

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL
SÉRIE SCIENTIFIQUE
ÉPREUVE DE SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

Session 2016

Corrigé

Le drone terrestre

1. Présentation du drone :

2. Communication avec le drone :

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

Actionneurs : Moteurs de roues droite et gauche ; système de saut.

Capteurs : Caméra vidéo; gyroscope / accéléromètre.

Q2. Déterminer le nombre d'octets nécessaire 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.

La commande de saut correspond au message suivant « AT*JMP<LF> »

composé de 6 caractères (A ; T ; * ; J ; M ; P) plus le caractère de saut de ligne <LF> ce qui fait 7 caractères à envoyer. Chaque caractère étant codé sur un octet, le nombre d'octets à envoyer est de 7.

L'entête UDP est composée des octets suivants:

- octets 1 et 2: port de l'expéditeur 5556 en décimal ; 15 B4 en hexadécimal.
- octets 3 et 4: port de destination 5556 en décimal; 15 B4 en hexadécimal.
- octets 5 et 6: nombre d'octets du message de l'application 7 en décimal; 00 07 en hexadécimal.
- octets 7 et 8: somme de contrôle, ici 0 ; 0000 en hexadécimal.

Le tableau suivant donne la valeur hexadécimale attendue pour ces 8 octets :

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)	...	15	B4	15	B4	00	07	00	00	41 (caractère ASCII 'A')	54 (caractère ASCII 'T')	2A (caractère ASCII '*')	...

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.

Afin de pouvoir communiquer la tablette et le drone doivent appartenir au même réseau. Le masque de sous réseau associé à une opération logique de type ET permet de répondre à cette question :

- pour la tablette 192.168.2.1 ET 255.255.255.0 donne comme sous-réseau 192.168.2.0
- pour le drone 192.168.2.2 ET 255.255.255.0 donne comme sous-réseau 192.168.2.0

Les deux éléments appartiennent au même sous-réseau et peuvent donc communiquer.

3. Étude 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.

Pour avoir la longueur maximale de saut à une vitesse de propulsion donnée, il faut que $\sin(2\alpha)$ soit maximum, donc égal à 1 pour $\alpha = 45^\circ$.

Dans ce cas, on peut calculer $\Delta Y = \frac{\|\vec{V}\|^2 \cdot \sin(2\alpha)}{g} = \frac{\|\vec{V}\|^2 \cdot \sin(2 \times 45)}{9,81} = 0,102 \times \|\vec{V}\|^2$ et

$$\Delta Z = \frac{\|\vec{V}\|^2 \cdot \sin^2(\alpha)}{2g} = \frac{\|\vec{V}\|^2 \cdot \sin^2(45)}{2 \times 9,81} = 0,0255 \times \|\vec{V}\|^2$$

A vitesse initiale donnée, la hauteur franchie sera très petite devant la longueur parcourue ($\frac{\Delta Z}{\Delta Y} = 0,25$).

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.

Pour un angle $\alpha = 61^\circ$, le rapport $\Delta Z/\Delta Y = \frac{\sin^2(61)}{2 \times \sin(2 \times 61)} = 0,451$. La hauteur sautée sera moitié moins importante que la longueur parcourue. Par conséquent ΔZ est donc le paramètre dimensionnant.

Pour un saut $\Delta Z = 0,6$ m, on obtient $\|\vec{V}\|^2 = \frac{2 \times g \times \Delta Z}{\sin^2(\alpha)}$ et finalement :

$$\|\vec{V}\| = \sqrt{\frac{2 \times g \times \Delta Z}{\sin^2(\alpha)}} = \sqrt{\frac{2 \times 9,81 \times 0,6}{\sin^2(61)}} \approx 3,92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Dans ces conditions, la longueur parcourue est $\Delta Y = \frac{\|\vec{V}\|^2 \cdot \sin(2\alpha)}{g} \approx \frac{3,91^2 \times \sin(2 \times 61)}{9,81} \approx 1,33 \text{ m}$ ce qui permet également de respecter le cahier des charges.

L'énergie cinétique du drone au début du saut est donc :

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \|\vec{V}\|^2 \approx \frac{1}{2} \times 0,18 \times 3,92^2 \approx 1,38 \text{ J}$$

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.

En appliquant le principe de conservation de l'énergie aux instants « début » (D) et « fin » (F) de la phase 3, on obtient :

$$E_{C,t=D} + E_{R,t=D} = E_{C,t=F} + E_{R,t=F}$$

Le drone est à l'arrêt au début de la phase 3, donc :

$$E_{C,t=D} = 0$$

$$E_{R,t=D} = \frac{K_E}{2} \cdot (L_{min} - L_0)^2$$

$$E_{R,t=F} = \frac{K_E}{2} \cdot (L_{max} - L_0)^2$$

$$E_{C,t=F} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \|\vec{V}\|^2$$

Il est déjà établi que $E_{C,t=F} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \|\vec{V}\|^2 = 1,38 \text{ J}$

Qui peut s'écrire :

$$K_E = \frac{m \cdot \|\vec{V}\|^2}{(L_{min} - L_0)^2 - (L_{max} - L_0)^2} \approx \frac{2 \times 1,38}{(0,05 - 0,098)^2 - (0,075 - 0,098)^2} \approx 1\,550 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

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

Chaque ressort appliquera une force $F_R = K_R \cdot (L - L_0)$.

L'ensemble des deux ressorts appliquera donc une force équivalente :

$$F_E = 2 \cdot F_R = 2 \cdot K_R \cdot (L - L_0) = K_E \cdot (L - L_0)$$

Par identification $K_R = \frac{K_E}{2} = \frac{1400}{2} \approx 700 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

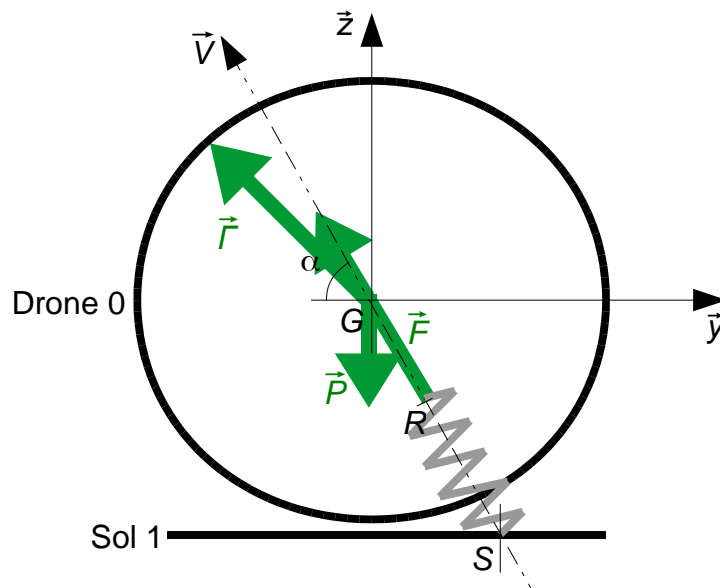
Q8. Écrire le principe fondamental de la dynamique appliqué au corps du drone.

$$\vec{P} + \vec{F} = m \cdot \vec{\Gamma}(G, 1/0)$$

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 $\vec{\Gamma}$.

Les points R et S sont les points d'applications des efforts des ressorts et G le centre de gravité du drone. Les efforts de poussée des ressorts ont pour direction (RS) .



Q10. Sans calcul, justifier l'alignement géométrique des trois points G , R et S pour éviter la rotation en G .

Si la droite RS ne passe pas par le centre de gravité G , il y aura géométriquement un bras de levier transformant la force de poussée en couple de rotation.

Il faut donc que les trois points soient alignés pour éviter ce phénomène parasite.

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).

La masse du corps du drone est 180 g (tableau de la figure 2).

$$\vec{P} = -g \cdot m \cdot \vec{z} = -9,81 \times 0,18 \times \vec{z} = -1,77 \times \vec{z}$$

Les ressorts appliquent une force : $\|\vec{F}\| = K_E \times (L_0 - |RS|)$

$$\vec{F} = -K_E \times (L_0 - |RS|) \times \cos(61) \times \vec{y} + K_E \times (L_0 - |RS|) \times \sin(61) \times \vec{z}$$

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

A l'instant initial, les ressorts sont comprimés à leur longueur L_{min} , la force appliquée est donc :

$$\vec{F} = -K_E \times (L_0 - L_{min}) \times \cos(61) \times \vec{y} + K_E \times (L_0 - L_{min}) \times \sin(61) \times \vec{z}$$

$$\vec{F} = -67,2 \times \cos(61) \times \vec{y} + 67,2 \times \sin(61) \times \vec{z} = -32,6 \times \vec{y} + 58,8 \times \vec{z}$$

On en déduit l'équation de l'accélération à l'instant initial :

$$\vec{f} = \frac{\vec{F} + \vec{P}}{m} = \frac{-32,6 \times \vec{y} + (58,8 - 1,77) \times \vec{z}}{0,18} = 181 \times \vec{y} - 317 \times \vec{z}$$

Ces accélérations sont bien supérieures à la pesanteur s'appliquant sur le corps du drone ($\vec{P} = -1,77 \times \vec{z}$), celui-ci décolle donc très rapidement. Il est accéléré globalement colinéairement avec l'axe RS (l'action de la pesanteur peut donc être négligée).

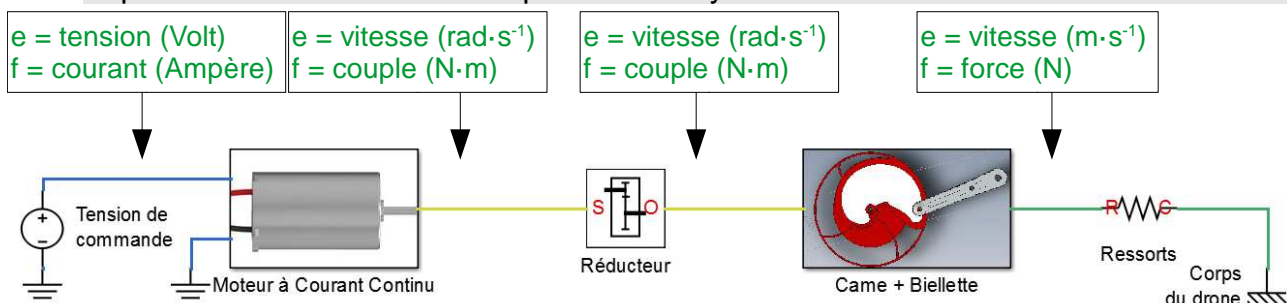
Q13. À partir de la figure 8 et sans calcul, préciser si le solide « drone 1 » est uniformément accéléré pendant cette phase de mise en mouvement.

La figure 8 montre que la vitesse augmente toujours, mais de moins en moins rapidement au cours du temps. Le drone n'est donc pas uniformément accéléré. En effet avec l'élongation des ressorts (retour à vers leur longueur à vide) la force appliquée devient moins importante et l'accélération diminue d'autant.

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.

Sur la figure 8, nous voyons que la vitesse de propulsion simulée (à la fin de la phase 3) est de $3,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ environ, de l'ordre de grandeur de la vitesse nécessaire pour valider le cahier des charges en longueur et en hauteur de saut.

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 modélisation multi-physique, les forces et les couples sont assimilés à des flux alors que les vitesses sont des efforts (ou potentiels). Cependant comme le terme « effort » est souvent utilisé en mécanique pour désigner soit une force soit un couple, une inversion des réponses e et f sera néanmoins considérée correcte dans les 3 liens de puissances mécaniques (2 rotations et 1 translation).

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 .

A partir de la figure 7, une « loi des mailles » permet d'extraire la relation suivante

$$U = E + R \cdot I, \text{ or } E = k_v \cdot \Omega_M \text{ et } I = \frac{C_M}{k_c} \text{ donc } U = k_v \cdot \Omega_M + R \cdot \frac{C_M}{k_c}.$$

$$\text{Finalement : } C_M = k_c \cdot \frac{U - k_v \cdot \Omega_M}{R}$$

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 $C_{Mmax} = 35 \text{ mN}\cdot\text{m}$, **vérifier** le respect de ce critère.

Ω_M dépend de Ω_C avec la relation du réducteur $\Omega_M = 316 \times \Omega_C$.

D'après la mesure, $\Omega_C = \frac{\pi}{1,7} = 1,85 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, donc $\Omega_M = 316 \times 1,85 = 584 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$.

A partir de cette vitesse de rotation du résultat de la question précédente, on peut calculer la valeur correspondante du courant :

$$C_M = k_c \cdot \frac{U - k_v \cdot \Omega_M}{R} = 4,3 \times 10^{-3} \times \frac{3,7 - 4,3 \times 10^{-3} \times 584}{0,15} = 34,3 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}.$$

Cette valeur est inférieure au couple maximal $C_{Mmax} = 35 \text{ mN}\cdot\text{m}$ indiqué par le constructeur. Ce critère est donc respecté.

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.

La puissance consommée par le moteur est globalement constante pendant 1,65 s, de l'ordre de 22,5 W. L'énergie consommée est donc $E_E = P \cdot \Delta t = 22,5 \times 1,65 = 37,1 \text{ J}$.

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

On remarque que l'énergie simulée est très proche du relevé expérimental (34 J vs 37,1 J) soit un écart de 8,3 %. Le modèle est globalement valide.

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.

Rendement = énergie de sortie / énergie d'entrée

Lors de la phase de compression, le moteur a absorbé l'énergie $E_E = 37,1$ J.

Le rendement énergétique est donc $\rho = \frac{1,4}{37,1} = 3,78\%$

Le rendement est très faible voire médiocre mais l'objectif d'efficacité énergétique de la compression est atteint. Ce faible rendement est surtout la conséquence du choix du système came-biellette dans la chaîne de puissance et du fort réducteur.

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.

À partir de la figure 12 :

- Attente $P = U \cdot I = 3,7 \times 0,6 = 2,22$ W correspond à la consommation de la commande ;
- Connexion Wi-Fi $P = U \cdot I = 3,7 \times 1,3 = 4,81$ W correspond à la consommation de la commande et du module Wi-Fi. On peut donc en déduire la consommation du module Wi-Fi comme étant 2,59 W ;
- Compression ressorts $P = U \cdot I = 3,7 \times 6 = 22,2$ W correspond à la consommation de la commande et du moteur de compression des ressorts. On peut donc en déduire la consommation du moteur de compression des ressorts comme étant 20,0 W ;
- Avance $P = U \cdot I = 3,7 \times 2 = 7,4$ W correspond à la consommation de la commande et des moteurs d'avance. On peut donc en déduire la consommation des moteurs d'avance comme étant 5,18 W ;

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

Lors du déplacement au sol, correspondant au fonctionnement du module de commande et des moteurs d'avance, la puissance consommée a été calculée à $P = 7,4$ W.

D'autre part la capacité de la batterie est de 550 mA·h. L'énergie disponible dans la batterie est : $E_B = U \cdot I \cdot \Delta t = 3,7 \times 0,55 \times 3600 = 7326$ J

L'autonomie est donc $t = \frac{E_B}{P} = \frac{7326}{7,4} = 990$ s

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.

L'énergie consommée pour la phase de compression est de $6 \times 3,7 \times 2 = 44,4 \text{ J}$

L'énergie consommée pour la phase d'éjection est de $1 \times 1 \times 3,7 = 3,7 \text{ J}$

Donc un saut consomme 48,1 J.

La capacité de la batterie est de 550 mA·h. L'énergie disponible dans la batterie est :
 $E_B = U \cdot I \cdot \Delta t = 3,7 \times 0,55 \times 3600 = 7326 \text{ J}$

Le nombre de saut maximal est donc égal à $7326/48,1=152$ sauts.

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

L'autonomie réelle dépend de l'utilisation faite (nombre de saut vs distance parcourue).

Il aurait été plus pertinent d'ajouter à l'information de durée d'utilisation le nombre de sauts envisagés.

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).

La condition souhaitée avant le déclenchement du saut est la position immobile.

On peut déterminer le facteur d'échelle du capteur à l'aide des correspondances données :
 $8 \times g = 32767 - (-32768) = 65535$, soit $1 \times g \approx 8192$

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 $\pm 0,12 \times g$).

Une lecture d'une accélération de $0 \times g$ correspond à l'intervalle des valeurs entre $\pm 0,12 \times g$ et $+0,12 \times g$, correspondant aux nombres $-0,12 \times 8192 = -983$ et $+0,12 \times 8192 = +983$.

De même une lecture d'une accélération de $1 \times g$ correspond à l'intervalle des valeurs entre $-1 - 0,12 = -1,12 \times g$ et $-1 + 0,12 = -0,88 \times g$, correspondant aux nombres $-1,12 \times 8192 = -9175$ et $-0,88 \times 8192 = -7209$.

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

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
    SI ( accel_Xout >= -983) ET (accel_Xout <= +983) ALORS
        SI ( accel_Yout >= -983) ET (accel_Yout <= +983) ALORS
            SI (accel_Zout >= -9175) ET (accel_Zout ≤ -7209)
                Position_stable= 1
            FIN SI
        FIN SI
    FIN SI
FIN TANT QUE
drone_au_sol = 1
SAUTER
TANT QUE drone_au_sol = 0 FAIRE
FIN TANT QUE

```

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.

Le drone apparaît être, suite à cette étude, capable de sauter à la longueur souhaitée.

Les résultats des calculs des ressorts montrent que le drone est capable de faire un saut mais que le ressort choisi est limité pour satisfaire les contraintes du saut en hauteur.

Par contre l'autonomie annoncée ne peut être atteinte qu'avec un nombre limité de sauts, ce qui semble raisonnable en regard d'une utilisation « normale ».