

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

SÉRIE SCIENTIFIQUE

ÉPREUVE DE SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

Session 2016

Durée de l'épreuve : 4 heures

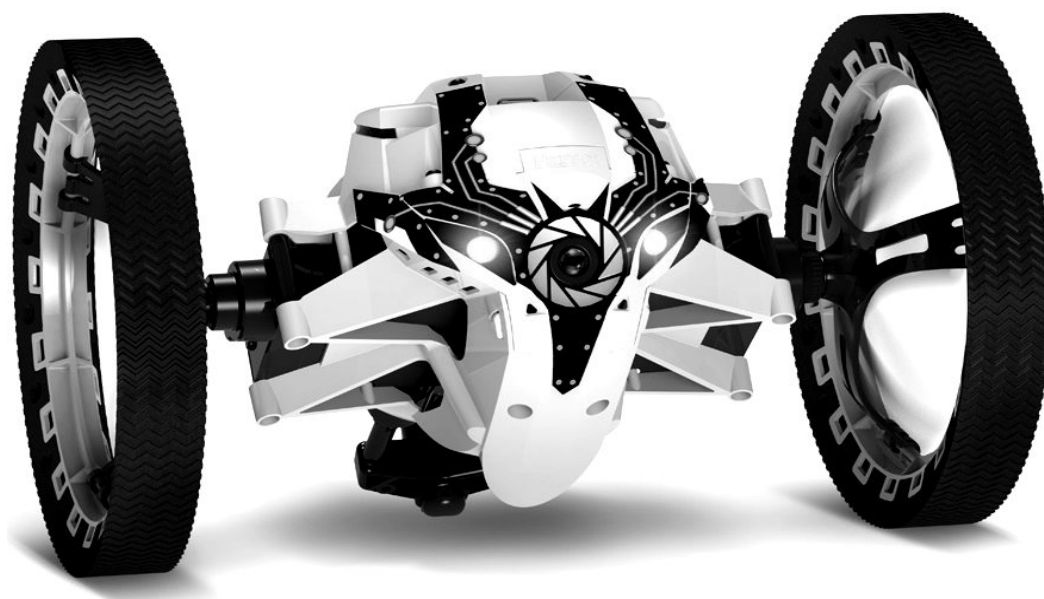
Coefficient 4,5 pour les candidats ayant choisi un enseignement de spécialité autre que sciences de l'ingénieur.

Coefficient 6 pour les candidats ayant choisi l'enseignement de sciences de l'ingénieur comme enseignement de spécialité.

Aucun document autorisé.

Calculatrice autorisée, conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

DRONE TERRESTRE



Constitution du sujet

- 1 Texte.....Page 3
- 2 Documents réponses.....Page 17

Le sujet comporte 27 questions.

**Les documents réponses DR1 et DR2 sont à rendre
avec les copies.**

1. Présentation générale

Le système étudié est un drone terrestre capable de rouler et de sauter. Le roulement est assuré par deux roues actionnées indépendamment l'une de l'autre grâce à deux moteurs à courant continu. Le saut est actionné par un sabot mobile propulsant le drone lors de sa détente. Ce sabot est préchargé à l'aide d'un troisième moteur à courant continu dédié.

Ces différents constituants sont identifiés sur la figure 1 lorsque le drone est posé au sol.

L'utilisateur commande les mouvements à l'aide d'une application exécutée sur tablette, smartphone ou PC relié au drone par l'intermédiaire d'une liaison Wi-Fi (de l'anglais Wireless Fidelity). À l'écran, l'application affiche en temps réel la vidéo issue de la caméra du drone et la charge de la batterie.

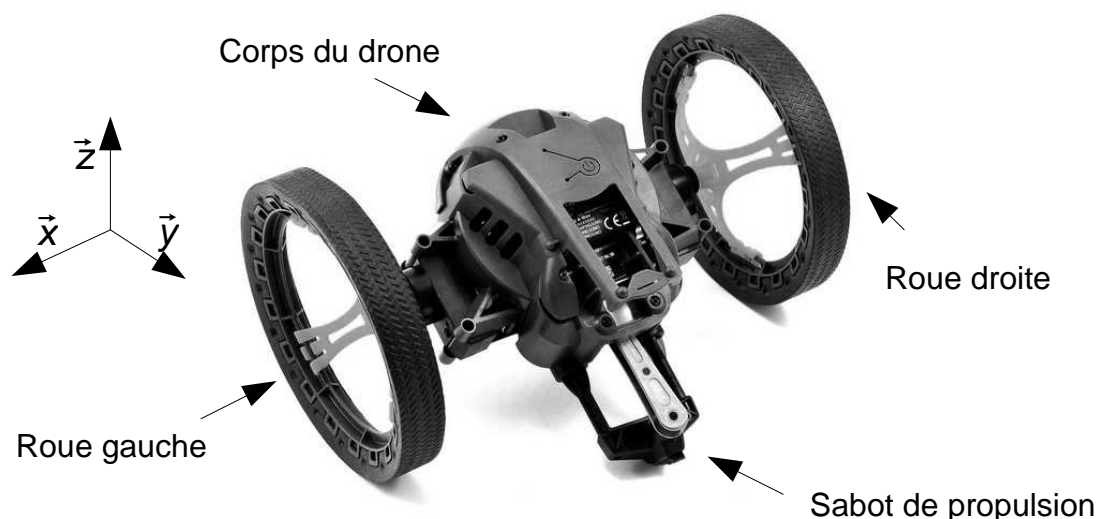


Figure 1 : vue de trois-quart arrière du drone

Dans la suite de l'étude, on se place dans un repère lié au sol défini de la façon suivante :

- l'axe \vec{x} est défini comme l'axe de rotation des deux roues, orienté de la roue droite vers la roue gauche ;
- l'axe \vec{z} est le vecteur normal à la surface sur laquelle repose le drone.

Les principales caractéristiques techniques et commerciales sont décrites dans le tableau de la figure 2. L'objectif du constructeur est de réaliser un drone ludique, réactif, économique et terrestre piloté facilement par l'utilisateur et pouvant franchir, en sautant, des obstacles de 80 cm.

masse totale	180 g
connectivité	Wi-Fi 2,4 ou 5 GHz (portée 50 m)
autonomie	15 minutes
saut	hauteur = 60 cm ; longueur = 80 cm
batterie	lithium-polymère (LiPO) $V_{nom} = 3,7$ V capacité = 550 mA·h
vidéo	caméra HD 15 images par seconde en 640x480 pixels
tenue de cap	gyroscope et accéléromètre 3 axes

Figure 2 : principales caractéristiques techniques et commerciales

L'actionnement du saut nécessite plusieurs phases successives schématisées sur la figure 3 :

- la phase 1 est utilisée lors des phases d'initialisation et de déplacement en roulement du drone à l'aide des deux moteurs dédiés ;
- la phase 2 prépare le saut et interdit tout autre déplacement en roulement. Le troisième moteur comprime les ressorts liant le corps du drone au sabot et le corps du drone s'incline en conséquence ;
- la phase 3 consiste en la libération brutale des ressorts préalablement comprimés. Ils se détendent en propulsant le corps du drone par rapport au sabot, supposé en appui sur le sol ;
- la phase 4 est obtenue lorsque les ressorts sont revenus à leur longueur maximale fixée par une butée mécanique. À partir de cet instant, l'ensemble du drone effectue un saut.

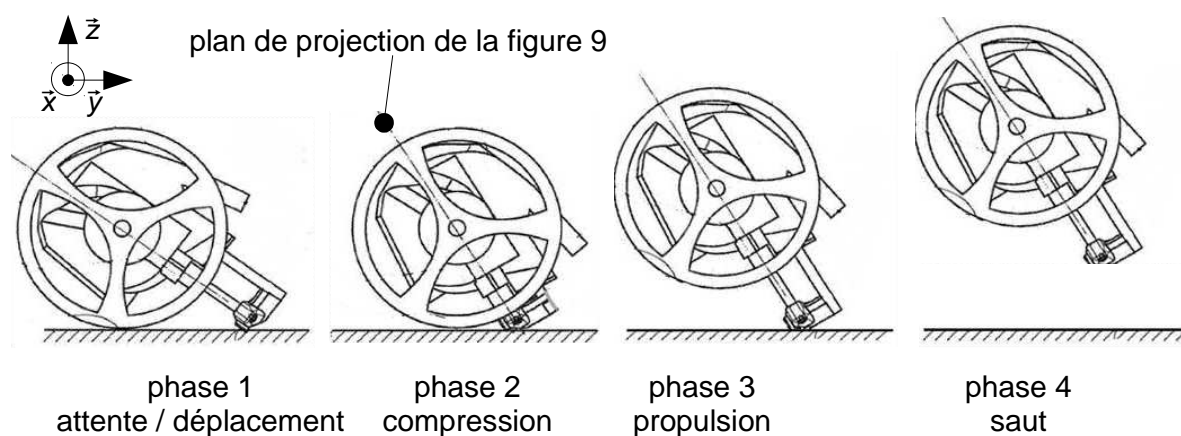


Figure 3 : phases d'un saut (extrait d'un brevet déposé le 14-10-2014)

Dans la suite de ce sujet, les caractéristiques nominales du saut du drone (phase 4) seront étudiées afin de dimensionner les ressorts stockant l'énergie utilisée pour accélérer le drone (phase 3). Le chargement préalable (phase 2) met en œuvre une chaîne d'énergie dont le rendement peut alors être déterminé en fonction du service rendu. Seront également étudiés le fonctionnement général du drone notamment sa partie commande et son autonomie énergétique.

2. Communication avec le drone

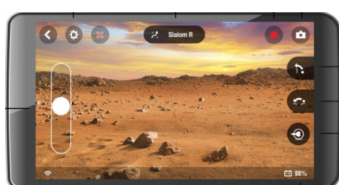
Objectif(s) de cette partie : vérifier la possibilité de communication entre la tablette et le drone. Analyser les données échangées et une partie du protocole de communication entre le drone et l'application sur tablette.

Pour commander le drone, il est indispensable que celui-ci communique avec la tablette. Cette communication est réalisée à l'aide d'un protocole applicatif construit au dessus des protocoles UDP (Protocole de Datagramme Utilisateur) / IP (Protocole Internet) avec une liaison physique de type Wi-Fi.

Q1. À partir de la description donnée du système, inventorier les différents actionneurs et capteurs du drone.

Les principales caractéristiques de cette liaison réseau sont résumées sur la figure 4.

Application sur tablette



Adresse IP = 192.168.2.1
Masque = 255.255.255.0
Port = 5556 (en base 10)

Drone



Adresse IP = 192.168.2.2
Masque = 255.255.255.0
Port = 5556 (en base 10)

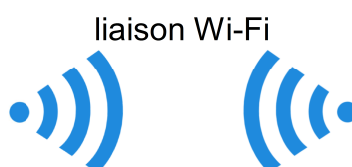


Figure 4 : paramètres de la liaison Wi-Fi

La communication se modélise en couches. Elles sont communément définies par le « modèle OSI » (de l'anglais Open Systems Interconnection) :

- la couche 3 est le protocole IP (Protocole Internet) acheminant les messages émis par un expéditeur vers un destinataire. Il utilise pour cela les adresses IP identifiant de manière unique les éléments connectés à un réseau ;
- la couche 4 est le protocole UDP (Protocole de Datagramme Utilisateur) permettant la transmission de données de manière très simple entre deux applications. Pour réaliser l'identification des applications, le protocole UDP utilise un numéro de port sous la forme d'un entier non signé sur 16 bits. Les données de l'application sont préfixées par huit octets d'en-tête selon l'ordre et le format décrit dans le tableau de la figure 5 ;
- la couche 7 est constituée d'un protocole applicatif. L'application transmet les commandes de l'utilisateur sous la forme de chaînes de caractères et affiche la vidéo et les informations du drone. Les commandes envoyées par l'application vers le drone sont appelées « commandes AT », appellation liée au fait que ces deux caractères ASCII « AT » sont toujours présents en début de message. Chaque ligne

de commande se termine par un caractère de saut de ligne, noté <LF> (correspondant à l'octet transmis $(0A)_{16}$ en hexadécimal). Plusieurs commandes permettent la gestion complète du drone. Par exemple la commande « AT*JMP<LF> » déclenche le saut du drone et la commande « AT*BAT<LF> » demande au drone de renvoyer l'état de charge de sa batterie.

Octet	Contenu
1	Port de l'expéditeur (octet de poids fort)
2	Port de l'expéditeur (octet de poids faible)
3	Port de destination (octet de poids fort)
4	Port de destination (octet de poids faible)
5	Nombre d'octets de la commande (octet de poids fort)
6	Nombre d'octets de la commande (octet de poids faible)
7	Somme de contrôle (ici toujours à 0)
8	Somme de contrôle (ici toujours à 0)
Octets suivants	Octets de la commande émise par l'application

Figure 5 : octets d'une trame UDP (en-tête UDP et commande de l'application)

Rappel : un caractère ASCII est codé sur un octet.

Q2. Déterminer le nombre d'octets nécessaires pour coder l'information commande de saut, puis **compléter** dans le tableau du DR1 la valeur des octets 1 à 8 de l'entête UDP.

Q3. À partir des adresses IP et des masques de sous-réseau utilisés dans la liaison, **vérifier** que la communication entre le drone et la tablette est possible.

3. Étude du saut

Objectif(s) de cette partie : **contrôler** le respect des caractéristiques techniques liées au saut, en **étudiant** la phase de chute libre (phase 4), en **dimensionnant** les ressorts de propulsion et en **analysant** le comportement dynamique de la propulsion (phase 3).

Dans la phase de saut (phase 4), le drone se comporte comme une masse ponctuelle projetée avec une vitesse initiale non nulle dans un champ de pesanteur. Si on néglige les frottements du drone dans l'air, la trajectoire de celui-ci est de type parabolique (figure 6) formée d'une phase ascendante puis d'une phase descendante.

Les équations suivantes donnent respectivement la longueur ΔY et la hauteur ΔZ du saut en fonction de la vitesse initiale du drone \vec{V} en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et de l'angle α de propulsion du drone dans le repère lié au sol $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

L'accélération de pesanteur est $\vec{g} = -g \times \vec{z}$ avec $g \approx 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

$$\Delta Y = \frac{\|\vec{V}\|^2 \cdot \sin(2\alpha)}{g} \quad \text{et} \quad \Delta Z = \frac{\|\vec{V}\|^2 \cdot \sin^2(\alpha)}{2g}$$

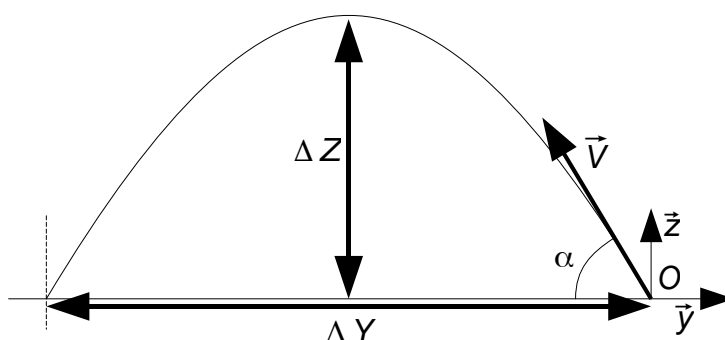


Figure 6 : caractéristiques géométriques du saut

Q4. Déterminer l'angle α permettant de maximiser la longueur du saut. **Évaluer** le rapport $\Delta Z / \Delta Y$ dans cette condition et **en déduire** les conséquences de ce choix vis-à-vis de la hauteur franchie.

Le fabricant a choisi un angle $\alpha = 61^\circ$ afin d'avoir un bon compromis entre le franchissement en longueur et en hauteur.

Q5. Évaluer, dans cette situation imposée, la vitesse initiale la plus petite permettant de satisfaire les caractéristiques techniques pour un saut. **Déterminer** l'énergie cinétique, notée E_c , du drone au début de la phase 4.

Par la suite, la vitesse initiale du drone sera supposée égale à $\|\vec{V}\| = 3,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Au cours de l'accélération (phase 3), l'énergie potentielle préalablement stockée dans un ressort est transformée en énergie cinétique du drone. On rappelle que l'énergie potentielle stockée dans un ressort de longueur L est de la forme suivante :

$$E_R = \frac{K}{2} \cdot (L - L_0)^2$$

Les caractéristiques géométriques L_{min} , L_{max} et L_0 sont fixées par le mécanisme et correspondent respectivement à :

- la longueur minimale du ressort comprimé $L_{min} = 50$ mm en début de phase 3,
- la longueur maximale du ressort détendu $L_{max} = 75$ mm en fin de phase 3,
- la longueur d'un ressort à vide $L_0 = 98$ mm.

Le système de propulsion est vu comme un ressort de raideur équivalente K_E .

Q6. Appliquer le principe de conservation de l'énergie entre le début et la fin de la phase 3 en négligeant la pesanteur. **Déterminer** la raideur équivalente K_E permettant de stocker l'énergie nécessaire à la propulsion du drone.

Pour la suite du sujet, la raideur équivalente retenue est $K_E = 1\,400 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. Le système réel est composé de deux ressorts identiques en parallèle de raideur unitaire K_R reliant le sabot au corps du drone.

Q7. Indiquer, en justifiant, la raideur des deux ressorts K_R en fonction de K_E .

Au début de la phase 3 de propulsion, les ressorts se détendent et les roues ne sont plus au contact du sol. Le drone passe d'un état statique à un état dynamique au cours duquel le corps du drone est accéléré par les ressorts (figure 7).

On note $(S, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ le repère Galiléen lié au sol. Le point G est le centre de gravité du corps du drone. Les points R et S désignent les deux extrémités des ressorts projetés sur le plan (G, \vec{y}, \vec{z}) . Le sabot du drone sera considéré comme lié au « sol 0 » pendant la phase 3 de la figure 3.

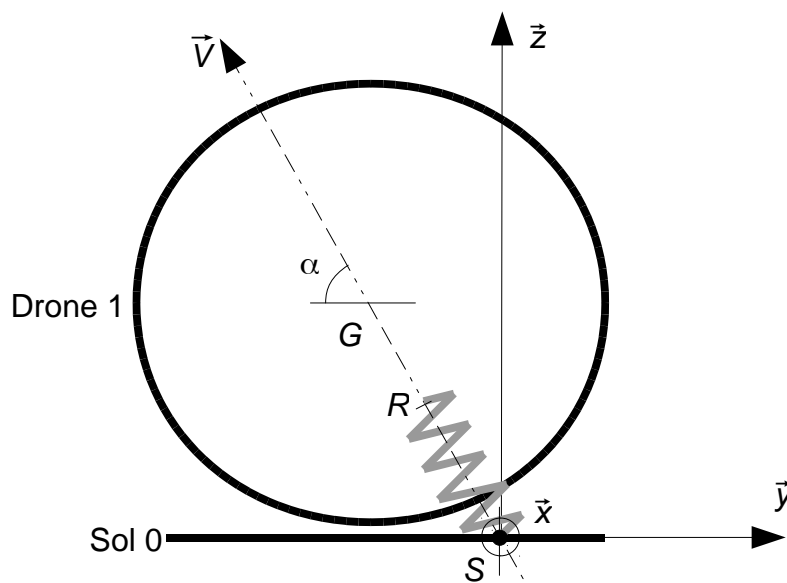


Figure 7 : schématisation géométrique du drone au début du saut

On note:

- m la masse du corps du drone (assimilée à la masse totale du drone) ;
- \vec{P} est le poids du drone appliqué à son centre de gravité G ;
- \vec{F} est la force exercée par les ressorts sur le corps du drone à leur extrémité R ;
- $\vec{\Gamma}$ est l'accélération du centre de gravité G .

Q8. Écrire le principe fondamental de la dynamique appliqué au corps du drone.

Q9. Indiquer la direction de la force exercée par les ressorts dans le plan (G, \vec{y}, \vec{z}) .
Tracer sur le document réponse DR1 les allures des vecteurs \vec{P} , \vec{F} et $\vec{\Gamma}$.

Q10. Sans calcul, **justifier** la nécessité que les trois points G , R et S soient alignés pour éviter la rotation en G .

On rappelle l'accélération de pesanteur $g \approx 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ et $\alpha = 61^\circ$. Les ressorts ont une longueur à vide $L_0 = 98 \text{ mm}$, une longueur minimale compressée $L_{min} = 50 \text{ mm}$ et une raideur équivalente $K_E = 1\,400 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$.

Q11. Exprimer les composantes de \vec{P} et de \vec{F} dans le repère $(G, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ en fonction de K_E , L_0 , g , m , α et RS (distance entre les points R et S).

Q12. Calculer l'accélération $\vec{\Gamma}$ au départ du saut. **En déduire** si l'action de la pesanteur peut être négligée pendant cette phase d'accélération.

Le sabot reste au contact avec le sol tant que la distance entre les points R et S est inférieure à la longueur maximale notée $L_{max} = 75$ mm. Les ressorts sont par conséquent toujours contraints et ne peuvent se détendre au-delà de cette dimension.

La figure 8 représente le tracé temporel de la vitesse du point G au cours de la phase 3.

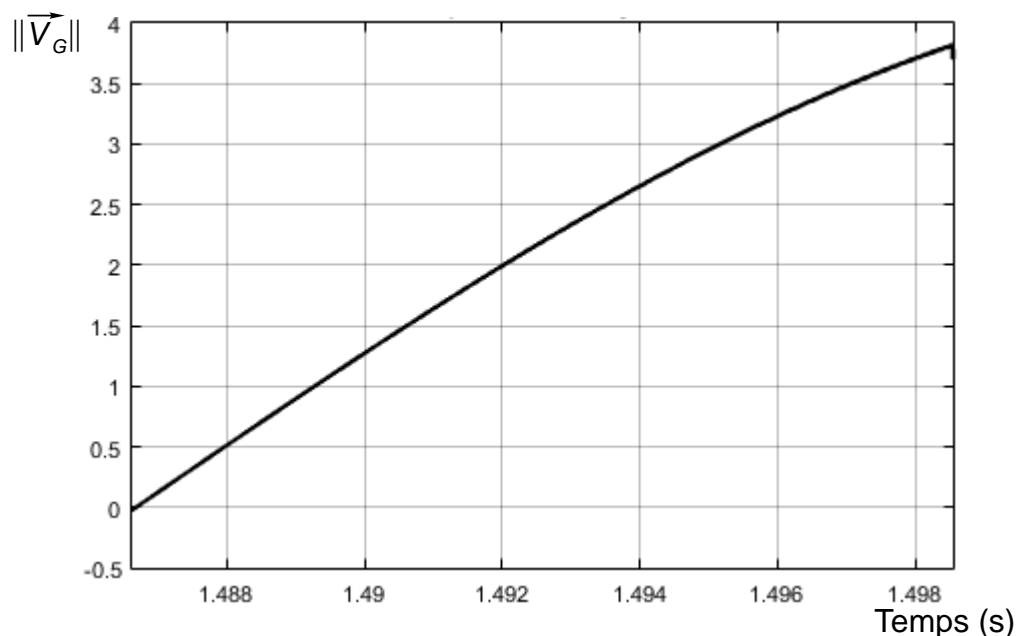


Figure 8 : simulation de la norme de la vitesse (en m·s⁻¹) du point G au cours du temps

Q13. À partir de la figure 8 et sans calcul, **préciser** si le solide « drone 1 » est uniformément accéléré pendant cette phase de mise en mouvement.

Q14. **Comparer** cette vitesse, obtenue par un logiciel de simulation, à la vitesse nécessaire au respect de la longueur des sauts. **Conclure** sur le respect des caractéristiques de saut du drone.

4. Étude de la phase de compression du saut

Objectif(s) de cette partie : vérifier l'efficacité énergétique de la solution, modéliser le fonctionnement de la chaîne d'énergie actionnant le sabot (phase 2).

Après réception d'une commande de saut par la liaison Wi-Fi, le moteur à courant continu associé au sabot de propulsion est alimenté. Il entraîne un réducteur de rapport $n=1/316$ dont la sortie met en rotation la came représentée en figure 9 dans le sens horaire. Cette came entraîne la biellette reliée au sabot. Le mouvement en translation du sabot comprime les ressorts liés au corps du drone (phase 2).

La figure 9 représente les parties mécaniques transformant le mouvement de rotation du moteur en mouvement de translation des ressorts ainsi que le schéma cinématique associé. Cette figure 9 utilise le plan de projection identifié dans la figure 3.

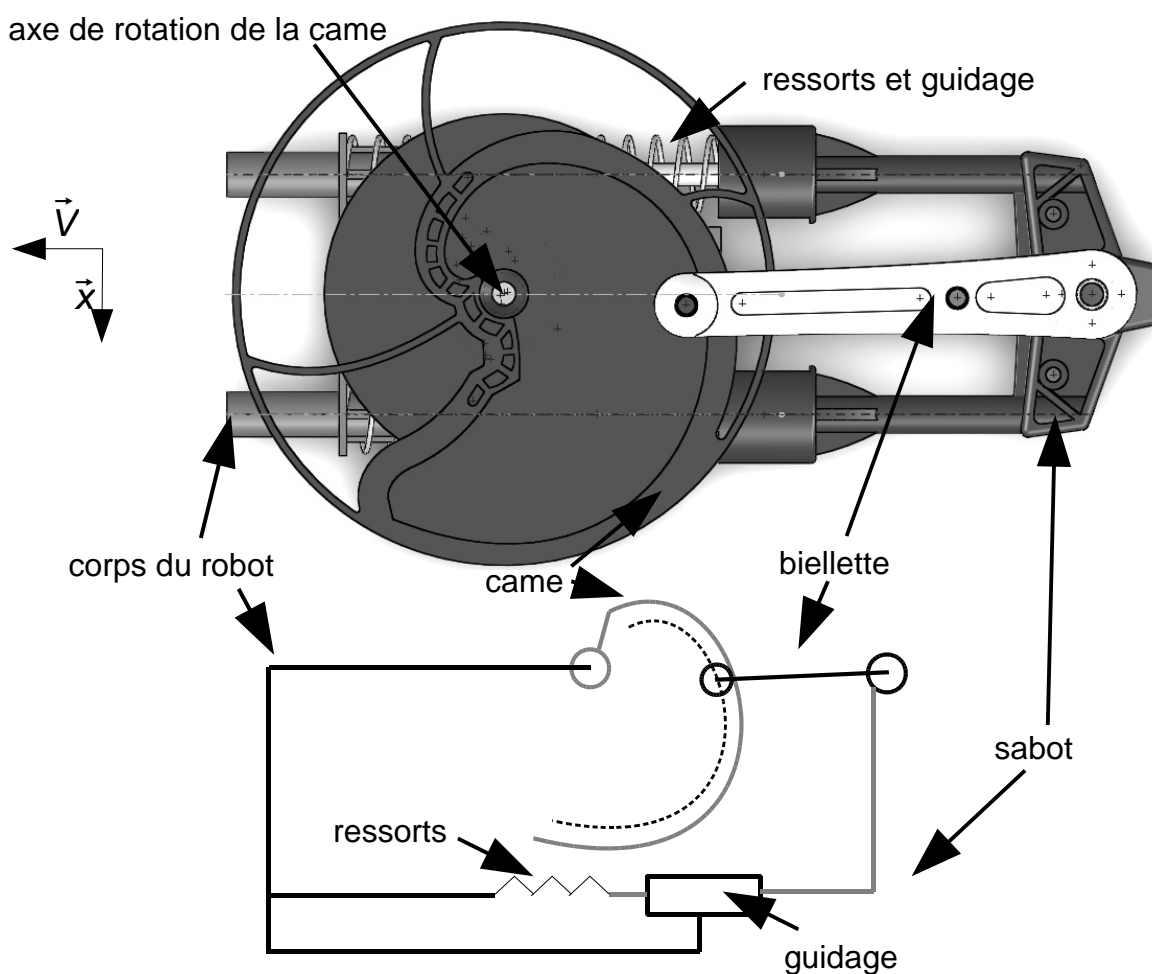


Figure 9 : mécanisme et schéma cinématique du sabot de propulsion

La forme de la came permet la transformation du mouvement de rotation de la came en un mouvement de translation du sabot de telle manière qu'il existe une relation linéaire entre la longueur du ressort et l'angle de rotation de la came.

Les variables suivantes seront utilisées dans la modélisation du système :

- Ω_M est la vitesse de rotation du moteur, en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;
- Ω_C est la vitesse de rotation de la came, en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;
- C_M est le couple fourni par le moteur, en $\text{N}\cdot\text{m}$;
- C_C est le couple fourni par le moteur ramené à la came, en $\text{N}\cdot\text{m}$;
- U est la tension d'alimentation du moteur, en V ;
- I est le courant consommé par le moteur, en A .

Le modèle multi-physique de la chaîne d'énergie du sabot de propulsion est représenté sur le document réponse DR1. Les constituants de la chaîne d'énergie sont reliés entre eux au niveau des connecteurs par des liens de puissance.

Q15. Compléter sur le document réponse DR1 le modèle multi-physique en indiquant pour chaque connecteur les grandeurs flux (**f**) et effort (**e**) et entre parenthèses leurs unités respectives en système international.

En régime permanent, le moteur à courant continu peut être modélisé par le schéma électrique de la figure 10 avec R la résistance modélisant le bobinage du moteur (ici $R = 0,15 \ \Omega$) et E est la force électromotrice du moteur, en V .

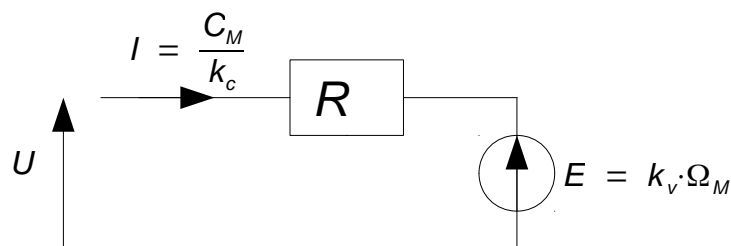


Figure 10 : schéma électrique équivalent du moteur en régime permanent

Les constantes de conversion électromécanique $k_v = 4,3 \times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}$ et $k_c = 4,3 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$ lient respectivement la force électromotrice E à la vitesse de rotation Ω_M et le couple de la machine C_M au courant absorbé I .

Q16. Exprimer le couple fourni par le moteur C_M en fonction de la vitesse de rotation Ω_M , de la tension d'alimentation U , de la résistance R et des constantes de conversion électromécaniques k_c et k_v .

Expérimentalement, le moteur est alimenté avec une tension $U = 3,7$ V. Un temps $t_c = 1,7$ s est nécessaire à la came pour réaliser le demi-tour nécessaire à la compression du ressort (phase 2).

Q17. À partir de ces mesures sur le système, **exprimer** la vitesse de rotation du moteur Ω_M . Le fabricant indique un couple maximal de $C_{Mmax} = 35$ mN·m, **vérifier** le respect de ce critère.

Le modèle multi-physique du document réponse DR1 est simulé pour calculer la longueur du ressort et la puissance consommée par le moteur en fonction du temps. Les résultats sont tracés en figure 11 ; les phases désignées correspondent à la description des phases de la figure 3.

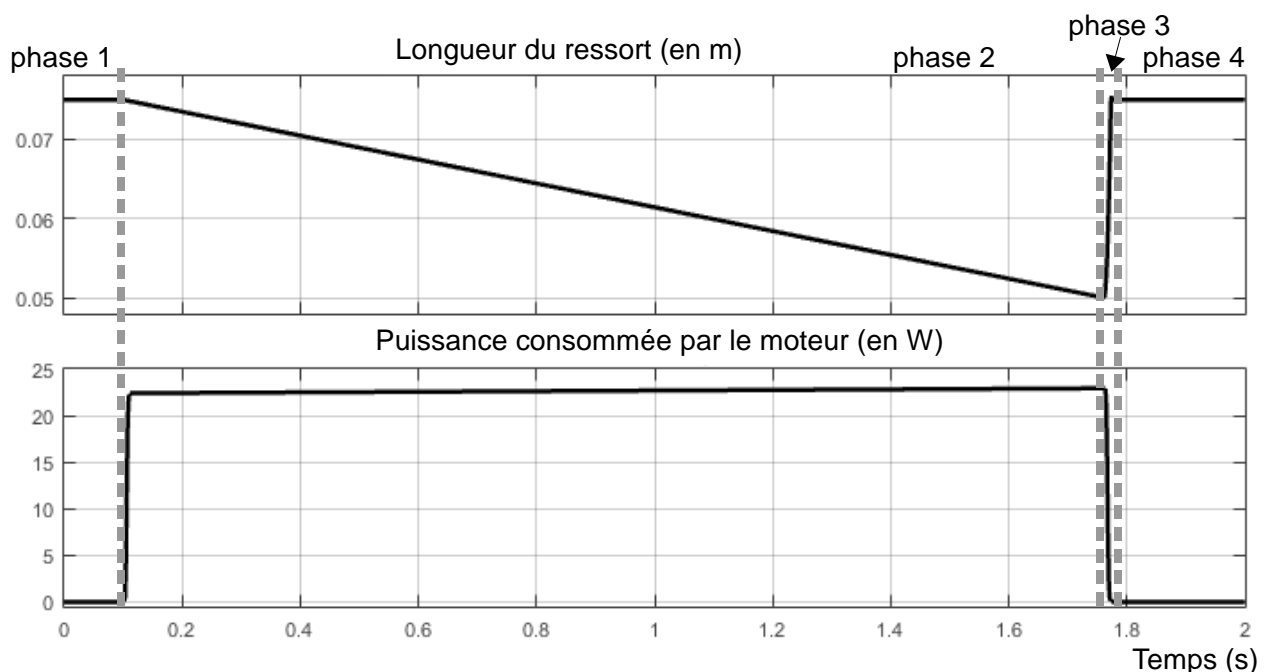


Figure 11: simulation de la longueur du ressort et de la puissance consommée par le moteur

Q18. À partir de cette simulation en phase 2 et en précisant la méthode employée, **évaluer** l'énergie électrique E_E consommée pendant la phase de compression des ressorts.

Q19. **Calculer** l'erreur en % entre les valeurs mesurées et simulées de l'énergie électrique consommée. **Conclure** sur la validité du modèle.

La propulsion du drone requiert une énergie mécanique de 1,4 J, des relevés expérimentaux font état d'une consommation énergétique de 34 J par le moteur de compression.

Q20. À partir du résultat de la question Q18, **déterminer** le rendement énergétique du saut du drone. **Conclure** sur l'efficacité de la solution retenue.

5. Étude de la consommation énergétique du drone

Objectif(s) de cette partie : **déterminer** l'autonomie énergétique et **analyser** l'influence des sauts sur l'autonomie énergétique du drone.

Structurellement, le drone peut être décomposé en plusieurs postes de consommation :

- la commande toujours active, dont la consommation est supposée constante au cours du temps ;
- le module radio Wi-Fi dont la consommation est maximale pendant la phase de connexion et peut ensuite être négligée ;
- le moteur de compression des ressorts alimenté uniquement avant un saut ;
- les moteurs d'avance commandés uniquement lors des déplacements du drone.

La figure 12 présente un relevé expérimental de l'intensité consommée lors des différentes actions du drone, notamment pendant un saut.

courant consommé (A)

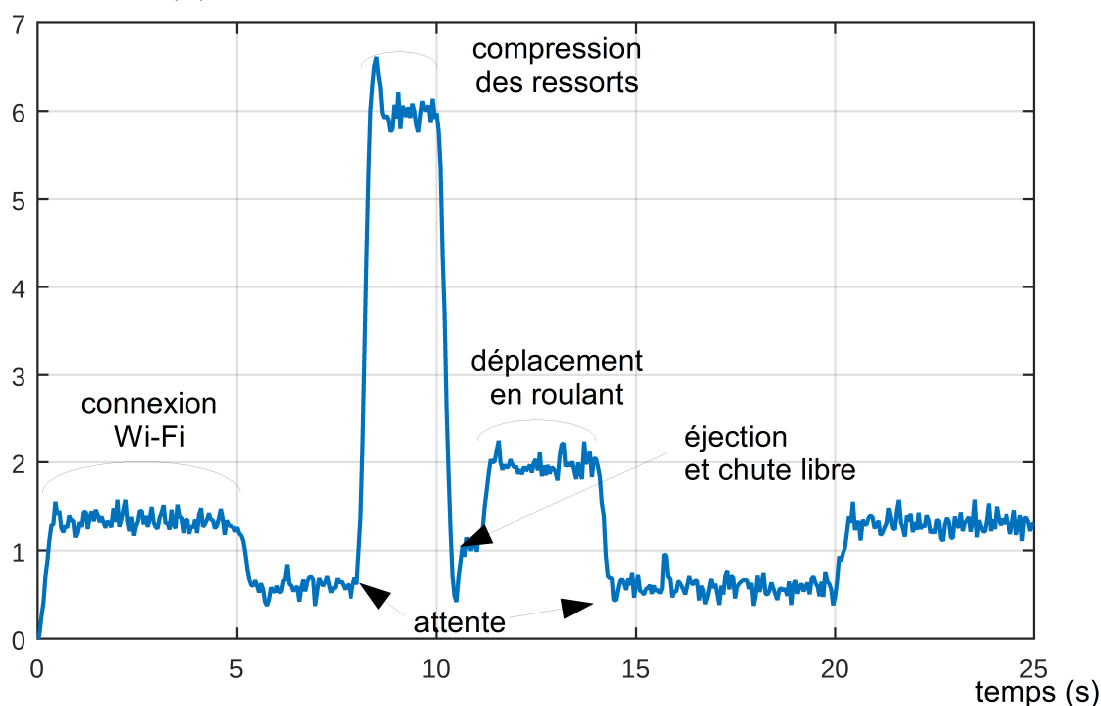


Figure 12 : courant consommé au cours d'un cycle de fonctionnement

Les caractéristiques nominales de la batterie sont indiquées dans le tableau de la figure 2.

Q21. Après avoir déterminé les modules actifs à chaque phase, **évaluer** à partir des données de la figure 12 la puissance consommée par le système de commande, par la connexion wifi, par le moteur de compression des ressorts et par les moteurs d'avance.

Q22. **Calculer** l'autonomie du drone (en s) pour un fonctionnement uniquement constitué de déplacements au sol par roulement.

Q23. **Calculer** l'énergie nécessaire à la réalisation d'un saut. Si on néglige la durée de vol, en **déduire** le nombre maximal de sauts qu'il est possible de faire sans roulement au sol.

Q24. **Conclure** quand à l'autonomie annoncée par le constructeur.

6. Fiabilisation du drone pour résister aux contraintes du saut

Objectif(s) de cette partie : **réduire** les risques de casse mécanique au décollage du drone.

Lors d'un saut au départ de la main de l'utilisateur et non du sol, la came se casse lors de l'arrivée en butée mécanique des ressorts du sabot de propulsion. Lors de ces essais destructeurs, le sabot de propulsion n'étant pas en appui sur un sol stable, toute l'énergie potentielle stockée dans les ressorts est alors dissipée au niveau du contact entre le galet et la came servant également de butée mécanique.

Une conception plus résistante mécaniquement n'est pas acceptable économiquement. Le constructeur a donc implanté une sécurité programmée en utilisant les capteurs existants (accéléromètres et gyroscopes 3 axes). Il s'agit de vérifier si le drone est parfaitement immobile avant le déclenchement du saut.

L'accéléromètre 3 axes renvoie chaque accélération selon les directions \vec{x} , \vec{y} et \vec{z} sous la forme d'un nombre entier sur 16 bits codé en complément à 2. La figure 13 illustre les valeurs numériques en fonction de l'accélération mesurée.



Figure 13 : correspondance entre les accélérations mesurées et les nombres envoyés par l'accéléromètre avec $g \approx 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Dans les conditions souhaitées pour le saut, la seule accélération visible par l'accéléromètre est la pesanteur, se décomposant sous la forme d'une constante exprimée dans le repère local de l'accéléromètre :

$$\vec{P} = 0 \times g \times \vec{x} + 0 \times g \times \vec{y} - 1 \times g \times \vec{z}$$

Le fabricant de l'accéléromètre indique une tolérance dans la valeur renvoyée égale à $\pm 3\%$ de la pleine échelle (toute valeur mesurée est donc précise à $\pm 0,12 \times g \approx \pm 1,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). L'algorithme de protection doit prendre en compte cette précision du capteur afin de fonctionner dans tous les cas et pour tous les drones fabriqués.

Le programme embarqué sur le drone définit les variables suivantes :

- ressort_comprime = 0 tant que le ressort n'est pas complètement comprimé ;
- position_stable = 0 tant que les valeurs des accéléromètres ne sont pas correctes ;
- fin_compression = 1 à la fin de la compression des ressorts ;
- drone_au_sol = 1 lorsque le drone est positionné sur une surface ;
- accel_Xout est la valeur de l'accéléromètre retournée pour l'axe \vec{x} ;
- accel_Yout est la valeur de l'accéléromètre retournée pour l'axe \vec{y} ;
- accel_Zout est la valeur de l'accéléromètre retournée pour l'axe \vec{z} .

Q25. Déterminer dans quels intervalles de valeurs numériques les variables accel_Xout, accel_Yout, accel_Zout doivent être comprises pour que la position du drone puisse être considérée comme stable (drone_au_sol = 1).

Q26. Compléter l'algorithme du document réponse DR2 pour valider la position stable du drone à partir des données renvoyées par l'accéléromètre.

7. Synthèse

Q27. Conclure quant à la capacité du drone à respecter ses caractéristiques techniques. **Analyser** les contraintes particulières liées à la conception et au fonctionnement d'un drone capable de réaliser des sauts.

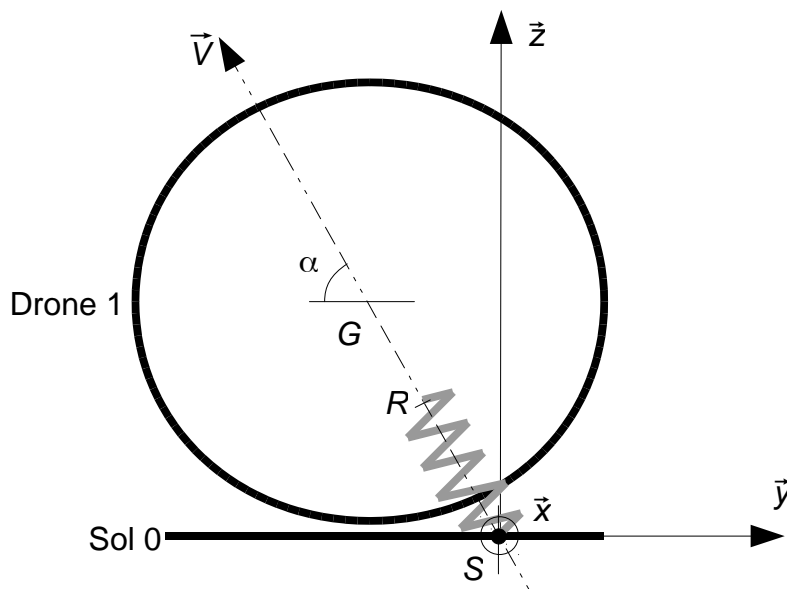
Documents réponses

Document réponse DR1.

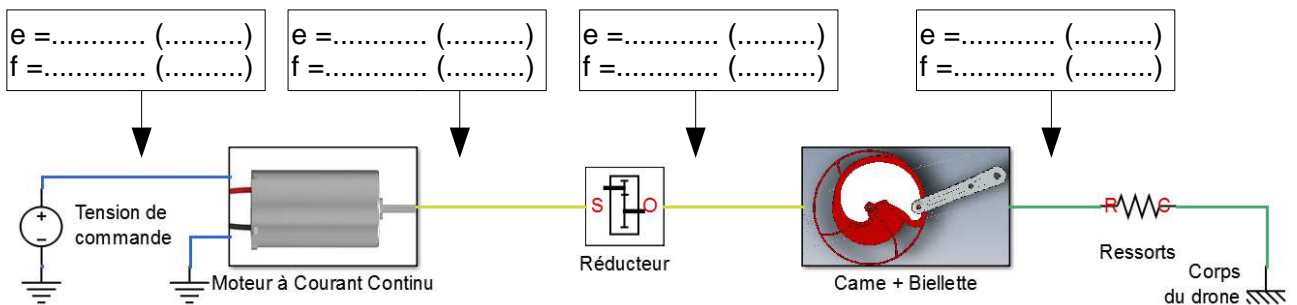
Q2.

extrait du contenu d'une trame Ethernet													
Groupe	en-tête IP	en-tête UDP								données application			
Octet	précédents	1	2	3	4	5	6	7	8	suivants			
Contenu (hexa)	...									41 (caractère ASCII 'A')	54 (caractère ASCII 'T')	2A (caractère ASCII '!')	...

Q9.



Q15.



Document réponse DR2.

Q26.

Algorithme de gestion du saut en hauteur :

```
ressort_comprime = 0
DEMARRER comprimer ressort
TANT QUE ressort_comprime = 0 FAIRE
  SI (fin_compression = 1) ALORS
    ARRETER comprimer ressort
    ressort_comprime = 1
  FIN SI
FIN TANT QUE
position_stable = 0
TANT QUE position_stable = 0 FAIRE
```

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

```
FIN TANT QUE
drone_au_sol = 1
SAUTER
TANT QUE drone_au_sol = 0 FAIRE
FIN TANT QUE
```