

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2024

—

SCIENCES DE L'INGENIEUR

RAPPORT DE JURY

# RAPPORT DE JURY

## Composition du jury

---

- Pascale Costa, inspectrice générale de l'éducation, du sport et de la recherche, présidente du jury
- Stéphanie Texier, inspectrice d'académie-inspectrice pédagogique régionale, académie de Créteil, vice-présidente du jury
- Geneviève Faburel, professeure, Lycée Raoul Follereau, Belfort, académie de Besançon
- Régis Lamoureux, professeur, Lycée Germaine Tillion, Montbéliard, académie de Besançon
- Laurent Ailloud, professeur, lycée Algoud Laffemas, Valence, académie de Grenoble
- Ianis Bernard, professeur, lycée Ferdinand Buisson, Voiron, académie de Grenoble

## Quelques chiffres

---

	Candidats inscrits		Candidats présents	% de filles
	France	Étranger		
Session 2023	155	0	146	11%
Session 2024	186	3	185	15 %

La répartition des candidats est assez représentative de celle des classes de spécialité sciences de l'ingénieur. Il est à noter que le nombre de candidats par rapport à l'année dernière est en hausse.

Le jury incite les enseignants de terminale à encourager leurs élèves à présenter le concours général, c'est un exercice très formateur qui valorise leurs élèves et leur établissement.

## Palmarès de la session 2024

---

Le jury félicite l'ensemble des candidats à l'épreuve de sciences de l'ingénieur du concours général des lycées. Cette année trois prix, cinq accessits et huit mentions ont été attribués.

Les trois premiers candidats ont reçu leur prix lors d'une cérémonie en Sorbonne à Paris en présence de la ministre de l'Éducation nationale et de la jeunesse le 11 juillet 2024.

## Présentation du support de l'épreuve

Dans les zones montagneuses, l'acheminement de personnes ou de matériel se fait essentiellement sur la route par voitures (dans la limite des possibilités d'accès), parfois par hélicoptères (bruyants). Plus récemment, des colis légers sont expédiés grâce à des drones (bruyants et peu autonome). Ces solutions consomment toutes beaucoup d'énergie.

Le sujet portait sur l'aérOnde<sup>1</sup>, un concept innovant qui permet un mode de déplacement aérien électrique, à faible consommation. Ses fonctions principales sont de transporter une personne ou du matériel d'un point A à un point B. L'aérOnde est un dirigeable avec un ballon de forme torique, gonflé à l'hélium ou au dihydrogène, qui suit la même législation que les ULM car le pilote est embarqué.

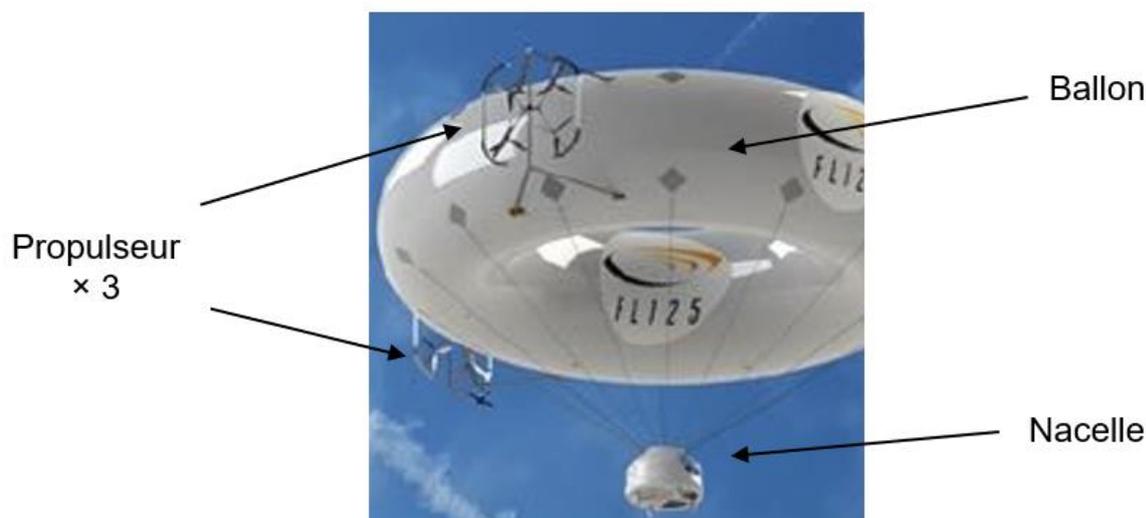


Figure 2 : l'aérOnde

Le pilote et le passager éventuel prennent place dans la nacelle qui se trouve suspendue au tore. Les déplacements sont assurés par trois systèmes de propulsion. Chaque propulseur est composé d'un quadricoptère qui embarque quatre batteries, quatre variateurs, quatre moteurs et quatre hélices.

Après avoir resitué le produit aérOnde dans un contexte d'innovation commerciale et technique, l'étude proposée permettait au candidat de tisser des liens entre les performances d'autonomie ou de consommation énergétique, de sécurité, et de pilotabilité, avec les choix d'architecture qui ont été retenus par les concepteurs. Cette architecture pouvait être appréhendée par les candidats au moyen d'un fil directeur qui, à la manière d'un arbre dont la racine part du système global, se focalisait itérativement, à chaque partie, sur un sous-système du système étudié à la partie précédente, à la manière de zoom successifs.

Le sujet comptait six parties. La partie A avait pour objectif d'introduire le système en tant que produit innovant, en comparaison à une autre solution de drone. La partie B permettait de valider la géométrie et l'implantation des sous-systèmes « ballon principal » et « propulseurs ». La partie C se focalisait sur le pilotage et l'orientation individuelle de chacun des propulseurs. La partie D poursuivait en mettant en évidence à la fois l'autonomie permise par les batteries et le pilotage des quatre moteurs brushless équipant un propulseur. La partie E consistait à traiter numériquement les données de vol en vue de valider les performances d'autonomie. Enfin, la partie F concluait sur l'étude menée et sur la validation du cahier des charges.

<sup>1</sup> <https://aeronde.com/>

## Commentaires généraux

---

Le jury encourage vivement les élèves de première et de terminale souhaitant se présenter au concours général des lycées à se préparer spécifiquement pour cette épreuve. Pour cela, il faut développer des compétences portant sur l'ensemble des attendus du programme de la spécialité sciences de l'ingénieur. Une maîtrise, même très bonne, de seulement quelques parties du programme ne permet pas de se classer parmi les meilleurs candidats. Certains ont montré, cette année encore, une aisance remarquable sur l'ensemble du sujet proposé.

Le sujet était relativement long mais permettait aux candidats d'exprimer leurs compétences sur une grande partie du programme.

Les meilleures copies abordaient la totalité des questions du sujet et étaient d'un excellent niveau. Toutefois, le jury regrette que la plupart des autres candidats aient traité le sujet linéairement, passant trop de temps sur les premières parties, au détriment de la suite. Il est rappelé aux candidats que la pondération des parties n'est pas forcément homogène (voir, en partie suivante, les poids relatifs des différentes parties dans la note finale). Entre autres, les parties D et E, à dominante électrique et informatique, ont été moins traitées que les autres parties. Il est par ailleurs rappelé que les réponses rédigées doivent apparaître dans l'ordre des questions du sujet.

Concernant les applications numériques, il est rappelé qu'une valeur numérique sans unité n'est pas une réponse valide. Des ordres de grandeur sont à avoir en tête pour les valeurs numériques (une puissance en GW pour un drone, une masse en grammes pour une batterie, etc.), et un regard critique est bienvenu en cas de doute de la part du candidat. Enfin, le nombre de chiffres significatifs est à respecter en fonction des données de l'énoncé, deux chiffres significatifs semblent être un nombre suffisant.

Il est important d'apporter du soin lors de la rédaction des copies, en particulier de bien écrire le numéro de la question traitée, de souligner les résultats et d'écrire lisiblement. Il est rappelé que, les copies étant numérisées et la correction dématérialisée, certaines couleurs passent mal au scan, et la rédaction doit donc être faite au stylo noir ou bleu.

## Commentaires spécifiques partie par partie

---

### Partie A : environ 12 % des points

Cette partie a été globalement bien traitée même si trop de temps y a souvent été consacré.

À la question 6, beaucoup de candidats oublient le couple dans l'inventaire des actions mécaniques.

### Partie B : environ 16 % des points

Les questions 11 à 14 ont été plutôt bien traitées. Les candidats doivent faire attention aux unités pour les applications numériques : entre autres les  $\text{km.h}^{-1}$  doivent être convertis en  $\text{m.s}^{-1}$ .

Aux questions 18 et 19, presque aucune copie ne traite correctement le théorème du moment statique. La rigueur des notations est à soigner.

### Partie C : environ 21 % des points

À la question 24, trop peu de candidats maîtrisent le graphe des liaisons, beaucoup le confondent avec un schéma cinématique.

Dans la question 25, la formule de distributivité du champ de moments (Varignon) est trop souvent erronée. Réduire un torseur en changeant de point pose problème trop souvent.

Aux questions 26 et 27, la désignation rigoureuse des liaisons devrait être maîtrisée. Beaucoup de candidats confondent les « zéros » du torseur cinématique avec le torseur d'actions transmissible d'une liaison.

À la question 30, donner un sens physique à la notion d'inertie pose problème à une majorité des candidats. Le lien entre l'inertie et la pente d'une courbe de vitesse n'a été perçu par presque aucun candidat.

### **Partie D : environ 37 % des points**

Aux questions 32 et 35, le jury a apprécié la mise en œuvre des schémas multiphysiques.

Dans les questions 33 et 34, 36 et 37, la lecture graphique et l'identification (du gain et des temps) posent problème à une trop grande proportion des candidats. L'erreur statique relative est quant à elle plutôt bien maîtrisée.

Pour la rédaction de la question 38, il est recommandé aux candidats de rappeler les critères et niveaux des exigences citées.

À la question 40, trop d'erreurs sont commises sur la classification entre grandeur effort et flux, notamment concernant la vitesse de rotation et le couple.

Peu de candidats abordent les deux parties de dimensionnement de la batterie (questions 40 à 48) et commande du moteur (questions 49 à 60). Cependant, pour celles et ceux qui les ont traitées, ces parties sont plutôt bien réussies.

À la question 58, bien que la relation et les valeurs soient données, presque aucun candidat ne parvient à déterminer le nombre de pôles du moteur.

### **Partie E : environ 8 % des points**

Cette partie a été traitée par trop peu de candidats. Certaines lignes à remplir dans le code à trous étaient pourtant largement abordables.

### **Partie F : environ 6 % des points**

Les candidats montrent globalement très peu de recul sur le sujet et n'arrivent pas à synthétiser leur travail.

---

# SYSTÈME AERONDE

---

## Éléments de correction

Le corrigé de l'épreuve écrite ci-après n'est qu'une proposition qui n'a d'autre but que celui d'aider les futurs candidats dans leur préparation au concours général des lycées. Il ne s'agit donc absolument pas d'un modèle normatif.

---

### A/ Le dirigeable, une solution innovante

---

**Q1.** À l'aide de la table 1, donner la valeur numérique de la norme de la poussée d'Archimède  $\|\vec{\pi}_A\|$  nécessaire pour maintenir l'aérOnde en équilibre vertical.

$$\|\vec{\pi}_A\| = M_{\text{tot}}g = 426 \times 9.8 = 4200 \text{ N}$$

**Q2.** En s'appuyant sur le schéma de la figure 4, exprimer en fonction de  $\|\vec{V}_z\|$ , de  $M_{\text{tot}}$  et  $g$  les puissances :

- $P_u(\vec{\pi}_A)$  et  $P_u(\vec{P})$  en phase de montée,
- $P_u(\vec{\pi}_A)$  et  $P_u(\vec{P})$  en phase de descente.

Dans chacun des quatre cas, en fonction du signe, préciser si la puissance est motrice ou frein pour le mouvement vertical.

- en phase de montée :  $P_u(\vec{\pi}_A) = M_{\text{tot}}g\|\vec{V}_z\|$  : motrice ; et  $P_u(\vec{P}) = -M_{\text{tot}}g\|\vec{V}_z\|$  frein
- en phase de descente :  $P_u(\vec{\pi}_A) = -M_{\text{tot}}g\|\vec{V}_z\|$  : frein ; et  $P_u(\vec{P}) = M_{\text{tot}}g\|\vec{V}_z\|$  motrice

**Q3.** Dans chacune des deux phases (montée ou descente), exprimer ce que vaut la puissance mécanique développée  $P_C = P_u(\vec{\pi}_A) + P_u(\vec{P})$ . Expliquer en quoi ceci est intéressant pour le levage.

Dans chacune des deux phases,  $P_C = 0$ . La puissance consommée pour soulever une masse avec le dirigeable est nulle, il peut rester en suspension pendant un temps long.

**Q4.** Indiquer en justifiant la réponse si le choix des concepteurs est  $\|\vec{\pi}_A\| < \|\vec{P}\|$  ou bien  $\|\vec{\pi}_A\| > \|\vec{P}\|$ .

Ils choisissent  $\|\vec{\pi}_A\| < \|\vec{P}\|$  pour que le dirigeable « retombe » lentement au sol en cas de panne, plutôt qu'il ne s'envole.

**Q5.** Expliciter quelle action mécanique, pas encore citée ici, cause essentiellement la consommation énergétique du dirigeable.

L'action du vent sur le ballon, qui nécessite de forcer pour rester sur place, n'a pas été prise en compte.

- Q6.** a. Faire l'inventaire des actions mécaniques extérieures auxquelles est soumis le système isolé.  
 b. À l'aide du principe fondamental de la statique en résultante suivant  $\vec{z}$ , déterminer la valeur numérique de la force axiale  $F_a = \|\vec{F}_a\|$  qui doit être exercée par chacun des 18 rotors.

a – L'aéronef est soumis à :

- son poids
- 18 forces axiales
- 18 couples résistants
- (on néglige ici encore l'action du vent)

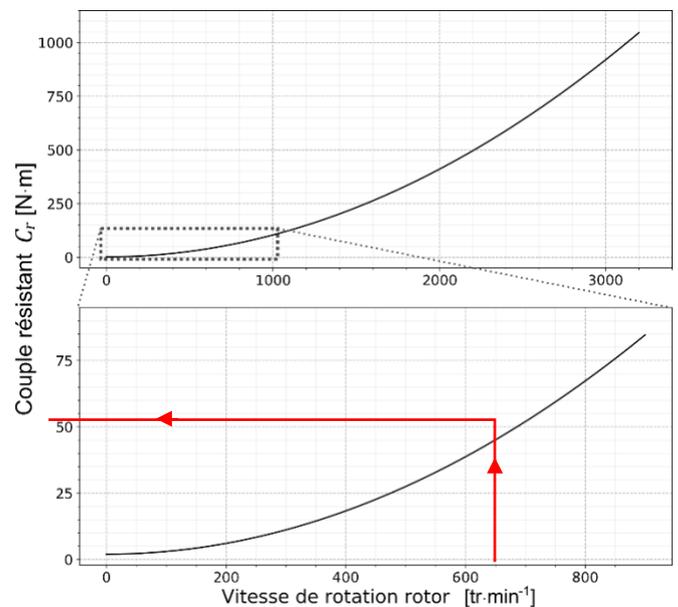
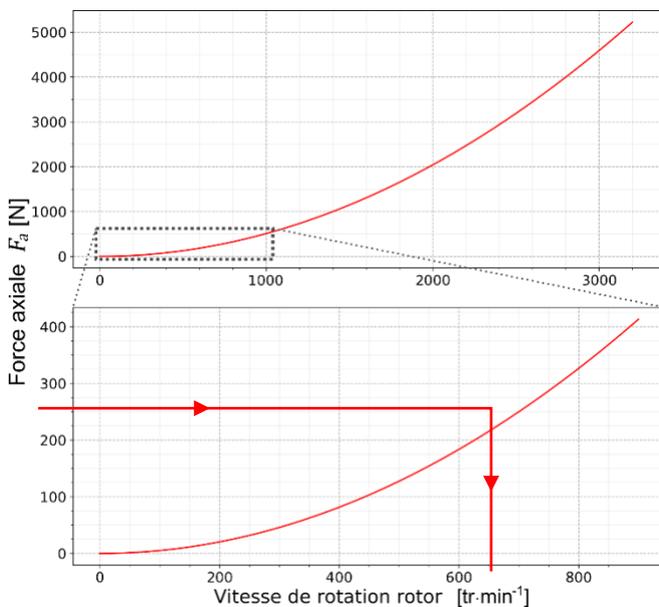
b – Le TRS selon la verticale donne :  $18F_a - M_{\text{tot}}g = 0$  donc  $F_a = \frac{M_{\text{tot}}g}{18} = \frac{450 \times 9.8}{18} = 245 \text{ N}$

- Q7.** En s'appuyant sur la question **Q6.a**, justifier en quelques lignes pourquoi le multicoptère était déséquilibré lorsque les rotors tournaient tous dans le même sens. Expliquer pourquoi l'alternance des sens de rotation règle ce problème.

Si les rotors tournent tous dans le même sens, les 18 couples résistants se somment et aucun moment ne les contrebalance. En inversant le sens de la moitié, 9 couples résistants (dans un sens) compensent les 9 autres (en sens opposé) et il est possible de trouver un équilibre où la somme de ces 18 couples résistants est nulle.

- Q8.** D'après la valeur de force axiale  $F_a$ , déterminée en question **Q6.b**, déduire par lecture du **DR1** la valeur du couple résistant  $C_r$  exercé sur chaque rotor. Les tracés nécessaires à cette lecture doivent être apparents sur le **DR1**.

Chaque rotor doit exercer  $F_a \approx 250 \text{ N}$  on lit  $\omega = 700 \text{ tr.min}^{-1}$ , et pour cette valeur  $C_r \approx 50 \text{ N.m}$



- Q9.** Donner l'expression littérale de la puissance mécanique totale  $P'_C$  développée par le multicoptère en vol stationnaire. Faire l'application numérique.

Chaque moteur fournit une puissance mécanique  $C_r \omega$  avec  $\omega = 73 \text{ rad.s}^{-1}$  donc  $P'_C = 18C_r \omega = 66 \text{ kW}$

**Q10. a.** Au vu de cet écart de puissance développée, indiquer quelle performance utile au client de l'eVTOL, non citée en table 1, est très différente entre le dirigeable étudié et le multicoptère.

**b.** D'après les données de vitesse et la géométrie (table 1), justifier la répartition des secteurs cible pour lesquels chacun des deux produits est compétitif.

**a** – C'est l'autonomie en temps de vol, (ou éventuellement la portée) qui diffèrera beaucoup

**b** – L'AérOnde est adaptée pour soulever des charges, rester à vitesse lente ou statique (donc livraison lourde, travaux)

Le multicoptère est plus rapide, maniable, petit, puissant (accélérations) : il est adapté pour les transports rapides sur courtes distances (en ville).

## **B/ Choix de la géométrie et de l'architecture du dirigeable**

---

**Q11.** Expliquer alors quel peut être l'intérêt de la forme du ballon de l'AérOnde, qui est de symétrie de révolution.

La surface projetée et le coefficient  $C_x$  sont indépendants de l'orientation du vent par rapport au ballon (facilite le pilotage).

**Q12. a.** Donner l'expression de  $r$  et de  $R$ , en fonction de  $h$  et  $\emptyset$ . Déterminer leurs valeurs numériques.

**b.** Donner l'expression littérale de la surface projetée  $S_p$  en fonction de  $h$  et  $\emptyset$  (pour ce cas d'écoulement relatif horizontal). Faire l'application numérique.

$$\mathbf{a} - r = \frac{h}{2} = 2,3 \text{ m} \text{ et } R = \frac{\emptyset - h}{2} = 5,35 \text{ m.}$$

**b** –  $S_p$  = aire du rectangle base  $2R$  hauteur  $h$  + aire du disque diamètre  $h$ .

$$S_p = 4Rr + \pi r^2 = h(\emptyset - h) + \frac{\pi}{4} h^2 = 65.8 \text{ m}^2$$

**Q13. a.** Déterminer, dans ce cas, la valeur numérique de la force de traînée aérodynamique  $F_p$  pour faire avancer le ballon à vitesse  $25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  dans un air au repos ( $V_{\text{rel}} = V_{\text{vent}/\text{ballon}} = V_{\text{vent}/\text{sol}} - V_{\text{ballon}/\text{sol}} = 0 - V_{\text{ballon}/\text{sol}} = -25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

**b.** En déduire la valeur numérique de la puissance moyenne  $P_{C\ 25}$  correspondante.

**c.** De même, déterminer  $P_{C\ 30}$  pour une vitesse de  $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Déterminer l'augmentation de la puissance développée, en pourcents, pour passer de  $25$  à  $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  en vitesse d'avance.

$$\mathbf{a} - F_p = F_v = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} S_p C_x V_{\text{rel}}^2 = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 70 \times 0.112 \times \left(\frac{25}{3.6}\right)^2 = 182 \text{ N}$$

$$\mathbf{b} - P_{C\ 25} = F_v V_{\text{rel}} = 1300 \text{ W}$$

$$\mathbf{c} - P_{C\ 30} = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 70 \times 0.112 \times \left(\frac{25}{3.6}\right)^3 = 2200 \text{ W}$$

Augmenter la vitesse de 20% augmente la puissance consommée de 73% ! D'où la faible vitesse de l'aéronef pour garder de l'autonomie en temps de vol.

- Q14. a.** Déterminer la valeur numérique du volume  $V_0$  ballon lorsque celui-ci est totalement gonflé.  
**b.** Estimer le prix du gonflage d'une part si le gaz est de l'hélium, et d'autre part si le gaz est du dihydrogène.  
**c.** Le concepteur a choisi de gonfler le ballon à l'hélium s'il y a au moins un passager à bord et de le gonfler au dihydrogène si l'aérOnde est pilotée depuis le sol (comme un drone). Justifier ce choix.

$$a - V_0 = 2 \times \pi^2 \times 5.35 \times 2.3^2 = 558 \text{ m}^3$$

$$b - \text{Le prix du gonflage à l'Hélium est } 30 \times 558 = 17\,000 \text{ €}$$

$$\text{Le prix du gonflage au H}_2 \text{ est } 27 \times 0.09 \times 558 = 1350 \text{ €}$$

**c** – Le dihydrogène est inflammable et pourrait mettre en danger le pilote (cf le fameux crash du zeppelin Hindenburg en 1937).

- Q15.** Déterminer la valeur numérique de la charge utile maximale (masse)  $M_U$  que peut embarquer l'AérOnde.

À l'équilibre vertical, la flottabilité compense le poids :  $(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{int}})V_0g = (M_U + M_V)g$

$$\text{Donc } M_U = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{int}})V_0 - M_V = (1.2 - 0.18) \times 558 - 226 = 344 \text{ kg}$$

- Q16.** Indiquer le pourcentage du volume du ballon occupé lorsque celui-ci est au sol.

Deux raisonnements acceptés.

1) Au sol avec cette charge utile réduite,  $(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{int}})V_{\text{sol}}g = (M_U + M_V)g$  d'où, avec  $M_V = 200 \text{ kg}$   
 D'où  $V_{\text{sol}} = \frac{M_U + M_V}{\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{int}}} = \frac{200 + 226}{1.2 - 0.18} = 418 \text{ m}^3$ , d'où  $\frac{V_{\text{sol}}}{V_0} = \frac{418}{558} = 0.75 = 75 \%$ .

2) La portance est constante donc  $(\rho_{\text{air } 3000} - \rho_{\text{int}})V_0g = (\rho_{\text{air sol}} - \rho_{\text{int}})V_{\text{sol}}g$   
 D'où  $\frac{V_{\text{sol}}}{V_0} = \frac{\rho_{\text{air } 3000} - \rho_{\text{int}}}{\rho_{\text{air sol}} - \rho_{\text{int}}} = \frac{0.94 - 0.12}{1.2 - 0.18} = 75 \%$

- Q17.** Déterminer la valeur numérique de la puissance totale consommée  $P_{C \text{ cas1}}$  dans le cas 1.

$$\text{Dans le cas 1, } F_C = F_v \text{ donc } P_{C \text{ cas1}} = 0 + 0 + 0.9 \times 265^{3/2} = 3900 \text{ W}$$

**a.** Dans le cas 2, écrire le principe fondamental de la statique (PFS) en résultante suivant  $\vec{x}$  puis en moment au point O suivant  $\vec{z}$ . Montrer alors que la condition d'équilibre est  $F_A = F_B = \frac{F_v}{2}$ .

**b.** Déterminer alors la valeur numérique de la puissance totale consommée  $P_{C \text{ cas2}}$  dans ce cas 2.

**a** – L'AérOnde est isolée. Le théorème du moment statique en O suivant  $\vec{z}$

$$\text{donne } -F_A R_p \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + 0 + F_B R_p \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = 0 \text{ d'où } F_A = F_B$$

Et d'autre part le théorème de la résultante statique suivant  $\vec{x}$  donne :

$$F_A + F_B - F_v = 0 \text{ d'où } F_A = F_B = \frac{F_v}{2}$$

$$b - P_{C \text{ cas2}} = 0.9 \times 2 \times \left(\frac{265}{2}\right)^{3/2} + 0 = 2700 \text{ W}$$

Remarque : en traction (cas 1, plus consommateur d'énergie) l'équilibre est stable. En propulsion arrière (cas 2 plus économique), l'équilibre est instable : si une perturbation fait prendre de l'assiette au ballon, il y aura plus de prise et il risque de cabrer.

**Q18.** Dans le cas 3, déterminer les expressions littérales de  $F_A$  et de  $F_B$  (sachant que  $F_B = F_C$ ) en fonction de  $F_v$ , pour maintenir l'équilibre.

Le TMS en O suivant  $\vec{z}$  donne :  $-F_A R_p + 0 + 2F_B R_p \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = 0$  d'où  $F_A = F_B$

d'où le TRS suivant  $\vec{x}$  :  $F_A = F_B = F_C = \frac{F_v}{3}$

**Q19.** Déterminer la valeur numérique de la puissance totale consommée  $P_{C \text{ cas3}}$  dans le cas 3. Déterminer alors (en %) l'économie de puissance de cette répartition des propulsions par rapport au cas 1.

$P_{C \text{ cas3}} = 0.9 \times 3 \times \left(\frac{265}{3}\right)^{3/2} + 0 = 2200 \text{ W}$

Par rapport au pilotage 1, le pilotage 2 permet d'économiser 29% d'énergie, et le pilotage 1 environ 42%.

### C. Architecture et pilotage d'un propulseur

**Q20.** Compléter le tableau dans le document réponse **DR2** en proposant une stratégie de commande pour chacun des quatre moteurs, qui peut être soit « $\omega_0 + \delta\omega$ » soit « $\omega_0 - \delta\omega$ ». Déterminer alors les deux actions mécaniques globales qui en résultent : force de propulsion  $F_p$  et couple  $C_{\text{tot}}$ .

Degré de liberté angulaire	Roulis	Tangage	Lacet
$\omega_{m4} =$	$\omega_0 + \delta\omega$	$\omega_0 + \delta\omega$	$\omega_0 + \delta\omega$
$\omega_{m5} =$	$\omega_0 + \delta\omega$	$\omega_0 - \delta\omega$	$\omega_0 - \delta\omega$
$\omega_{m6} =$	$\omega_0 - \delta\omega$	$\omega_0 - \delta\omega$	$\omega_0 + \delta\omega$
$\omega_{m7} =$	$\omega_0 - \delta\omega$	$\omega_0 + \delta\omega$	$\omega_0 - \delta\omega$

**Actions Mécaniques :**

$F_p =$	$4F_0$	$4F_0$	$4F_0$
$C_{\text{tot}} =$	$0$	$0$	$4\delta C$

**Q21.** D'après le paramétrage introduit en figure 12, pour les deux orientations particulières illustrées en figure 11, remplir le texte à trous dans le document réponse **DR2**, avec l'un des mots suivants : « roulis », « tangage » ou « lacet ».

**DR2 :**

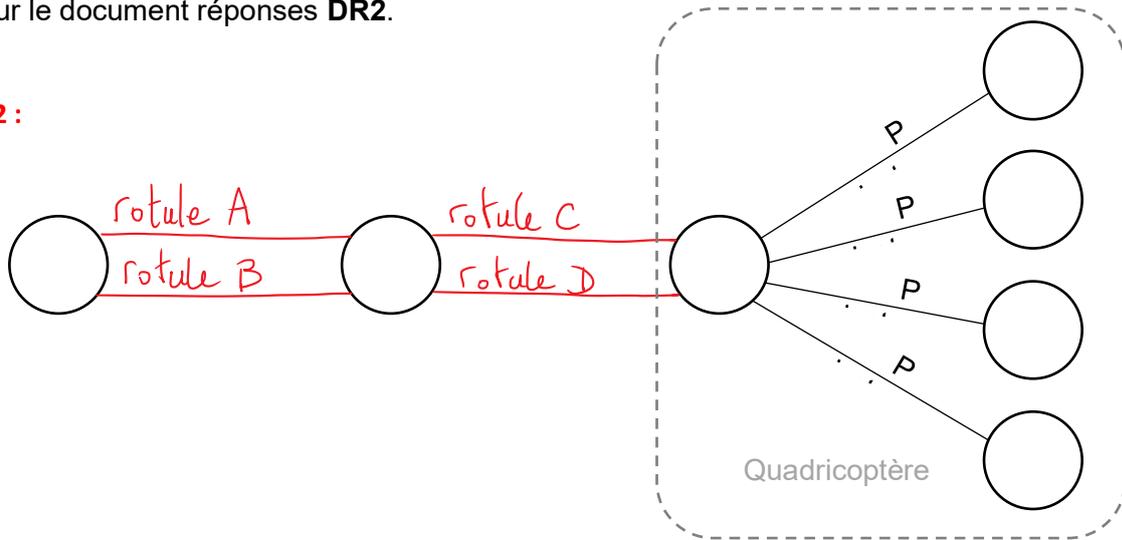
- Dans la position  $\alpha = 0, \beta = 0$ ,  $\alpha$  est piloté à l'aide du roulis et  $\beta$  à l'aide du tangage
- Dans la position  $\alpha = \frac{\pi}{2}, \beta = \frac{\pi}{2}$ ,  $\alpha$  est piloté à l'aide du lacet et  $\beta$  à l'aide du tangage

**Q22.** Au vu des deux questions précédentes, expliquer l'intérêt de la stratégie qui a été retenue pour le pilotage de l'orientation et de la propulsion du propulseur.

Cette stratégie permet d'avoir toujours la même force de propulsion  $F_p = 4F_0$  sur le POD, et donc de séparer la commande de force de propulsion de celle d'orientation de la poussée.

**Q23.** Représenter et donner le nom des liaisons entre le châssis 1, le balancier 2 et le quadricoptère 3 sur le document réponses **DR2**.

**DR2 :**



**Q24. a.** Déterminer le moment  $\overrightarrow{M}_{1 \rightarrow 2}(O_1)$  du torseur  $\{\tau_{1 \rightarrow 2}\}$ , et le moment  $\overrightarrow{M}'_{1 \rightarrow 2}(O_1)$  du torseur  $\{\tau'_{1 \rightarrow 2}\}$ , au point  $O_1$ .  
**b.** Écrire alors les deux torseurs  $\{\tau_{1 \rightarrow 2}\}$  et  $\{\tau'_{1 \rightarrow 2}\}$  au point  $O_1$ .

**a.** 
$$\overrightarrow{M}_{1 \rightarrow 2}(O_1) = \overrightarrow{M}_{1 \rightarrow 2}(A) + \overrightarrow{O_1 A} \wedge \overrightarrow{F}_{1 \rightarrow 2} = \vec{0} + \left(-\frac{e}{2} \vec{x}_1\right) \wedge (X_{12} \vec{x}_1 + Y_{12} \vec{y}_1 + Z_{12} \vec{z}_1) = -\frac{eY_{12}}{2} \vec{z}_1 + \frac{eZ_{12}}{2} \vec{y}_1$$

$$\overrightarrow{M}'_{1 \rightarrow 2}(O_1) = \overrightarrow{M}_{1 \rightarrow 2}(B) + \overrightarrow{O_1 B} \wedge \overrightarrow{F}'_{1 \rightarrow 2} = \vec{0} + \left(\frac{e}{2} \vec{x}_1\right) \wedge (X'_{12} \vec{x}_1 + Y'_{12} \vec{y}_1 + Z'_{12} \vec{z}_1) = \frac{eY'_{12}}{2} \vec{z}_1 - \frac{eZ'_{12}}{2} \vec{y}_1$$

**b.** 
$$\{\tau_{1 \rightarrow 2}\} = \begin{Bmatrix} X_{12} & 0 \\ Y_{12} & \frac{eZ_{12}}{2} \\ Z_{12} & -\frac{eY_{12}}{2} \end{Bmatrix}_{O_1, B_1} ; \{\tau'_{1 \rightarrow 2}\} = \begin{Bmatrix} X'_{12} & 0 \\ Y'_{12} & -\frac{eZ'_{12}}{2} \\ Z'_{12} & \frac{eY'_{12}}{2} \end{Bmatrix}_{O_1, B_1}$$
 (les écritures en ligne sont également

acceptées)

**Q25. a.** Au vu de la forme de ce torseur, identifier la liaison équivalente (donner la désignation précise) entre le châssis 1 et le balancier 2.

**b.** Sans mener de calcul (simplement par analogie), indiquer quelle est la liaison équivalente (donner la désignation précise) entre le balancier 2 et le quadricoptère 3 .

**a.** Il s'agit d'une liaison pivot, d'axe  $(O_1 \vec{x}_1)$

**b.** Par analogie, la liaison entre 2 et 3 est une liaison pivot, d'axe  $(O_1 \vec{y}_1)$

**Q26. a.** Au vu des deux liaisons identifiées en **Q26** et des notations introduites ci-dessus, donner l'expression des torseurs cinématique  $\{V_{1/2}\}$  et  $\{V_{2/3}\}$ .

**b.** À l'aide d'une composition des torseurs cinématiques, déterminer le torseur cinématique  $\{V_{3/1}\}$  de 3 par rapport au châssis 1.

**c.** Au vu de la forme de ce torseur cinématique, identifier la liaison équivalente entre 3 et 1.

a.  $\{V_{1/2}\} = \begin{Bmatrix} \Omega_{x,12} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{O_1, B_1}$  et  $\{V_{2/3}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ \Omega_{y,23} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{O_1, B_1}$  (Remarque : avec  $\Omega_{x,12} = \dot{\alpha}$  et  $\Omega_{y,23} = \dot{\beta}$ )

b. La composition s'écrit  $\{V_{3/1}\} = \{V_{3/2}\} + \{V_{2/1}\} = \begin{Bmatrix} \Omega_{x,12} & 0 \\ \Omega_{y,23} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{O_1, B_1}$

c. Au vu de la forme de ce torseur, la liaison équivalente entre 3 et 1 est une liaison rotule à doigt de centre  $O_1$  et de rotation bloquée selon  $\vec{z}_1$ .

**Q27.** Déterminer l'expression littérale du temps de vol  $\Delta t$  prévu par le cahier des charges, en fonction de  $V$  et de  $L$ . Faire l'application numérique en exprimant ce temps en secondes.

$\Delta t = \frac{2L}{V}$  (en aller-retour) = 11 500 s.

**Q28. a.** En supposant que les trois propulseurs consomment chacun la même puissance électrique  $P_{e \text{ prop}}$ , donner l'expression de cette puissance en fonction de  $P_{C \text{ moy}}$  et du rendement  $\eta_t$ . Faire l'application numérique.

**b.** Donner alors la valeur de la masse de la batterie  $M_{\text{bat}}$  à embarquer par propulseur pour assurer l'autonomie en temps de vol  $\Delta t$ .

**a** -  $P_{e \text{ prop}} = \frac{1}{3} \frac{P_{C \text{ moy}}}{\eta_t} = 780 \text{ W}$

**b** -  $\frac{\Delta E_{\text{bat}}}{\Delta t} = \frac{M_{\text{bat}} \kappa}{\Delta t} = P_{e \text{ prop}}$  donc  $M_{\text{bat}} = P_{e \text{ prop}} \frac{\Delta t}{\kappa} = 11 \text{ kg}$

**Q29. a.** À l'aide de la figure 14, en rappelant le sens physique d'une inertie, expliquer pourquoi il est cohérent d'avoir  $J_O < J_X$ .

**b.** À l'aide du tracé donné en document réponse **DR3**, déterminer de combien de pourcents l'inertie a été diminuée entre l'ancienne implantation  $J_X$  et la nouvelle  $J_O$ . Tous les tracés permettant de répondre doivent être apparents sur le **DR3**.

**a** - Une inertie traduit la répartition des masses excentrées par rapport à un axe de rotation ( Masse \* distance à l'axe au carré).

Or dans la répartition en «O» les masses sont plus ramassées proches du centre de rotation  $O_1$ , alors que dans la répartition en «X» la même masse est plus excentrée.

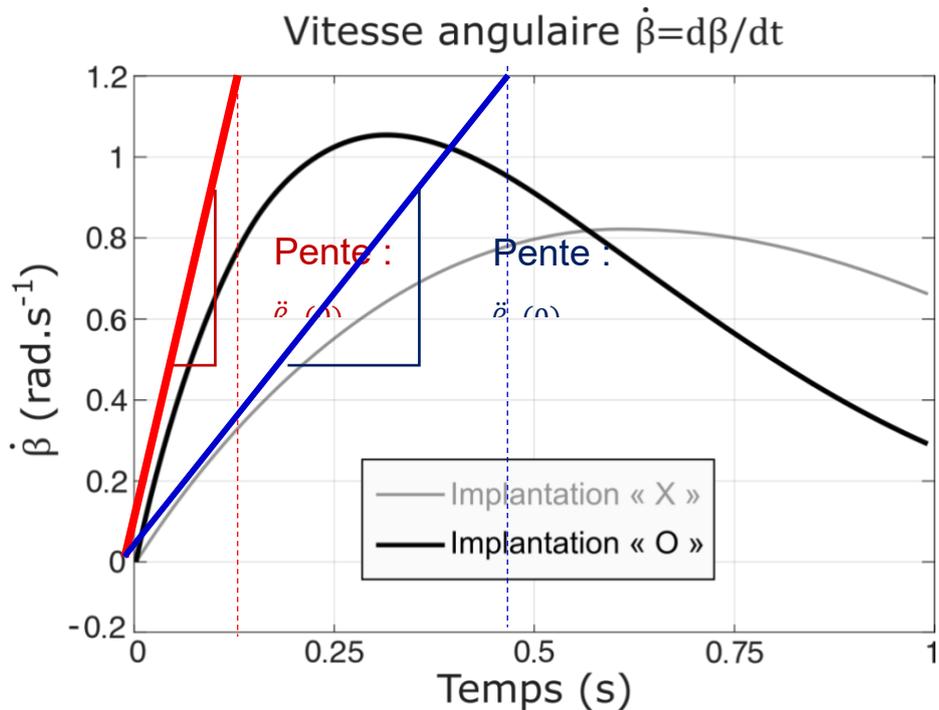
**b** - Le tracé de la vitesse angulaire est utilisé. Dans l'énoncé, le couple  $C_{\text{eq}}$  est maximal pour  $t \leq 0,25 \text{ s}$  et ceci ne dépend pas de l'implantation.

Avec les taux d'accroissements de la courbe des  $\dot{\beta}(t)$ , il est possible de relever environ :

$\ddot{\beta}_X(t \rightarrow 0) = \left( \frac{d\dot{\beta}}{dt} \right)_X \approx \frac{1.2-0}{0.15-0} = 8 \text{ rad. s}^{-2}$

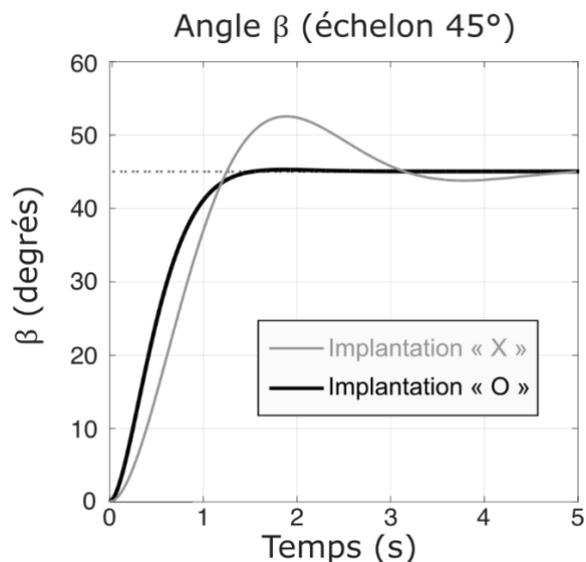
$\ddot{\beta}_O(t \rightarrow 0) = \left( \frac{d\dot{\beta}}{dt} \right)_O \approx \frac{1.2-0}{0.45-0} = 2.6 \text{ rad. s}^{-2}$

Cela induit donc une diminution relative de  $\frac{J_X - J_0}{J_X} = \frac{2}{3}$  soit 70% environ !



**Q30.** Vis-à-vis de l'asservissement en orientation, toujours d'après le tracé en **DR3**, indiquer en justifiant succinctement quelle(s) performance(s) semble(nt) essentiellement impacté(e)s par cette modification : précision, stabilité et/ou rapidité.

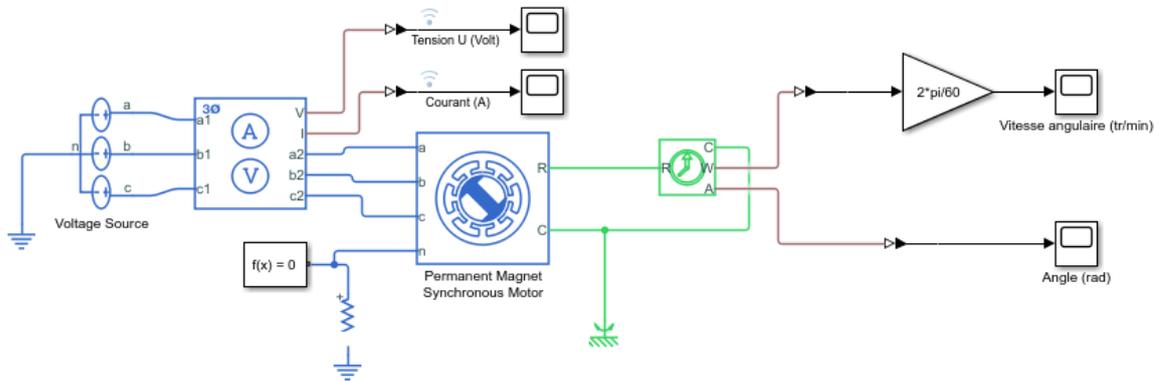
Sur le DR1, l'implantation en « X » a du dépassement (là où celle en « O » n'en a pas) : la stabilité est donc impactée. Le temps de réponse de l'implantation en « O » est plus court que celui de l'implantation « X » donc la rapidité est également impactée. L'implantation en « O » est plus rapide et plus stable. La précision n'est pas impactée par la modification d'inertie.



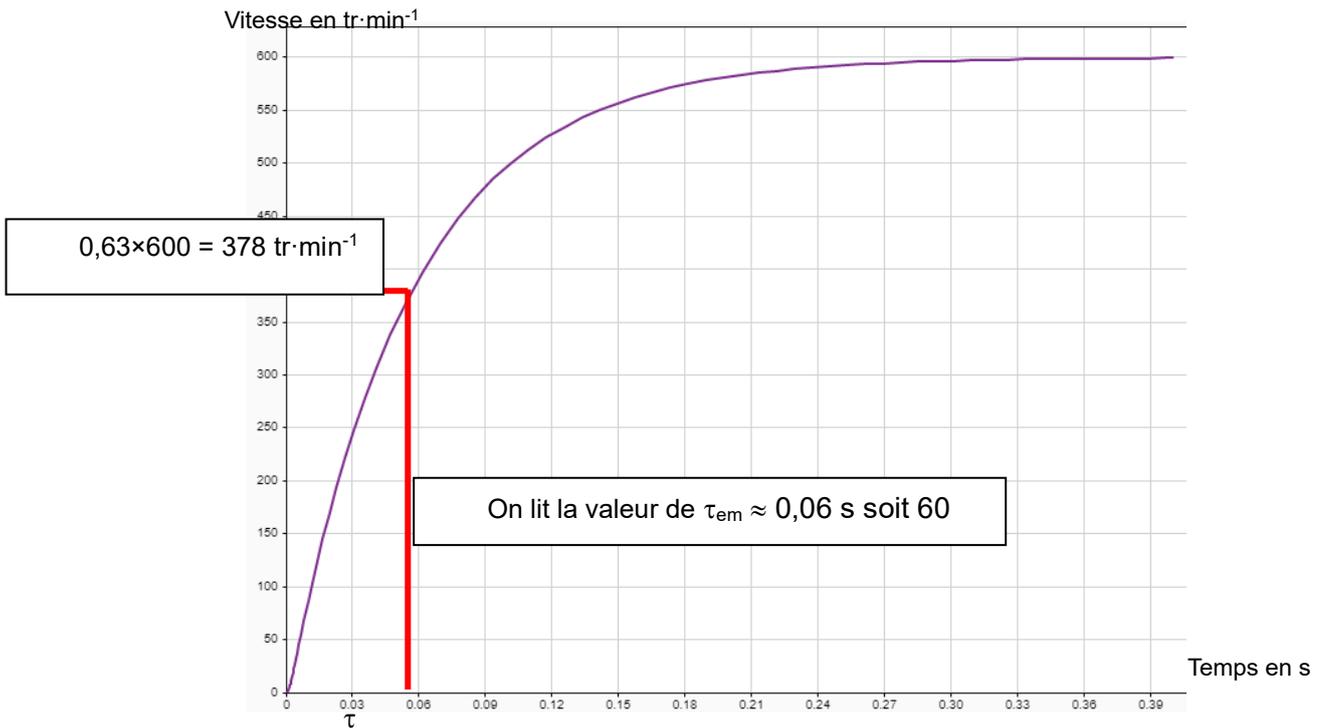
## D. Asservissement et pilotage d'un moteur synchrone alimenté par une batterie

**Q31.** Terminer les connexions du capteur de vitesse (Ideal Rotational Motion Sensor) de ce modèle afin d'acquérir l'évolution de la vitesse ainsi que la position angulaire du rotor.

*Réponse du DR4*



**Q32.** En considérant que cette réponse est assimilée à une réponse du 1er ordre, déterminer la valeur de la constante de temps électromécanique du moteur  $\tau_{em}$ .



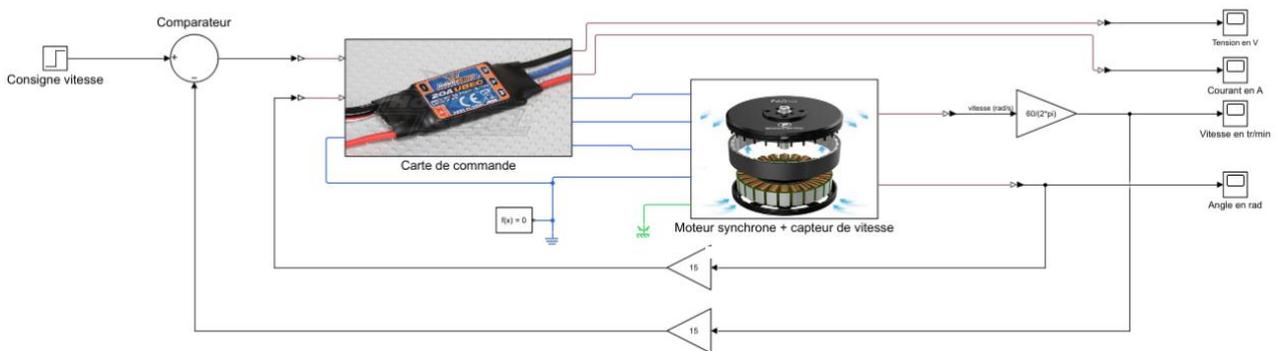
La valeur à lire de  $\tau_{em} \approx 0,06$  s soit 60 ms

**Q33.** Pour obtenir ce relevé, la tension de commande  $U_c(t) = 40$  V a été placée au niveau de l'entrée du modèle, en déduire la valeur du gain  $G$  de cette chaîne directe.

$$G = \frac{\Delta S}{\Delta E} = \frac{\Delta N}{\Delta U} = \frac{600}{40} = 15 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$$

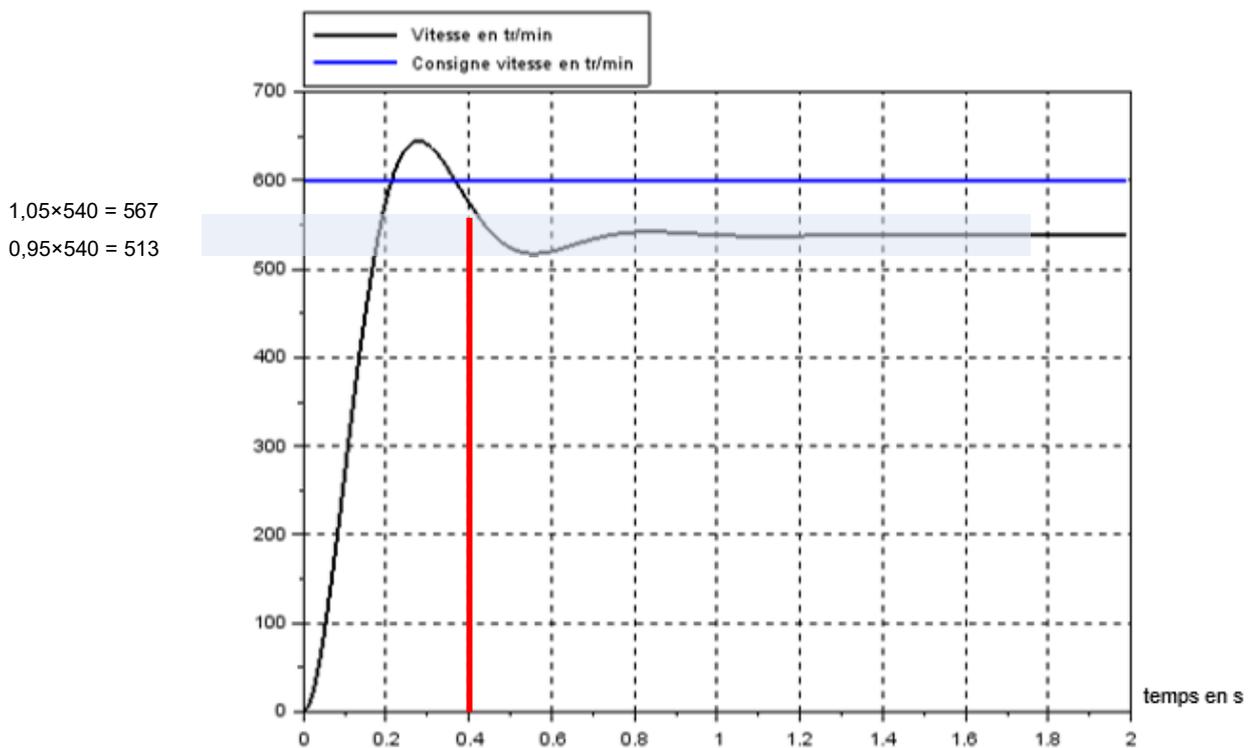
**Q34.** Faire les connexions sur le document réponse **DR5** afin de simuler cet asservissement en vitesse du moteur synchrone.

*Réponse du DR5*



**Q35.** Indiquer sur les relevés la valeur du temps de réponse à 5% pour chacun des essais (faire apparaître les tracés nécessaires).

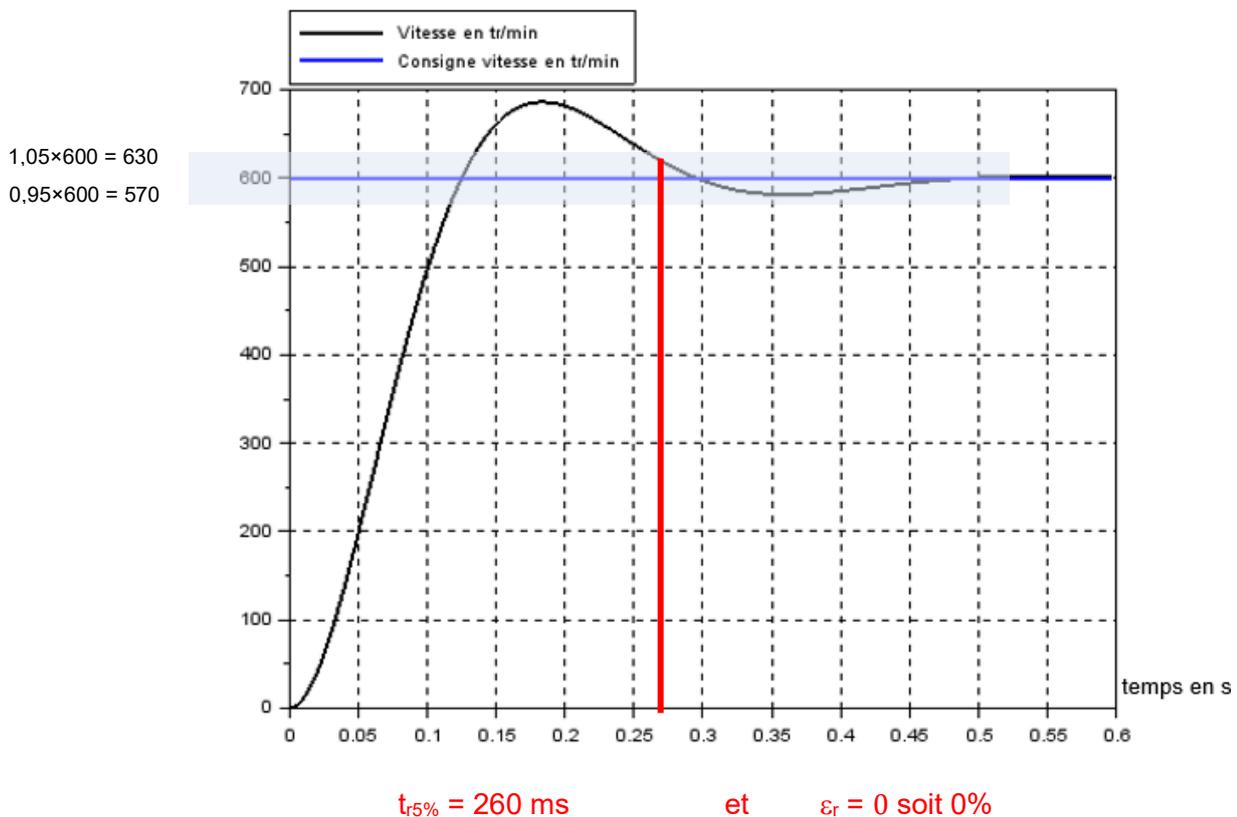
*Réponse du DR6*



1,05×540 = 567  
0,95×540 = 513

$t_{r5\%} = 420 \text{ ms}$

et  $\epsilon_r = \frac{600-540}{600} = 0,1$  soit 10%



**Q36.** Préciser ensuite la valeur de l'erreur statique relative  $\varepsilon_r$  en vitesse (exprimée en %).

*Voir document réponse du DR6*

**Q37.** Conclure sur le numéro de l'essai et donc du choix du correcteur qui satisfait aux contraintes imposées par le cahier des charges.

L'essai qui répond le mieux au cahier des charges de cette partie est l'essai n°2 pour lequel le temps de réponse  $t_{r5\%} = 260 \text{ ms}$  ( $< \text{à } 500\text{ms}$ ) et l'erreur statique est nulle (comme voulue).

**Q38.** Dans la chaîne de retour un bloc « mesure » a été placé, indiquer quelle solution technique permet de mesurer la vitesse de rotation d'un moteur.

Afin de mesurer la vitesse de rotation d'un moteur, il est possible d'utiliser :

- un capteur à effet Hall,
- un génératrice tachymétrique,
- un codeur incrémental ou absolu.

**Q39.** Préciser, sur la copie, en répétant le numéro concerné, les noms des grandeurs d'effort et des grandeurs de flux.

- |   |                     |                                                                   |
|---|---------------------|-------------------------------------------------------------------|
| ① | Grandeur d'effort : | $U_b$ (tension continue en V)                                     |
|   | Grandeur de flux :  | $I_b$ (courant continu en A)                                      |
| ② | Grandeur d'effort : | $U_v$ (tension alternative – MLI en V)                            |
|   | Grandeur de flux :  | $I_v$ (courant alternatif en A)                                   |
| ③ | Grandeur d'effort : | $\Omega_m$ (Vitesse angulaire en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |
|   | Grandeur de flux :  | $C_m$ (Couple en Nm)                                              |

**Q40.** Déterminer le nombre d'éléments à placer en série afin d'obtenir une tension à vide  $U_{\text{Bat0}} = 43,2 \text{ V}$ .  
 Chaque élément possède une tension de  $3,6 \text{ V}$ , il faut donc placer 12 éléments en série afin d'obtenir  $43,2 \text{ V}$ .

**Q41.** Donner la valeur de la capacité totale  $Q_{\text{tot1}}$  de l'association en série.

$Q_1 = I \times t$  donc comme les éléments sont montés en série ils sont parcourus par le même courant  $I$  donc le fait de placer 12 éléments en série ne modifie pas la capacité totale du module qui reste égale à  $Q_{\text{tot1}} = 4000 \text{ mAh}$ .

**Q42.** Utiliser la loi des nœuds et calculer la valeur de la capacité totale  $Q_{\text{tot}}$  de la batterie ainsi constituée (les éléments sont supposés tous identiques).

$$\begin{aligned} I_{\text{bat}} &= I_1 + I_2 + I_3 \\ \text{Donc} \quad I_{\text{bat}} \times t &= I_1 \times t + I_2 \times t + I_3 \times t \\ \text{Ainsi} \quad Q_{\text{tot}} &= Q_{\text{tot1}} + Q_{\text{tot1}} + Q_{\text{tot1}} = 3Q_{\text{tot1}} = 12000 \text{ mAH} \end{aligned}$$

**Q43.** D'une façon générale, indiquer comment augmenter l'autonomie d'un système et les limites de cette solution en ce qui concerne l'AérOnde.

D'après la question précédente, pour augmenter la capacité d'une batterie et donc son autonomie, il suffit de rajouter des modules en parallèle.

En ce qui concerne l'AérOnde, la masse embarquée va augmenter si plusieurs modules en parallèles sont rajoutés et cela risque de trop surcharger l'aéronef.

**Q44.** Déterminer précisément la valeur de la puissance consommée par l'ensemble (variateur, moteur, hélice) pour obtenir la force axiale par rotor.

$$\begin{aligned} \text{D'après la courbe de tendance} \quad & y = 0,0752x^2 + 5,6102x \\ \text{Donc} \quad & P = 0,0752F^2 + 5,6102F \\ \text{Ainsi} \quad & P = 0,0752 \times 22,5^2 + 5,6102 \times 22,5 \\ & P = 38,07 + 126,23 \\ & P = 164,3 \text{ W} \end{aligned}$$

**Q45.** Calculer la valeur du courant débité par la batterie lorsqu'un POD est actif.

$$P = U \times I_{\text{bat}} \text{ donc } I_{\text{bat}} = \frac{P}{U} = \frac{164,3}{43,2} = 3,8 \text{ A}$$

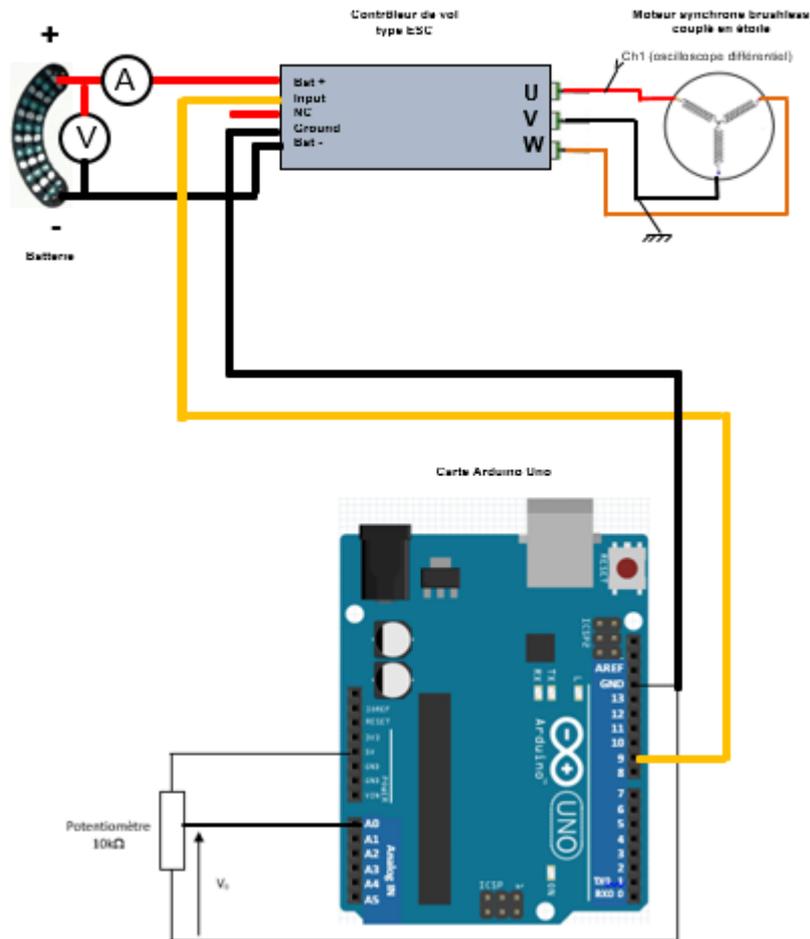
Remarque : certains candidats ont multiplié par 4 car il y a quatre rotors par POD, ils trouvaient alors en question suivante une autonomie quatre fois moindre. Ceci est cohérent et soulève une ambiguïté du sujet, les deux réponses ont été comptabilisées justes.

**Q46.** En déduire la valeur de l'autonomie  $\Delta t_0$  en heure : minute : seconde.

$$\begin{aligned} Q_{\text{tot}} &= I_{\text{bat}} \times t \\ \text{Ainsi} \quad \Delta t_0 &= \frac{Q_{\text{tot}}}{I_{\text{bat}}} = \frac{12}{3,8} = 3,158 \text{ h soit } 3 \text{ h} : 9 \text{ min} : 28 \text{ s} \end{aligned}$$

- Q47.** Expliquer pourquoi l'autonomie de l'AérOnde, en conditions de vol, sera différente.  
**Ce calcul est purement théorique et ne tient pas compte des conditions climatiques et en particulier le vent.**
- Q48.** Faire le raccordement, sur le *document réponse DR7*, des différents éléments afin d'actionner le moteur :
- Q49.** Placer, sur le *document réponse DR7*, les appareils de mesure.
- Q50.** Représenter les connexions de cet appareil de mesure sur le *même document réponse DR7*.

**Réponses DR7**



- Q51.** Donner la valeur de la commande en % pour avoir une vitesse de rotation des hélices de  $600 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$   
 $1 \cdot \frac{600}{3545} = 0,169$  donc  $600 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$  correspond à 16,9 % de la pleine vitesse.
- Q52.** Déterminer alors la durée à l'état haut de l'impulsion pour respecter cette valeur de vitesse.  
**Pour tourner à cette vitesse il faut donc régler une impulsion de 1,17 ms**
- Q53.** Choisir une entrée et finir le câblage de ce potentiomètre sur le schéma du *document réponse DR7*.

Voir document réponse DR7

**Q54.** Compléter le programme fourni dans *le document réponse DR8* afin que celui-ci corresponde au câblage et qu'il permette la lecture de la valeur issue du potentiomètre.

**Réponse DR8**

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);           // ouvre le port série

  pinMode(A0, INPUT);
}

void loop() {

  int val = analogRead(A0); // lit la valeur actuelle du potentiomètre

  Serial.println(val);

  delay(500);                 // attend 500 ms
}
```

**Q55.** Donner les valeurs décimales obtenues en sortie du CAN lorsque la tension d'entrée vaut 0V puis 5V et enfin 0,85V (tension correspondante au 600 tr·min<sup>-1</sup> souhaité).

Pour  $V_c = 0V$  la valeur décimale est  $N_{0V} = 0$

Pour  $V_c = 5V$  la valeur décimale est  $N_{5V} = 1023$

Pour  $V_c = 0,85V$  la valeur décimale est  $N_{0,85V} = 174$

**Q56.** Quel est donc le mot binaire lu pour cette dernière valeur de tension.

Le mot binaire est 00 1010 1110<sub>b</sub> donc correspondant à la valeur  $N_{0,85V} = 174$

**Q57.** Comment évolue la vitesse du moteur en fonction de la fréquence, conclure.

Cette courbe évolue linéairement, il est donc possible de conclure que la vitesse de rotation du moteur est proportionnelle à la fréquence de la tension d'alimentation de celui-ci :  $\Omega = \lambda F$  avec  $\lambda$  constante.

**Q58.** En déduire le nombre de pôle que comporte ce moteur.

$$p = \frac{\omega}{\Omega} = \frac{2\pi F}{\frac{2\pi N}{60}} = \frac{60F}{N} = \frac{60 \times (923,3 - 210)}{(2638 - 600)} = 21$$

Donc le nombre de pôle de la machine synchrone est de 42.

**Q59.** Conclure quant au respect de l'objectif fixé pour cette partie.

La vitesse d'un moteur synchrone évolue linéairement en fonction de la fréquence des tensions qui l'alimentent. Comme la tension de commande, réalisée par l'intermédiaire de la carte Arduino, est proportionnelle à la fréquence de la tension d'alimentation du moteur synchrone, il est possible de conclure en disant que la commande du moteur est bien linéaire.

## E. Analyse de la consommation énergétique en vol

**Q61.** a. Compléter les deux morceaux de code manquants dans la zone 1 du document réponse **DR8**, afin d'extraire les données utiles et d'en déterminer le nombre.

b. À l'intérieur de la boucle for, compléter les 5 morceaux de code manquants dans la zone 2 du **DR8**, afin de générer les listes LTps et Lpuiss telles que décrites ci-dessus.

Zone 1

```
Fichier_donnees = open("Donnees_vol.txt").readlines() # ouverture du fichier
# en lecture à l'issue de cette ligne, Fichier_donnees est une liste des
# lignes du fichier
Fichier_sans_entete = Fichier_donnees[5:] # à compléter pour extraire
# les données utiles

Nlignes = len(Fichier_sans_entete) # à compléter pour déterminer le
# nombre de lignes de données utiles
```

Zone 2

```
V0 = 48 # Volts, tension de la batterie
LTps = []
Lpuiss = []

for i in range(Nlignes): # les lignes de données utiles sont parcourues une à une
    Lignei = Fichier_sans_entete[i].split("\t") # on lit la ième ligne du
# fichier, et à l'issue de cette ligne, Lignei est une liste des textes
# contenus dans chacune des colonnes de données utiles

    Temps = int(Lignei[0]) # à compléter pour récupérer
# l'information de temps, et convertir le texte ainsi récupéré en valeur
# entière
    LTps.append(Temps)

    somme_ik = 0 # à compléter pour initialiser la somme

    for k in range(12):
        Imotk = float(Lignei[3*k+2]) # à compléter pour récupérer l'information de
# courant dans l'EDS/moteur k, et convertir le texte ainsi récupéré en nombre

    somme_ik = somme_ik + Imotk # à compléter pour
# calculer la somme des puissances consommées par l'ensemble des ESC/moteurs

    Lpuiss.append(somme_ik*V0) # à compléter pour insérer la puissance instantanée
```

**Q62.** Compléter alors les trois morceaux de code manquants dans la zone 3 du **DR8** pour cette fonction energie\_restante(E0, Temps, Puiss).

Zone 3

```
def energie_restante(E0, Temps, Puiss): # Energie initiale, liste de temps, # liste
des puissances consommées

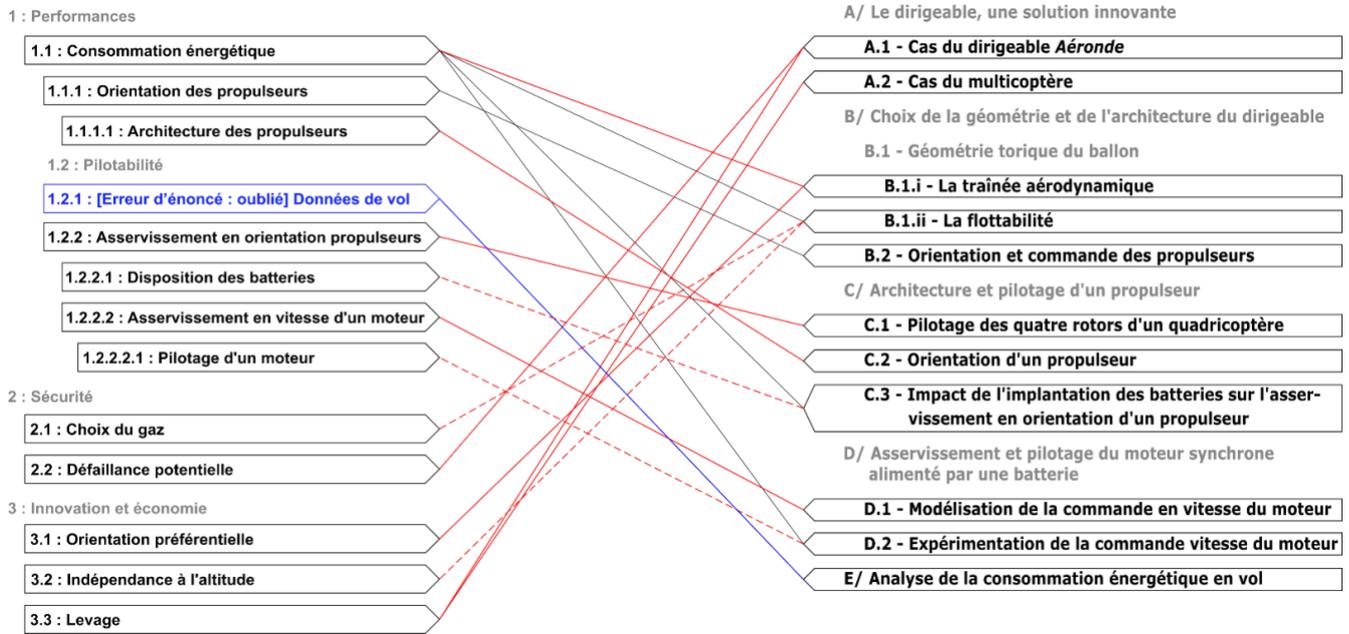
    Er = [E0] # à compléter, liste des énergies restantes, à initialiser avec E0
    for k in range(1, len(Temps)): # puis, pour chaque instant sauf t0
# l'instant initial
         $\delta E = \text{Puiss}[k] * (\text{Temps}[k] - \text{Temps}[k-1])$ 
# à compléter : énergie consommée entre  $t_{i-1}$  et  $t_i$ 

        Er.append(Er[-1] -  $\delta E$ ) # à compléter : mettre à jour la liste des
# énergies restantes
    return Er # la liste, qui compte autant d'éléments que la liste Temps, est renvoyée
```

**Q63.** Donner les deux lignes à écrire (l'une fait appel à la fonction `energie_restante(...)`, et l'autre à la fonction `plt.plot(...)` de la bibliothèque *Matplotlib*, permettant de tracer l'évolution de l'énergie stockée dans la batterie en fonction du temps.

```
NRJ = energie_restante(1.8e6, LTPs, Lpuiss) # ou 1.8*10**6 ou 1800000000
plt.plot(LTPs, NRJ)
plt.show() # pas compté faux si absent, il n'était demandé que deux lignes.
```

**Q64.** Sur le document réponse **DR9**, relier chacune des exigences encadrées restantes à une ou plusieurs sous-parties encadrées correspondantes.



Légende :

- Les traits continus rouge sont les réponses attendues. Les traits continus noirs étaient donnés. Le trait continu bleu compte comme un rouge, il n'était pas donné.
- Les traits discontinus rouge sont bienvenues (bonus) mais pas obligatoires
- L'exigence 1.2.1, en lien avec la partie E du sujet, avait été omise dans le document réponse.

Pour faciliter la lecture et la correction, voici une autre présentation :

	EXIGENCE CDC CORRESPONDANTE
<b>A/ Le dirigeable, une solution innovante</b>	
A.1 - Cas du dirigeable <i>Aéronde</i>	2.2, 3.3
A.2 - Cas du multicoptère	3.3
<b>B/ Choix de la géométrie et de l'architecture du dirigeable</b>	
B.1 - Géométrie torique du ballon	
B.1.i - La traînée aérodynamique	3.1, 1.1
B.1.ii - La flottabilité	2.1, 3.2
B.2 - Orientation et commande des propulseurs	1.1.1
<b>C/ Architecture et pilotage d'un propulseur</b>	
C.1 - Pilotage des quatre rotors d'un quadricoptère	1.2.2
C.2 - Orientation d'un propulseur	1.1.1.1
C.3 - Impact de l'implantation des batteries sur l'asservissement en orientation d'un propulseur	(1.1), 1.2.2.1, (1.2.2)
<b>D/ Mise en œuvre du moteur synchrone</b>	
D.1 - Modélisation de la commande en vitesse moteur	1.2.2.2
D.2 - Expérimentation de la commande en vitesse	1.2.2.2.1, 1.1
<b>E/ Analyse de la consommation énergétique en vol</b>	1.2.1