car en réalité le Mini Bee a un fonctionnement similaire. Cela nous a permis d'avoir des premiers éléments de réponse sur comment diriger le Mini Bee.

Par la suite nous avons précisé nos calculs, du fait de l'avancement du projet plusieurs caractéristiques ont été fixées. Cela nous a permis d'avoir des résultats satisfaisants que nous avons pu comparer avec des hélicoptères existants qui ont des masses et des puissances similaires au Mini Bee. Et pour finir nous avons sélectionné 3 projets de nouvelle génération qui seront les futurs concurrents du Mini Bee et nous les avons comparés aux performances de notre appareil.

VII. PRESENTATION DE L'ORGANISATION DU PROJET

Lors de la création de notre groupe de projet, nous avons pris la décision d'effectuer une première réunion avant celle de lancement avec notre tuteur Xavier Dutertre. Nous avons ainsi pu nous organiser au préalable en créant des conversations communes mais également un Drive afin d'y faire figurer l'ensemble de nos travaux de recherche tout au long de l'année. Cette première réunion a été l'occasion pour nous de déterminer l'organisation que nous souhaitions entreprendre.

Nous avons pour cela effectué une comparaison avec les projets que nous avons réalisés l'année passée en relevant les erreurs que nous ne voulions pas reproduire mais également les points positifs à retenir. Notre objectif était de limiter les pertes de temps dues à une mauvaise organisation.

Nous avons, au cours de cette même réunion, désigné Marie Gaubert comme chef de projet pour le début d'année, qui par la suite a été remplacée par Pierre-Baptiste Kartel et enfin par Paul Coumat. L'idée que nous avons lorsque nous avons convenu de cela, était de donner l'opportunité à tout le monde d'acquérir des compétences en management mais également d'avoir une vision nouvelle de notre organisation. Au moment où nous l'étions, notre rôle était de veiller au bon avancement de notre projet en tenant à jour notre diagramme de Gantt mais également en prenant des décisions lorsqu'il en était nécessaire.

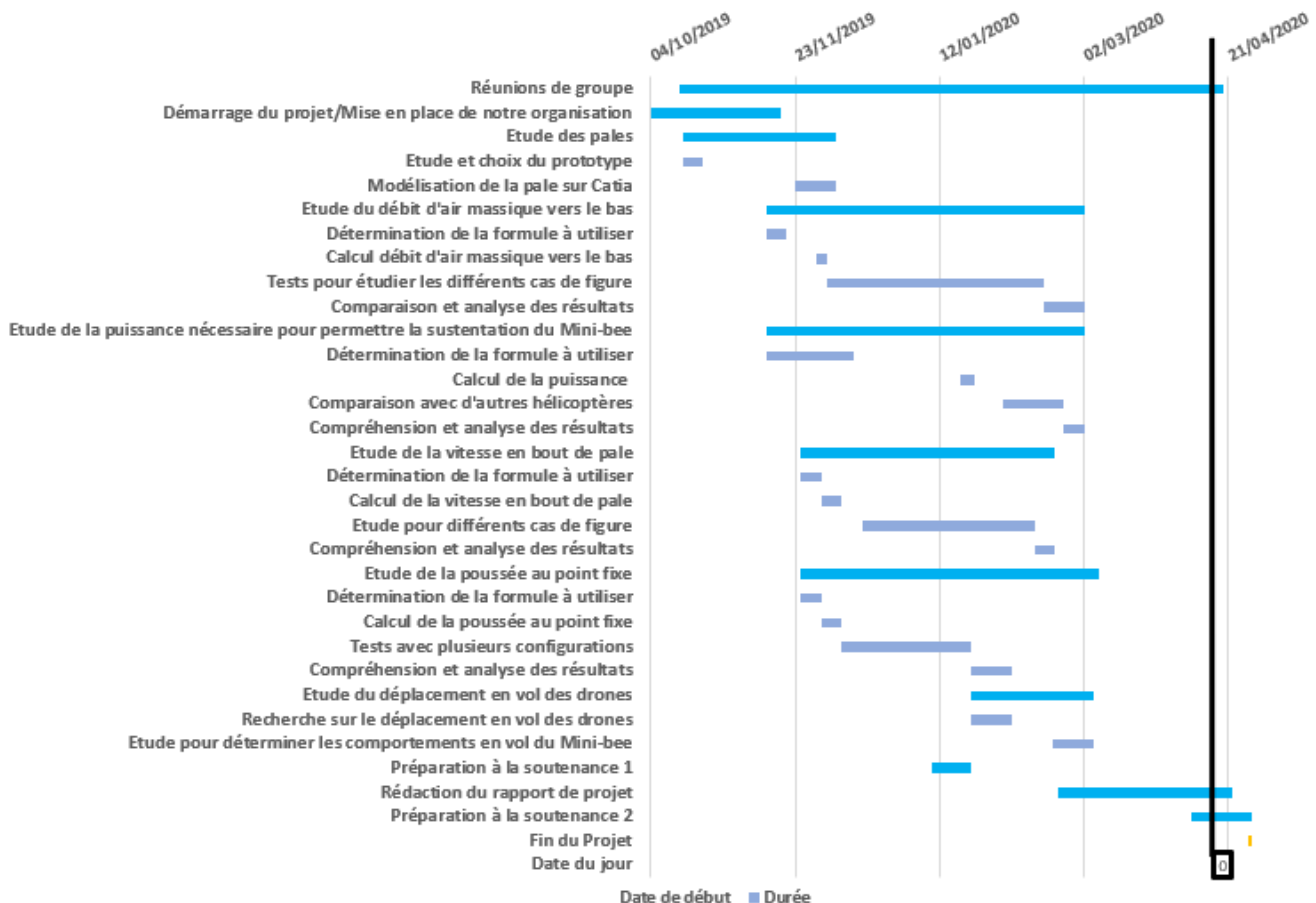


Figure 1 : Diagramme de Gantt

Après notre réunion de lancement avec Xavier Dutertre, il a été question pour nous de faire un point sur les tâches que nous aurions à faire. Nous avons dans un premier temps cherché à comprendre les enjeux et objectifs de notre projet en questionnant notre tuteur mais aussi au travers des documents qu'il nous avait fourni et en entamant un travail de recherche. Cela nous a permis de lister nos jalons, c'est-à-dire d'établir les étapes importantes de notre projet.

Puis, nous sommes rentrés dans le détail en effectuant une planification sur le long terme que nous avons organisé autour d'un Diagramme de Gantt. Cette étape était primordiale à nos yeux et nous avons passé beaucoup de temps en début de projet à planifier nos tâches afin de limiter les pertes de temps à l'avenir. Nous avons par la même occasion profité de ce moment pour estimer la charge de travail que nous aurions chacun à fournir.

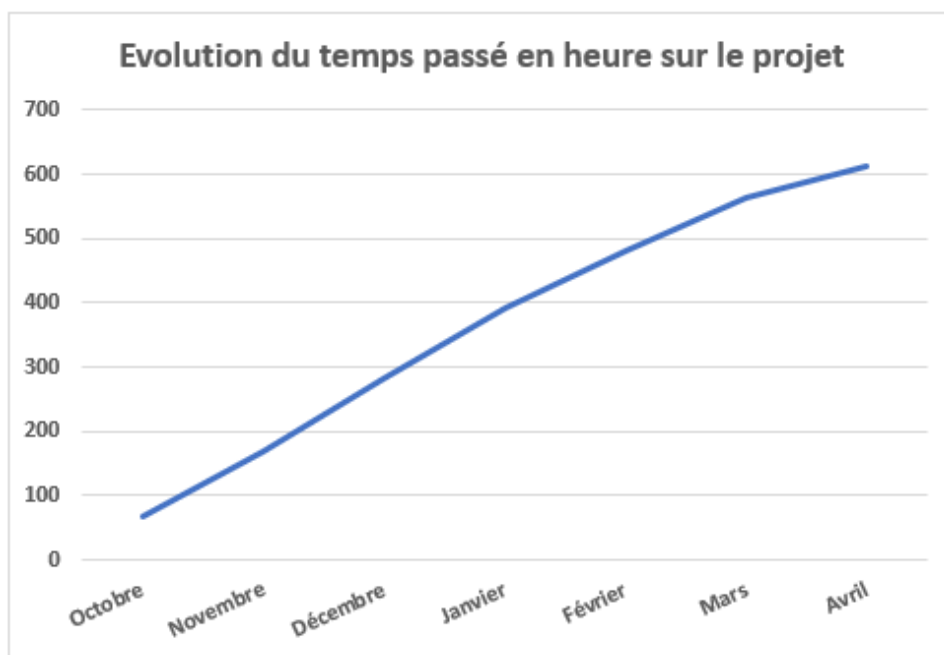


Figure 2 : Evolution du temps passé sur le projet

	Organisation et démarrage du projet	Etude des pales	Etude de la puissance nécessaire à la sustentation du Mini-bee	Etude de la poussée au point fixe	Etude de la vitesse en bout de pale	Etude du débit d'air massique vers le bas	Comparatif avec les drones	Rédaction du rapport et préparation aux soutenances	Nombre d'heures	Nombre d'heures au total
Octobre	47	21							68	68
Novembre	24	26	27	15	4	6			102	170
Décembre	12	14	24	24	19	20			113	283
Janvier	24		17	15	16	16	14	6	108	391
Février	24		10	6	13	5	25	6	89	480
Mars	24		5	4		2	17	30	82	562
Avril	30							21	51	613

Figure 3 : Détails des heures passées sur le projet

Bien entendu, notre planification initiale a été amenée à changer et notre diagramme de Gantt a été évolutif à mesure que les tâches et objectifs évoluaient. Tout au long de cette année et plus précisément, toutes les semaines, nous avons rédigé des comptes rendus de chacune de nos réunions. Cela nous a permis de savoir les tâches que nous avions à faire d'une semaine à l'autre mais également de lister les points positifs de nos travaux ainsi que ceux sur lesquels il était nécessaire de nous améliorer.

Nous utilisons un code couleur qui nous permettait de répartir équitablement la charge de travail. Ces réunions structurées et régulières nous ont permis d'avancer en maintenant un bon rythme de travail. Elles nous donnaient l'opportunité d'échanger sur nos résultats et de s'entraider si une personne était en difficulté.

Au travers de notre diagramme de Gantt, nous avons pu constater qu'il était difficile d'estimer correctement la durée des tâches puisqu'elles sont soumises à de nombreux facteurs. Une tâche qui devait initialement être réalisée sur une durée de 2 semaines pouvait finalement s'étaler sur 3 semaines. Pour autant, nous avons toujours réussi à rattraper notre retard si nous en avions et même à prendre de l'avance sur notre planning. Notre bonne répartition du temps de travail a joué un rôle essentiel dans notre organisation et cela nous a permis de terminer notre projet plus tôt que ce que nous avions estimé.

VIII. RESULTATS ET ANALYSES

a. Nos hypothèses

Pour notre étude nous avons choisi de créer un fichier Excel qui regroupe l'ensemble de nos calculs, ce qui permet de travailler avec les mêmes hypothèses de calcul et d'éviter les erreurs ou les mauvaises approximations.

Notre étude se porte sur deux prototypes :

- Proto R1H6 : qui dispose de 1 moteur Rotax et de 6 hélices
- Proto R2H10 : qui dispose de 2 moteurs Rotax et de 10 hélices

La version finale du Mini Bee se rapprochera plus du proto R2H10.

Afin de sélectionner au mieux la pale nous avons fait varier les rotors suivant 3 diamètres différents (3,2m ; 3,4m ; 3,6m), on appellera donc par exemple R1H6D32 le proto R1H6 avec des rotors de diamètre 3,2 m.

Voici également les autres caractéristiques des deux prototypes :

PROTO R2

- Distance franchissable : 800km (850km)
- Vitesse de croisière : 200 km/h
- Altitude de croisière : 2000m
- Poids : 1100kg
- Poussée par hélice : 95kg
- Surface : 10*10m
- Nombre de places assises : 4 ou de 2 avec un brancard

PROTO R1

- Distance franchissable : 400km
- Vitesse de croisière : 148 km/h
- Altitude de croisière : 2000m
- Poids : 550kg
- Poussée par hélice : 91kg
- Surface : 7*7m
- Nombre de places assises : 2

Afin de vérifier les différents calculs nous avons comparé nos résultats avec 2 hélicoptères qui sont en service aujourd'hui. Nous avons donc comparé le proto R1 au cabri G2 et le proto R2 au Robinson R44 car leurs caractéristiques (cf. annexe p27&28) sont similaires à nos Protos.



Figure 5 : Cabri G2



Figure 4 : Robinson R44

Afin d'étudier la concurrence et de jauger notre Mini Bee sur le marché nous avons décidé de le comparer à 3 projets en cours de développement : le Vahana, le Lillium Jet et le Bartini Flying Car. Pourquoi ces 3 projets ? Parce qu'ils se rapprochent beaucoup de notre Mini Bee par leurs caractéristiques (cf. annexe p29) et parce qu'ils seront en concurrence lors de leur commercialisation.



Figure 8 : Vahana



Figure 7 : Lillium Jet



Figure 6 : Bartini Flying Car

b. Théorie de Froude

$$P_{necessaire} = \frac{P_{induite} + P_{profil}}{1 - pertes} + P_{divers}$$

$$P_{induite} = \frac{1}{\eta} \times \frac{(F_n)^3}{\sqrt{2 \times \delta \times S_{ref}}}$$

Avec

$$F_n = (1 + K_{dep}) \times M \times g$$

$$F_n = M \times g$$

$$C_x = f(C_z)$$

$$P_{profil} = C_x \times \frac{S_{rotor} \times (\Omega \times r_{rot})^3 \times \Psi}{8}$$

Avec

$$C_z = \frac{6 \times F_n}{\delta \times S_{rotor} (\Omega \times r_{rot})^3 \times \Psi}$$

$$\Psi = \frac{N_b \times R \times l}{S}$$

En ce qui concerne la puissance nécessaire à la sustentation du Mini Bee, nous avons appliqué la Théorie de Froude. Nous avons conçu un Excel permettant de la déterminer à partir des caractéristiques du Mini Bee. La puissance nécessaire que nous avons obtenue est inférieure à la puissance dont nous disposons quel que soit le diamètre utilisé. Cela signifie donc que nos paramètres sont bons.

Pour effectuer une comparaison, nous avons ensuite fait ce calcul pour le Cabri G2 et le Robinson R44 mais également pour les 3 autres projets en cours de développement cités plus hauts. Nous ne pouvons pas connaître la valeur des coefficients de portance et de traînée de ceux-ci puisqu'il s'agit de données protégées que les constructeurs ne divulguent pas. C'est pour cette raison que nous avons décidé d'appliquer le même coefficient pour chaque hélicoptère ou projet, ceux du Mini-bee.

Nous pouvons voir sur le tableau ci-dessous qui regroupe nos résultats, que dans certains cas la puissance disponible est inférieure à la puissance nécessaire car les coefficients appliqués ne sont pas les bons. En revanche, les paramètres que nous avons pour notre projet sont en adéquations avec ceux des autres appareils. Nous pouvons donc affirmer que nos résultats pour le Mini-bee sont corrects au vu de notre formule et de la cohérence des paramètres que nous avons avec ceux du Cabri G2, du R44, du Vahana, du Bartini Flying et du Lilium Jet.

	Cabri G2	R1H6D32	R1H6D34	R1H6D36	R44	R2H10D32	R2H10D34	R2H10D36	VAHANA	LILLIUM JET	BARTINI FLYING CAR
Pinduite	56 888	36 393	34 253	32 350	78 787	79 735	70 044	70 875	139 945	270 867	245 921
Pprofil	95 784	24 144	30 770	38 675	142 028	40 241	51 284	64 458	19 690	1 514	8 785
Pnécessaire	152 673	60 538	65 023	71 025	220 815	119 976	126 329	135 334	159 635	272 382	254 706
P disponible	106 647	82 375	82 375	82 375	167 782	164 752	164 752	164 752	353 039	319 942	319 942
Pdispo/Pnécessaire	0,6985	1,36	1,26	1,15	0,76	1,37	1,3	1,21	2,21	1,17	1,25

Figure 9 : Tableau des résultats de la théorie de Froude

c. Poussée au point fixe

Pour connaître la masse que pourra soulever le Mini Bee il existe une formule qui fait intervenir la puissance du moteur, le diamètre des rotors et la densité de l'air au niveau de vol et au niveau de la mer :

$$\text{Poussée} = 7,4 (P \times D)^{\frac{2}{3}} \times \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Après avoir appliqué cette formule aux différents appareils nous obtenons le tableau suivant :

	Cabri G2	R1H6D32	R1H6D34	R1H6D36	R44	R2H10D32	R2H10D34	R2H10D36	VAHANA	LILLIUM JET	BARTINI FLYING CAR
Puissance (en ch)	145	112	112	112	210	224	224	224	480	435	435
Surface rotorique	40,72	48,25	54,48	61,07	79,49	80,42	90,79	101,79	10,62	1,13	8,45
Diamètre rotor (en m)	7,2	3,2	3,4	3,6	10,06	3,2	3,4	3,6	1,3	0,2	1,16
Nombre de rotor	1	6	6	6	1	10	10	10	8	36	8
Poussée pour un rotor (en Kg)	767,92	114,02	118,73	123,34	1228,55	128,76	134,07	139,28	136,22	13,44	118,24
Poussée (en Kg)	767,92	684,1	712,4	740,0	1228,6	1287,6	1340,7	1392,8	1089,8	483,8	945,9

Figure 10 : Tableau des résultats de la poussée au point fixe

Dans un premier temps nous pouvons valider cette formule au vu des résultats obtenus pour le cabri G2 et le R44. En effet, pour le Cabri G2, nous trouvons une masse de 767 Kg ce qui est légèrement supérieur à la masse maximale au décollage conseillée (700Kg), nous pouvons l'expliquer par la volonté du constructeur à garantir une certaine marge de sécurité. De même pour le R44, nous trouvons 1230 Kg pour un poids maximal de 1080 Kg.

Par la suite nous avons testé plusieurs configurations pour faire varier les diamètres rotoriques de nos deux prototypes. Nous observons que pour le proto R1 l'augmentation du diamètre de 20 cm entraîne un gain de 25 Kg pour la masse soulevée par le prototype. Et pour le R2 l'ajout de 20 cm entraîne un gain de 50Kg. Il ne faut donc pas négliger l'augmentation du diamètre des rotors sur nos deux prototypes.

Pour avoir une masse plus importante et avoir une marge de sécurité lors de la mise en service du Mini Bee nous choisisons d'utiliser des rotors de diamètre 3,6m (entouré en vert dans le tableau).

Dans un second temps nous avons comparé nos Protos aux autres projets, nous pouvons déjà remarquer que leur puissance est beaucoup plus élevée que notre Mini Bee. Cependant du fait de leur faible surface rotorique leur poussée est inférieure à celle générée par notre prototype R2. Nous observons donc qu'une surface rotorique plus importante permet d'emporter plus de charge avec moins de puissance.

Par la suite j'ai mis toutes ces valeurs dans un graphique pour mieux représenter les différences entre chaque appareil. Sur celui-ci nous pouvons observer la puissance en fonction de la poussée et également le diamètre des cercles représente la surface rotorique des appareils. On se rend compte ici que le cabri G2 et le R44 sont similaires à nos deux prototypes car ils sont confondus avec eux formant deux regroupements. Les trois autres projets sont plus esseulés en raison de leur puissance beaucoup plus importante.

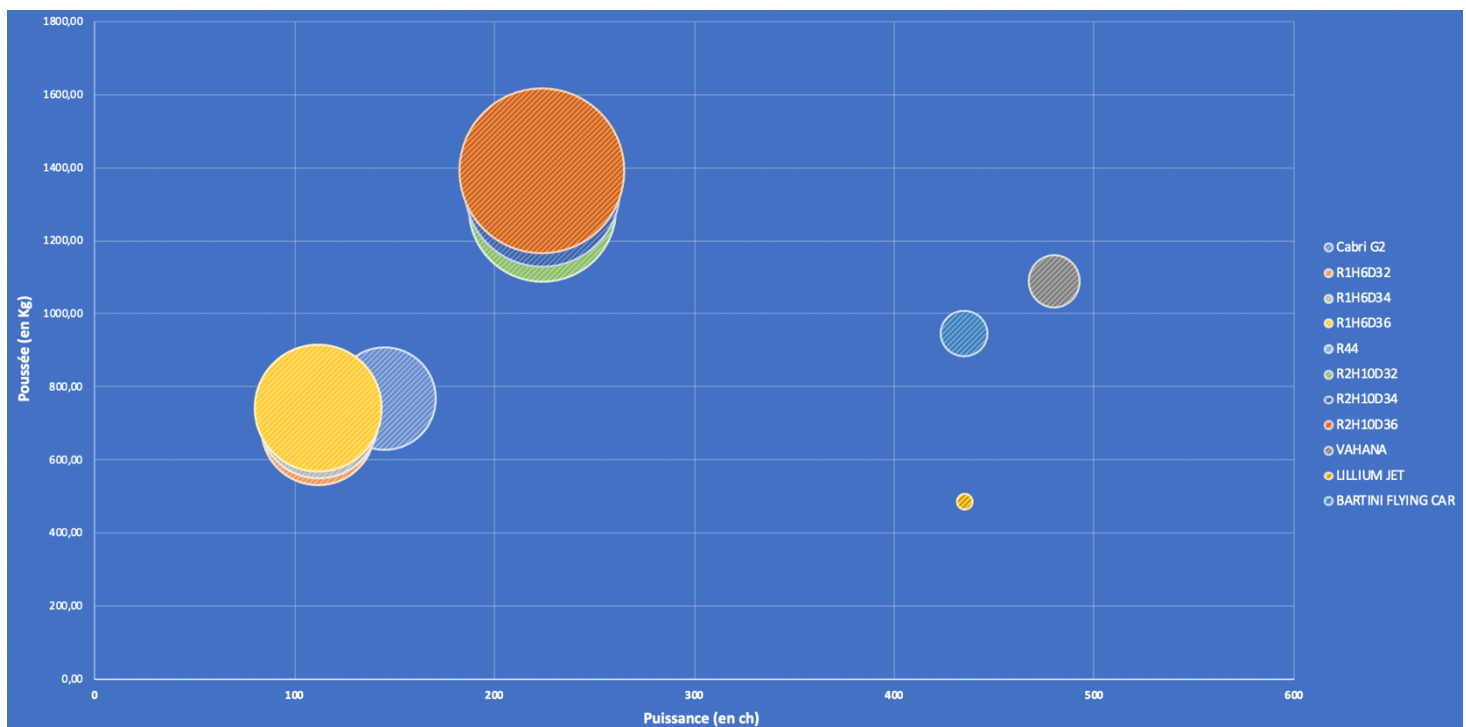


Figure 11 : Diagramme Puissance en fonction de la Poussée au point fixe

d. Vitesse en bout de pale

Nous nous intéressons maintenant à la vitesse de rotation de nos rotors. D'après Vario, le fabricant des pales, la vitesse maximale en bout de pale doit être de 130 m/s. Pour cela il faut limiter la rotation au centre du rotor.

Afin de calculer cette vitesse nous utilisons la formule suivante :

$$V = 2\pi \times \frac{D}{2} \times \frac{N}{60}$$

Avec : N la vitesse au centre du rotor en tr/min

D le diamètre du rotor en m

V la vitesse en bout de pale en m/s

Nous avons rassemblé nos résultats dans le tableau suivant :

	Cabri G2	R1H6D32	R1H6D34	R1H6D36	R44	R2H10D32	R2H10D34	R2H10D36	VAHANA	LILLIUM JET	BARTINI FLYING CAR
Vitesse en bout de pale (m/s)	200	130	130	130	208	130	130	130	130	130	130
Diamètre rotor (en m)	7,2	3,2	3,4	3,6	10,06	3,2	3,4	3,6	1,3	0,2	1,16
Vitesse de rotation (en tr/min)	531	776	730	690	395	776	730	690	1910	12414	2140

Figure 12 : Tableau des résultats de la vitesse en bout de pale

Après quelques recherches nous avons trouvé la vitesse en bout de pale du cabri G2 et du R44, nous avons donc pu calculer leur vitesse de rotation afin de les comparer avec nos prototypes. Et là nous observons une différence assez importante entre nos prototypes et les deux hélicoptères. Cette différence s'explique par le fait que nos diamètres de pale sont très inférieurs au G2 et au R44. De plus les pales des hélicoptères autorisent une vitesse plus importante en bout de pale.

En nous focalisant sur nos deux prototypes on observe qu'en augmentant notre diamètre de 20 cm on a une diminution de notre vitesse de rotation de 40 tr/min au centre du rotor. Il serait donc mieux d'utiliser des pales de 3,2m de diamètre cependant comme nous l'avons vu précédemment nous aimerions utiliser un diamètre de 3,6m. Pour ces deux diamètres il sera nécessaire de réduire la vitesse en sortie du moteur, nous pouvons donc choisir le diamètre de 3,6m qui nécessitera un réducteur plus important mais qui nous permettra d'avoir des meilleures performances pour le Mini Bee.

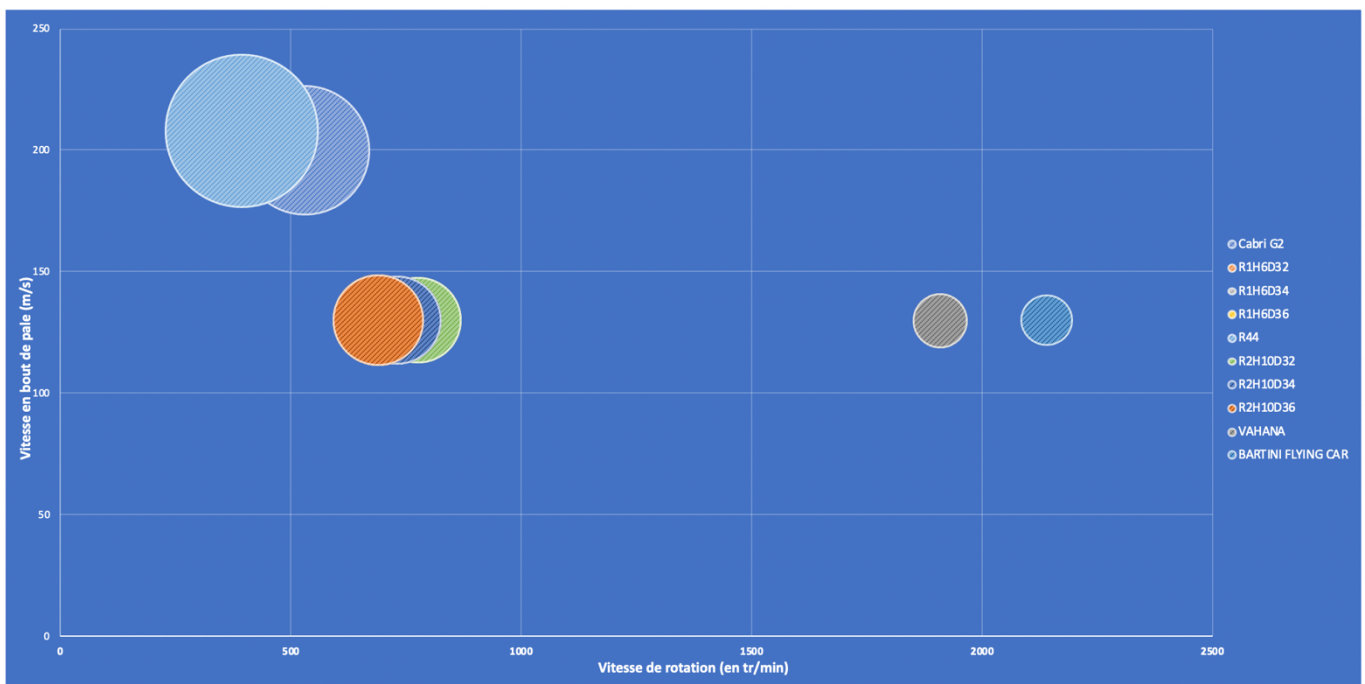


Figure 13 : Diagramme Vitesse de rotation en fonction de la vitesse en bout de pale

Après avoir réalisé un diagramme avec nos résultats, nous observons que les projets ont des résultats supérieurs à ceux que nous avons obtenu avec nos prototypes. Ce résultat s'explique par notre hypothèse qui était de prendre la même vitesse en bout de pale que nos Protos car les projets étant confidentiel, il nous était impossible de trouver la bonne valeur.

e. Débit d'air massique vers le bas

Nous étudions maintenant le débit d'air massique qui traverse les différents rotors. Nous aimerions avoir pour notre Mini Bee un débit d'au moins 10 m/s.

Pour calculer ce débit nous utilisons la formule suivante :

$$V_{air} = \sqrt{\frac{m \cdot g}{\rho_{air} \cdot S}}$$

Avec m la masse maximale en Kg

g la gravité (9,81 m/s²)

ρ_{air} la densité de l'air (1,225 Kg.m⁻³)

S la surface rotorique en m²

Nous obtenons donc le tableau suivant :

	Cabri G2	R1H6D32	R1H6D34	R1H6D36	R44	R2H10D32	R2H10D34	R2H10D36	VAHANA	LILLIUM JET	BARTINI FLYING CAR
Masse maxi (enKg)	700	550	550	550	1087	1100	1100	1100	815	600	1100
Surface rotor (en m2)	40,72	48,25	54,48	61,07	79,49	80,42	90,79	101,79	10,62	1,13	8,45
Débit massique vers le bas (en m/s)	11,73	9,55	8,99	8,49	10,46	10,47	9,85	9,30	24,79	65,21	32,29

Figure 14 : Tableau des résultats du débit massique vers le bas

Nous observons donc ici que plus nous augmentons la surface rotorique de nos prototypes plus le débit diminue. Le choix ici d'utiliser un grand diamètre semble être moins pertinent. Comme nous pouvons le constater nos deux hélicoptères comparatifs ont un meilleur débit car bien que leur masse soit équivalente à nos prototypes, ils ont eu une surface rotorique inférieure et donc un meilleur rendement pour le débit d'air massique vers le bas.

L'observation en parallèle sur les autres projets nous amène à la même conclusion. Ces projets ont favorisé une grande puissance et des faibles surfaces rotor, ce qui est un avantage pour eux ici qui affiche des débits d'air massique vers le bas largement supérieur à ceux de nos Protos.

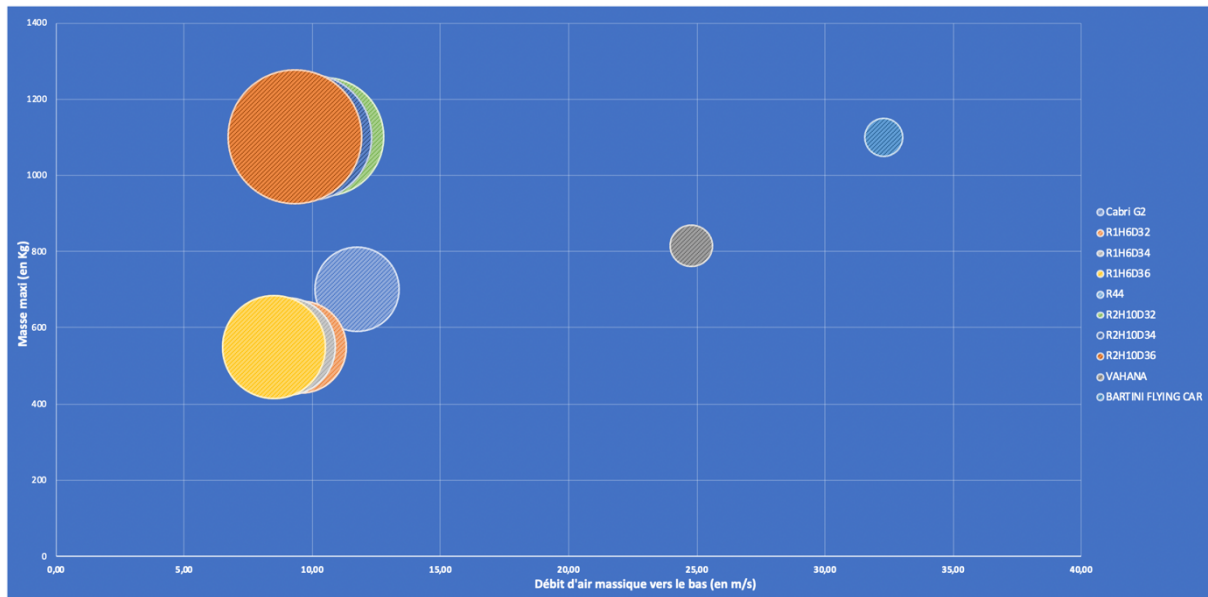


Figure 15 : Diagramme débit d'air massique vers le bas en fonction de la masse maxi

f. Modélisation de la pale

Fin 2019, l'entreprise Technoplane a fait l'acquisition d'une première pale. Cela nous a permis de bien pouvoir l'étudier. Premièrement, cela nous a permis d'avoir une base sur poussée et la puissance que devait fournir les moteurs.

D'autre part, avec le profil NACA qui en ressortait, nous avons pu modéliser la pale sur un logiciel comme CatiaV5. Pour se faire, nous avons récupéré les coordonnées du profil NACA qui s'apparentaient à notre pale : EPPLER 874 Hydrofoil. Il fallait ensuite générer les coordonnées sur Catia pour obtenir une section qui nous a permis ensuite de créer la pale entière.

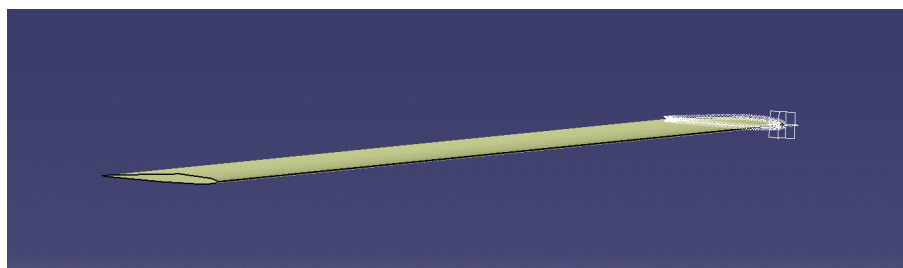


Figure 16 : Vue de face de la modélisation Catia de notre pale

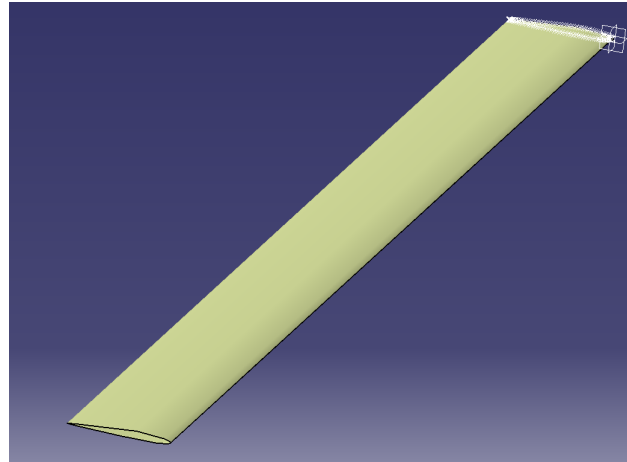


Figure 17 : Vue latéral de la modélisation Catia de notre pale

Une fois les calculs de puissances et poussée réalisés, nous avons pu en déduire 2 modèles distincts : un modèle avec 10 hélices, comme nous prévoyons au départ et un modèle à 6 hélices.

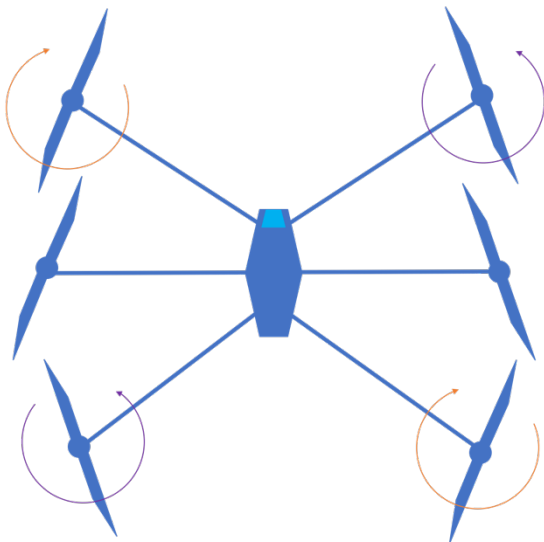


Figure 19 : Proto R1

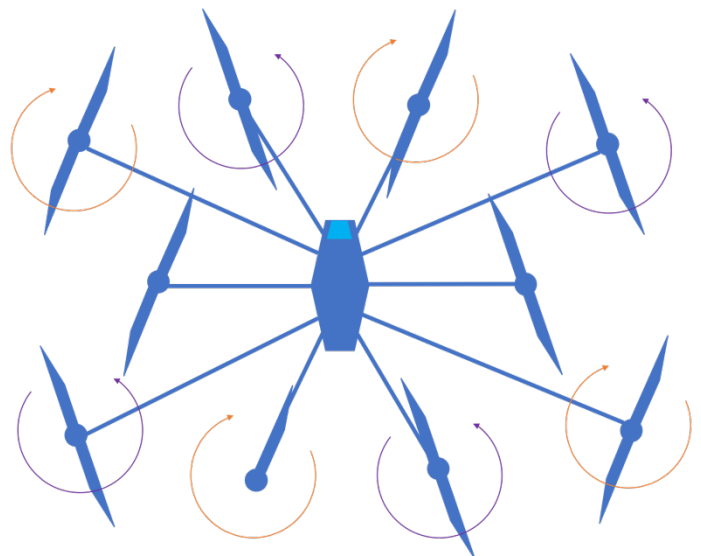


Figure 18 : Proto R2

g. Comparatif avec les drones

Une fois ces deux configurations établies, nous avons étudié le comportement du Mini-Bee en vol. Ce dernier se comportant comme drone, nous avons étudié les comportements d'un tel appareil et ses différents modes de vol.

Pour les vols stationnaires, les hélices reçoivent toute la même puissance. La poussée totale qui en ressort permet de compenser le poids de l'appareil. Lors de la montée, on

est dans la même configuration avec une plus grande puissance fournie par les moteurs. Pour la descente c'est le contraire : la puissance fournie par les moteurs va décroître jusqu'à permettre au poids de faire descendre l'appareil.

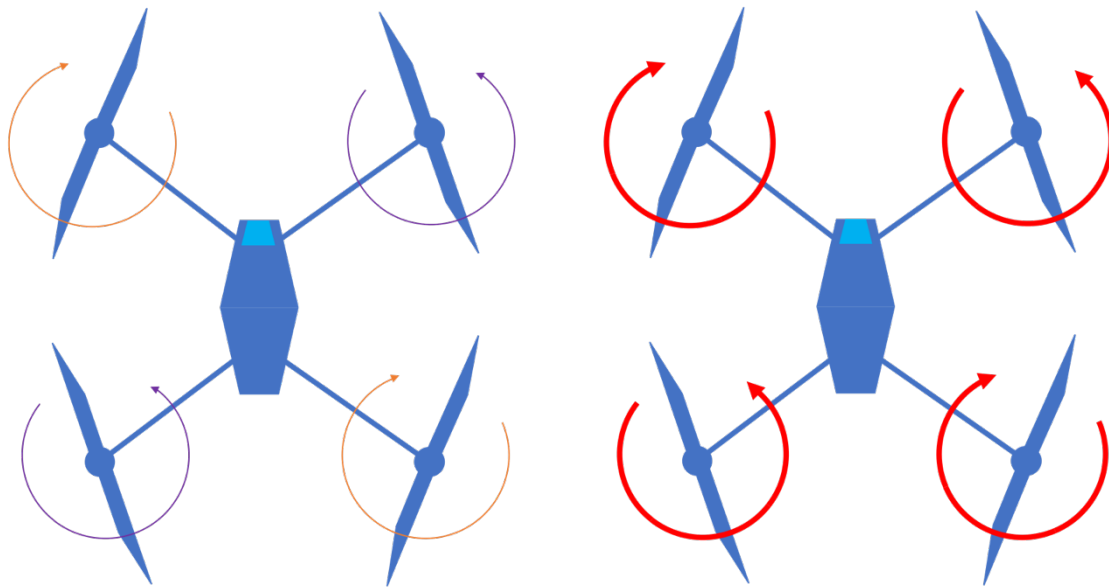


Figure 20 : Fonctionnement des drones en vol stationnaire

Un des points fort pour un hélicoptère ou bien un drone, c'est sa capacité à pouvoir pivoter sur lui-même, notamment en vol stationnaire. Pour cela, il faut que le pilote augmente la vitesse des hélices qui tourne dans le même sens. Ainsi cela va créer une rotation de l'appareil selon le sens des hélices plus rapide.

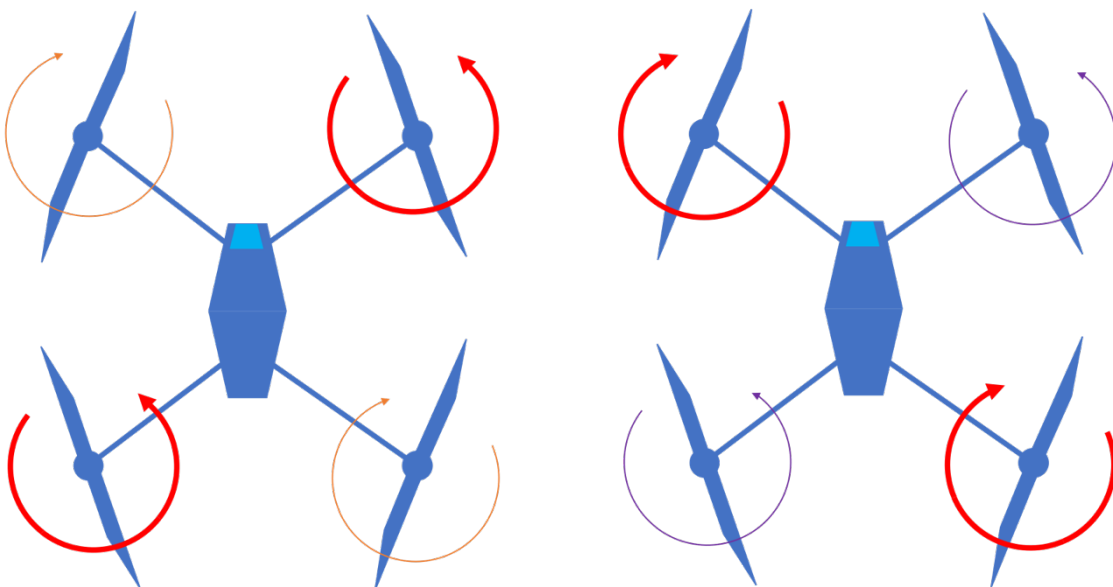


Figure 21 : Fonctionnement des drones en rotation stationnaire

Pour avancer/reculer, aussi appelé tangage, la puissance va être diminuée sur les hélices avant et augmentée sur les hélices arrière. Cela provoque un déplacement rectiligne vers l'avant du drone. Pour que l'aéronef recule, il suffit d'inverser l'intensité des poussées appliquées aux pales.

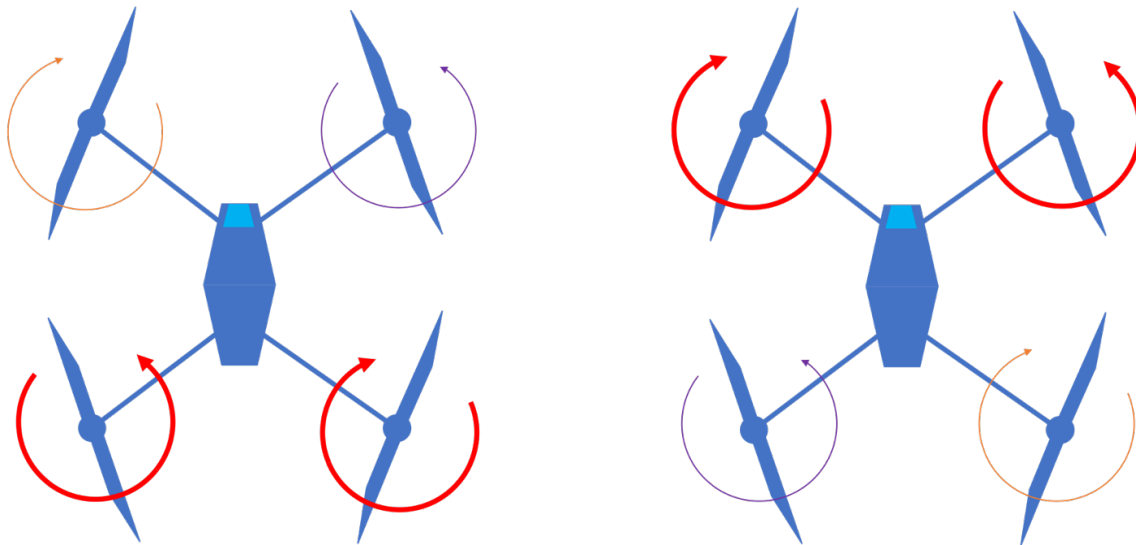


Figure 22 : Fonctionnement des drones en marche avant et en marche arrière

Les mouvements latéraux, roulis, fonctionnent sur le même principe que le tangage. Pour incliner vers la gauche, on va diminuer les moteurs du côté gauche et augmenter ceux du côté droit. Inversement pour incliner l'appareil vers la droite.

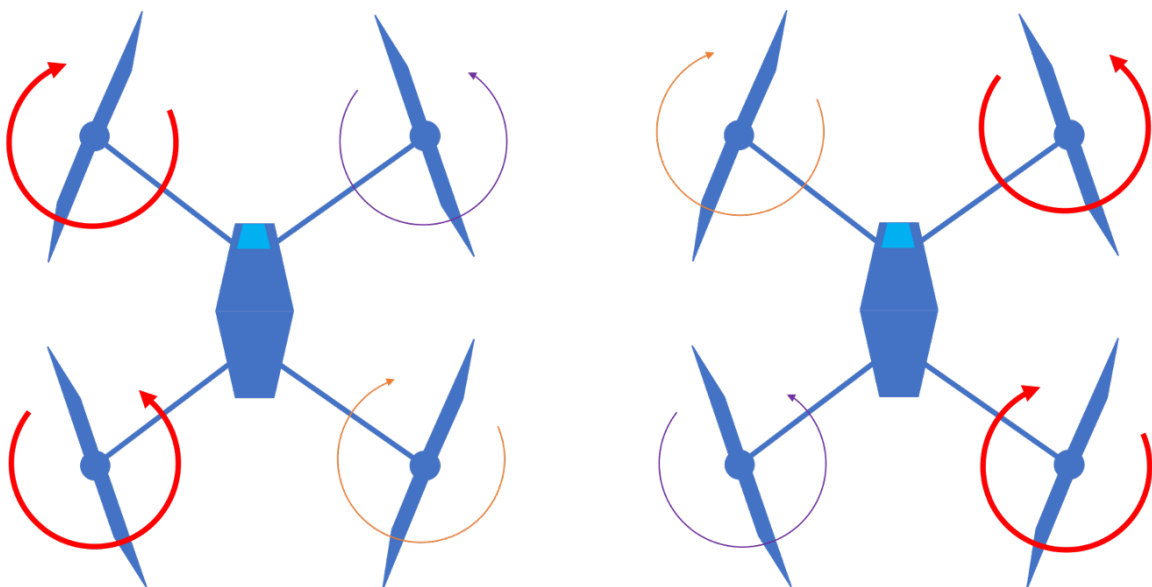


Figure 23 : Fonctionnement des drones pour incliner à gauche et à droite l'appareil

Ces mouvements combinés permettront au Mini-Bee d'être un appareil extrêmement maniable et très pratique notamment en ce qui concerne l'atterrissage. Ces propriétés sont un des atouts du Mini-Bee.

IX. CONCLUSION

Ces deux semestres de travail sur notre projet a été très instructif et nous a permis de travaillé sur un projets innovant qu'est le Mini Bee. Nous avons plus précisément pu approfondir nos connaissances dans le domaine des pales de multicoptères.

Pour notre étude nous avons mis en place un fichier Excel regroupant tous les calculs nécessaires au dimensionnement des pales pour le Mini Bee. Ce fichier pourra par la suite être modifier par d'autre groupes lorsque certaines hypothèses seront fixées de manière définitive.

Nous avons également amorcé une première étude sur les drones afin de pouvoir diriger le Mini Bee. Cette étude est encore à approfondir, et des tests en condition réelle sera nécessaire afin d'avoir des données précises.

Ce projet nous a permis de travailler en groupe et cela sur un projet concret et très intéressant. Nous avons su nous organiser afin de mener a bien les différentes tâches qui nous ont été confiées. Cependant nous avons peu été en relation avec les autres groupes d'étudiants travaillant sur le projet ce qui pour nous est un regret, ils auraient été surement plus instructif d'avoir une collaboration plus forte entre les groupes.

X. RETOUR D'EXPERIENCE

Nous étions tous les trois attirés par le secteur de la propulsion aéronautique et c'est ce qui a orienté notre choix pour ce projet. Le dimensionnement de la propulsion hybride du Mini-Bee fut donc une expérience très enrichissante pour nous trois. Nous avons pu travailler sur des calculs de poussée, adapter notre modèle en fonction du choix de l'hélice et comparer nos résultats avec des appareils déjà existants qui comportent des similitudes avec notre appareil. Nous avons fait plusieurs modèles de calculs pour arriver à définir la configuration la plus adaptée avec philosophie de ce projet. Des modèles de calculs sur Excel à la modélisation de l'hélice sur CatiaV5, nous avons pu chacun utiliser nos compétences pour faire avancer de la meilleure des manières ce projet. Nous avons réussi à être rigoureux tout au long de l'année et nous avons réussi à tenir les objectifs que nous nous étions fixés tout au long de cette période de travail.

Pour gérer l'avancement de notre projet, nous avons pu compter sur la bonne disponibilité de notre tuteur M. Dutertre qui nous a très bien encadré pendant cette étude. La petite frustration de ce projet est plus sur le plan géographique. En effet, Technoplane étant basé à Clermont-Ferrand, il nous a été impossible de pouvoir visiter les locaux de l'entreprise ou de pouvoir échanger directement avec M. Dutertre.

Le point très positif de ce projet c'est que c'est un projet collaboratif. Ainsi nous avons pu utiliser les documents et les recherches des personnes ayant travaillé sur le projet depuis son lancement. Cela nous a permis d'établir une bonne base de calcul dès le début du projet. Nous avons pu ainsi aller plus loin et être plus précis dans les calculs que nous avons réalisés.

L'objectif premier de notre projet était de pouvoir rendre un livrable pour l'été 2020. En effet, les premiers tours d'hélices qui devaient être effectués à cette période, vont sûrement être décalés en raison de la crise sanitaire liée au COVID-19.

XI. BIBLIOGRAPHIE

- Pour l'ensemble du rapport :

<https://bp01.collaborativebee.com/>

- Théorie de Froude formule :

https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique_du_vol_de_l%27h%C3%A9licopt%C3%A8re

- Données pour les calculs :

<https://evtol.news/aircraft/a3-by-airbus/>

<https://evtol.news/aircraft/bartini/>

<https://evtol.news/aircraft/lilium/>

<https://robinsonheli.com/r44-specifications/>

<https://coptering.com/en/coptering/our-fleet/cabri-g2/cabri-g2-specifications/>

- Drone:

<http://ladronerie.e-monsite.com/pages/le-fonctionnement-d-un-drone.html>

<https://uavcoach.com/how-to-fly-a-quadcopter-guide/>

<https://www.guide-drone.com/comment-vole-un-drone/>

<https://www.youtube.com/watch?v=GVAqcQ4jzM>

- NACA:

<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=e874-il>

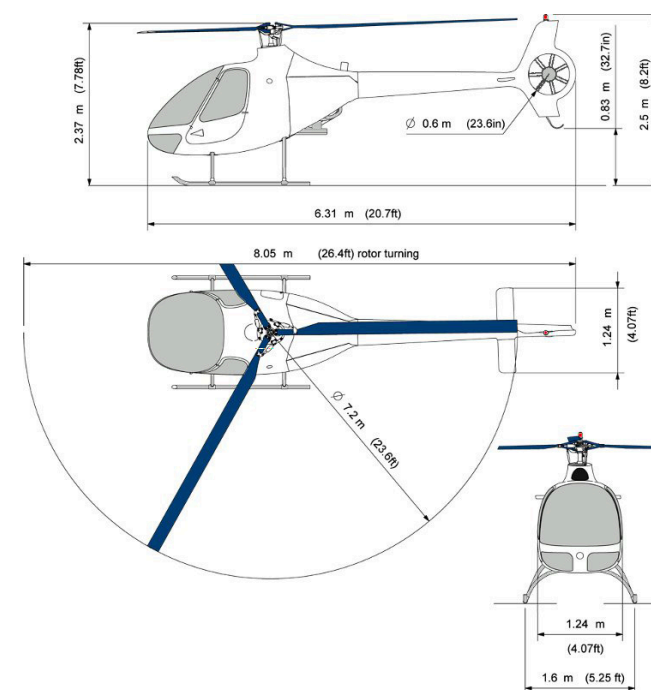
XII. ANNEXES

1. Caractéristiques détaillées de nos Protos :

	R1H6D32	R1H6D34	R1H6D36	R2H10D32	R2H10D34	R2H10D36
Nombre de place	Pilote et 1 passagers	Pilote et 1 passagers	Pilote et 1 passagers	Pilote et 3 passagers	Pilote et 3 passagers	Pilote et 3 passagers
Vitesse de croisière (Km/h)	148	148	148	200	200	200
Rayon d'action (Km)	600	600	600	800	800	800
Nombre de rotor	6	6	6	10	10	10
Poids (Kg)	550	550	550	1100	1100	1100
Longueur fuselage (m)	10	10	10	10	10	10
Hauteur (m)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Largeur (m)	10	10	10	10	10	10
Diamètre rotor principal (m)	3,2	3,4	3,6	3,2	3,4	3,6
Diamètre rotor anti-couple (m)	/	/	/	/	/	/
Moteur	1*Rotax 915 IS (avec 1 Emrax)	1*Rotax 915 IS (avec 1 Emrax)	1*Rotax 915 IS (avec 1 Emrax)	2* Rotax 915 IS (avec 2 Emrax)	2* Rotax 915 IS (avec 2 Emrax)	2* Rotax 915 IS (avec 2 Emrax)
Puissance au décollage (cv)	112	112	112	224	224	224
Contenance en carburant (L)						
δ : Densité de l'air	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225
Déportance	Environ 0	Environ 0	Environ 0	Environ 0	Environ 0	Environ 0
Ω : Vitesse de rotation (rad/s)	81,25	76,47	72,22	81,25	76,47	72,22
Vitesse en bout de pale (m/s)	130	130	130	130	130	130
Nombre de pales	12	12	12	20	20	20
R : Rayon du disque (m)	1,6	1,7	1,8	1,6	1,7	1,8
l : La corde (m)	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093
Cz	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Cx	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Constante Phi	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037
S : Surface à l'air (m2)	48,25	54,48	61,07	80,42	90,79	101,79

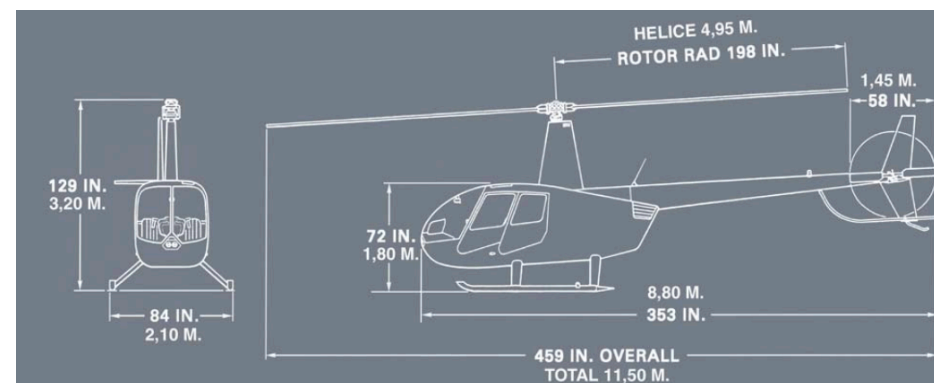
2. Descriptif du Cabri G2 :

Nombre de place	Pilote et 1 passagers
Vitesse de croisière	148 Km/h
Rayon d'action	700 Km
Autonomie	5H40
Poids	700 Kg
Longueur fuselage	8,05 m
Hauteur	2,37 m
Largeur	1,6 m
Diamètre rotor principal	7,2m
Diamètre rotor anti-couple	1,2 m
Moteur	Lycoming O-360
Puissance au décollage	145 cv
Contenance en carburant	170 L



3. Descriptif du R44 :

Nombre de place	Pilote et 3 passagers
Vitesse de croisière	209 Km/h
Rayon d'action	740 Km
Autonomie	03H30
Poids	1087 Kg
Longueur fuselage	11,65 m
Hauteur	3,27 m
Largeur	1,28 m
Diamètre rotor principal	10,06 m
Diamètre rotor anti-couple	1,47 m
Moteur	Lycoming O-540-F1B 6 cylindre
Puissance au décollage	225 hp
Contenance en carburant	30 gal/ 116 L



4. Descriptif du Vahana, Lillium Jet et Bartini Flying Car :

	VAHANA	LILLIUM JET	BARTINI FLYING CAR
Nombre de place	2 passagers	2 passagers	
Vitesse de croisière (Km/h)	230	300	300
Rayon d'action (Km)	100	300	150
Nombre de rotor	8	36	8
Poids (Kg)	815	600	1100
Longueur fuselage (m)	5,7		5
Hauteur (m)	2,8		
Largeur (m)	6,2		5
Diamètre rotor principal (m)	1,3	0,2	1,16
Diamètre rotor anti-couple (m)	/	/	/
Moteur			
Puissance au décollage (cv)	480	435	435
Contenance en carburant (L)			
δ : Densité de l'air	1,225	1,225	1,225
Déportance	Environ 0	Environ 1	Environ 2
Ω : Vitesse de rotation (rad/s)	200,00	1300,00	224,14
Vitesse en bout de pale (m/s)	130	130	130
Nombre de pales	24	12	12
R : Rayon du disque (m)	0,65	0,1	0,58
l : La corde (m)	0,09	0,09	0,09
Cz	0,81	0,81	0,81
Cx	0,05	0,05	0,05
Constante Phi	0,14	0,1	0,08
S : Surface à l'air (m2)	10,62	1,13	8,45

