

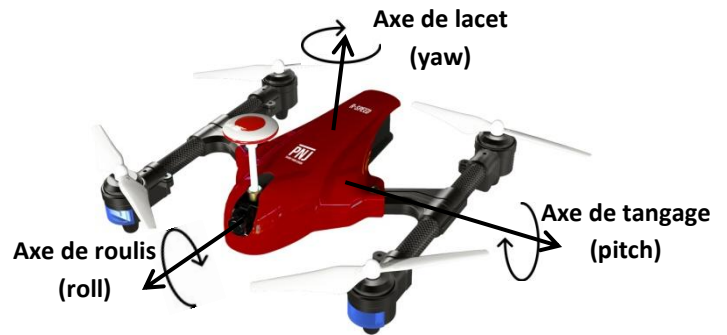
Objectifs :

- établir un diagramme CE/CI à partir de diagrammes SysML du système étudié. Détailler la technologie des principaux composants ;
- déterminer et justifier certains blocs donnés dans un modèle associé. Analyser les performances d'une boucle d'asservissement ;
- analyser le comportement d'une pièce soumise à des contraintes.

Contexte général :

Un système volant peut se déplacer selon les 3 axes définis ci-contre. Dans le cas d'un drone, un pilote gère ses déplacements à partir d'une télécommande depuis le sol.

Pour se déplacer en translation, le drone doit pivoter autour d'un de ses axes de tangage et/ou de roulis. Des boucles d'asservissement en position et vitesse permettent de stabiliser ces déplacements.



Drone de course r-speed ($V_{max} = 120 \text{ km/h}$)

Grâce aux joysticks de sa télécommande, le pilote peut générer des consignes de vol :

- en mode « position » (à une consigne sur le joystick correspond un angle d'inclinaison du drone)
- en mode « vitesse » (à une consigne sur le joystick correspond une vitesse d'inclinaison du drone)

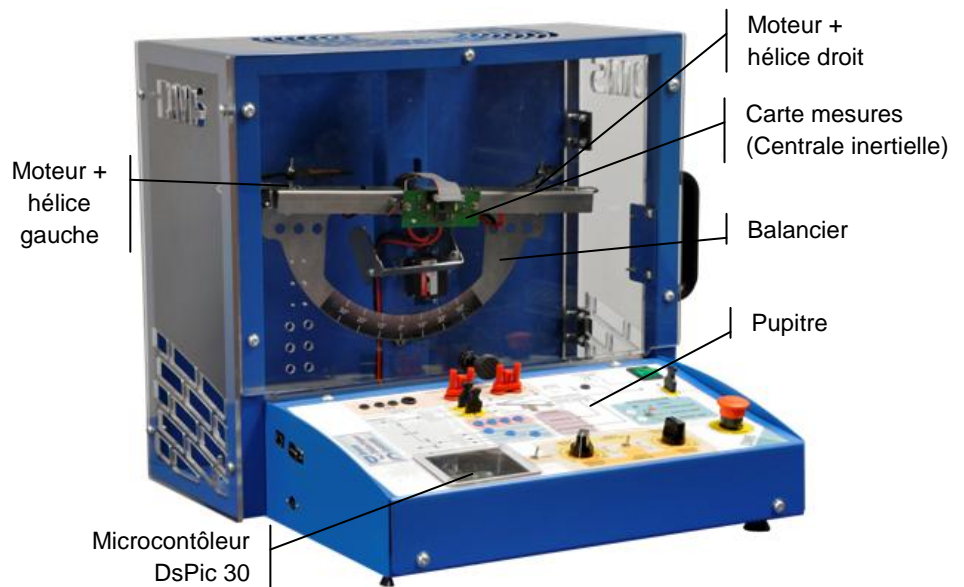


Pilotage du drone à partir d'une télécommande

Support d'étude : Drone Didactique Contrôlé D2C

Principe de fonctionnement :

À partir du pupitre ou du logiciel dédié D2C_IHM, des consignes de vitesse ou de position sont envoyées à un micro-contrôleur. En boucle fermée, le balancier s'oriente et se stabilise en conséquence grâce à une boucle d'asservissement dans laquelle se trouvent un correcteur, une centrale inertielle (accéléromètre + gyromètre) et une chaîne d'énergie avec 2 contrôleurs modulant l'énergie délivrée aux 2 moteurs brushless. La rotation des 2 hélices bipales créent ainsi le mouvement de tangage désiré.



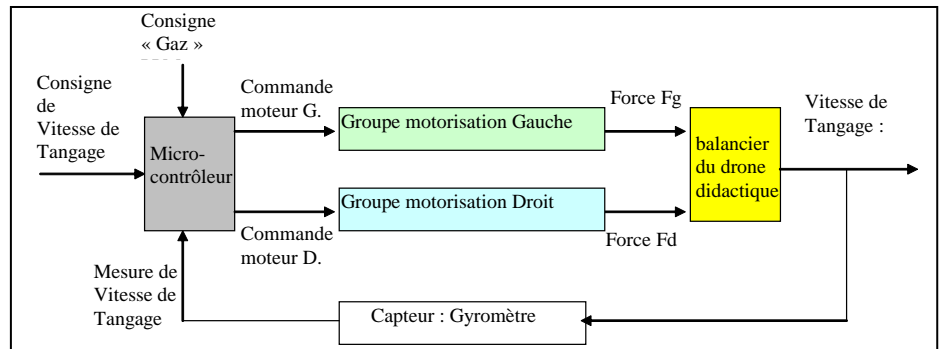
Mise en œuvre des solutions de commande et de contrôle d'un mouvement de tangage d'un drone sur le « Drone Didactique Contrôlé D2C »

Partie 1 : diagramme CE/CI et technologie des principaux constituants

Q1 À partir des différents diagrammes de blocs internes donnés en Annexe 1, proposer les chaînes d'information et d'énergie associées du système D2C. Prendre connaissance des renseignements techniques apportés en Annexe 2, 3, et 4 pour compléter au mieux ce diagramme CE/CI.

Partie 2 : modèle de l'asservissement du mouvement de tangage en vitesse du D2C

Le schéma-blocs ci-contre représente la boucle d'asservissement autour du micro-contrôleur de la « carte pupitre », dans le cas d'une commande de tangage « en vitesse ».



Q2 Sachant que le convertisseur analogique / numérique du micro-contrôleur code sur 10 bits un signal d'une amplitude de 0 à 5 V, compléter les blocs (a) et (b) entourés sur la chaîne de retour (voir modèle utilisé en annexe 5). (Informations sur le gyromètre en Annexe 3).

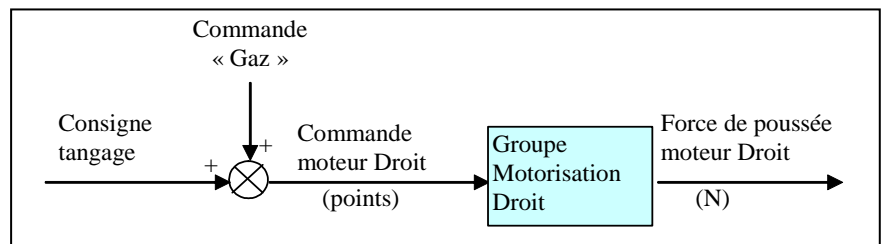
Q3 En déduire la valeur du gain d'adaptation en sachant que la consigne est exprimée en ‰. Compléter le bloc (c).

On pose :

- moment d'inertie du balancier : $J = 10^{-2} \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
- distance entre l'axe de rotation du balancier et l'axe d'une hélice : b
- forces générées par les hélices droite et gauche : F_d et F_g
- accélération angulaire du balancier / bâti : $\ddot{\alpha}$
- couple de frottement sec au niveau de la liaison pivot entre le balancier et le bâti : C_f

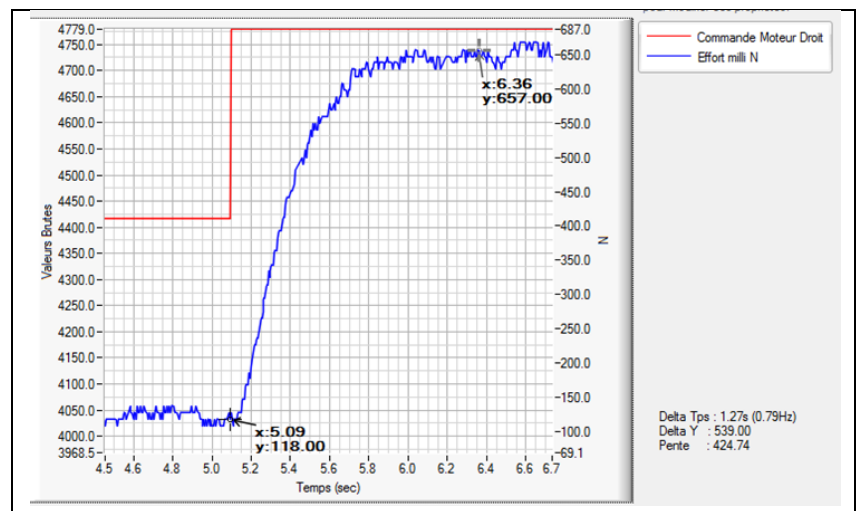
Q4 Établir l'équation des moments issue du PFD, et exprimer J en fonction de F_d , F_g , b , C_f et $\ddot{\alpha}$. Compléter le cadre (d) du modèle Scilab en tenant compte de l'hypothèse simplificatrice $C_f = 0$. Cette hypothèse vous semble t'elle réaliste ?

En commandant le système D2C en « boucle ouverte », il est possible d'obtenir le modèle de comportement de la motorisation seule. Le schéma-bloc utile se réduit à celui de la figure ci-contre. Il permet de visualiser la grandeur d'entrée « commande moteur » et la grandeur de sortie « Force ». La distance entre cette force et l'axe de rotation crée un moment qui fait basculer le balancier du drone.



À partir d'un échelon de consigne donné sur la commande côté droit, on récupère expérimentalement l'allure de la courbe de l'effort de poussée au niveau du moteur.

Q5 Analyser les courbes obtenues et en déduire le gain « K_m » (en Newtons par incrément) ainsi que la constante de temps « τ_m » d'un modèle approché équivalent du 1^{er} ordre pour la motorisation, autour de ce point de fonctionnement. Compléter les blocs du cadre (e) du modèle Scilab.



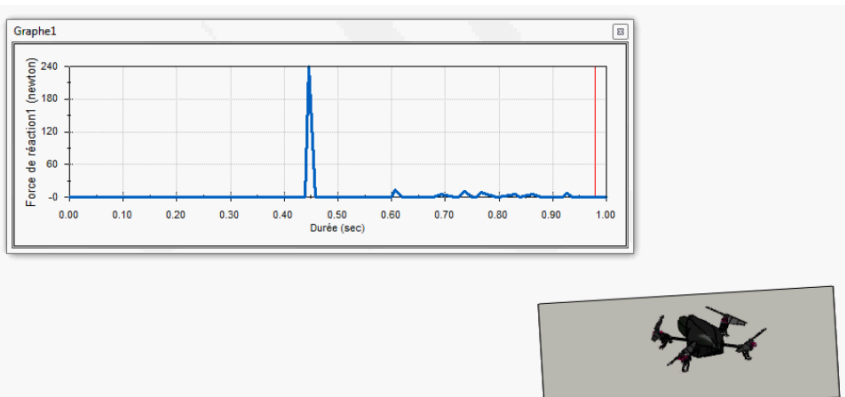
On considère que cette boucle de vitesse est correctement réglée si les critères ci-dessous sont respectés :

fonction	critère	niveau
Obtenir un bon comportement de la boucle de vitesse	1- Marge de phase	> 45°
	2- Dépassement	< 25%
	3- Temps de réponse à 5%	< 0,5s

Q6 Compléter l'annexe 7 en répondant aux questions posées.

Partie 3 : analyse du comportement du support du drone après une chute d'1 mètre

On souhaite vérifier le comportement des supports du drone lors d'une chute d'1 m sur le sol. Une simulation SW ([video](#)) donne l'évolution suivante de la force d'impact sur un support :



Hypothèses :

- Impact sur un seul des 4 supports
- Contact plastique / sol mou (terre)
- Matériau du support : plastique PA 6-6

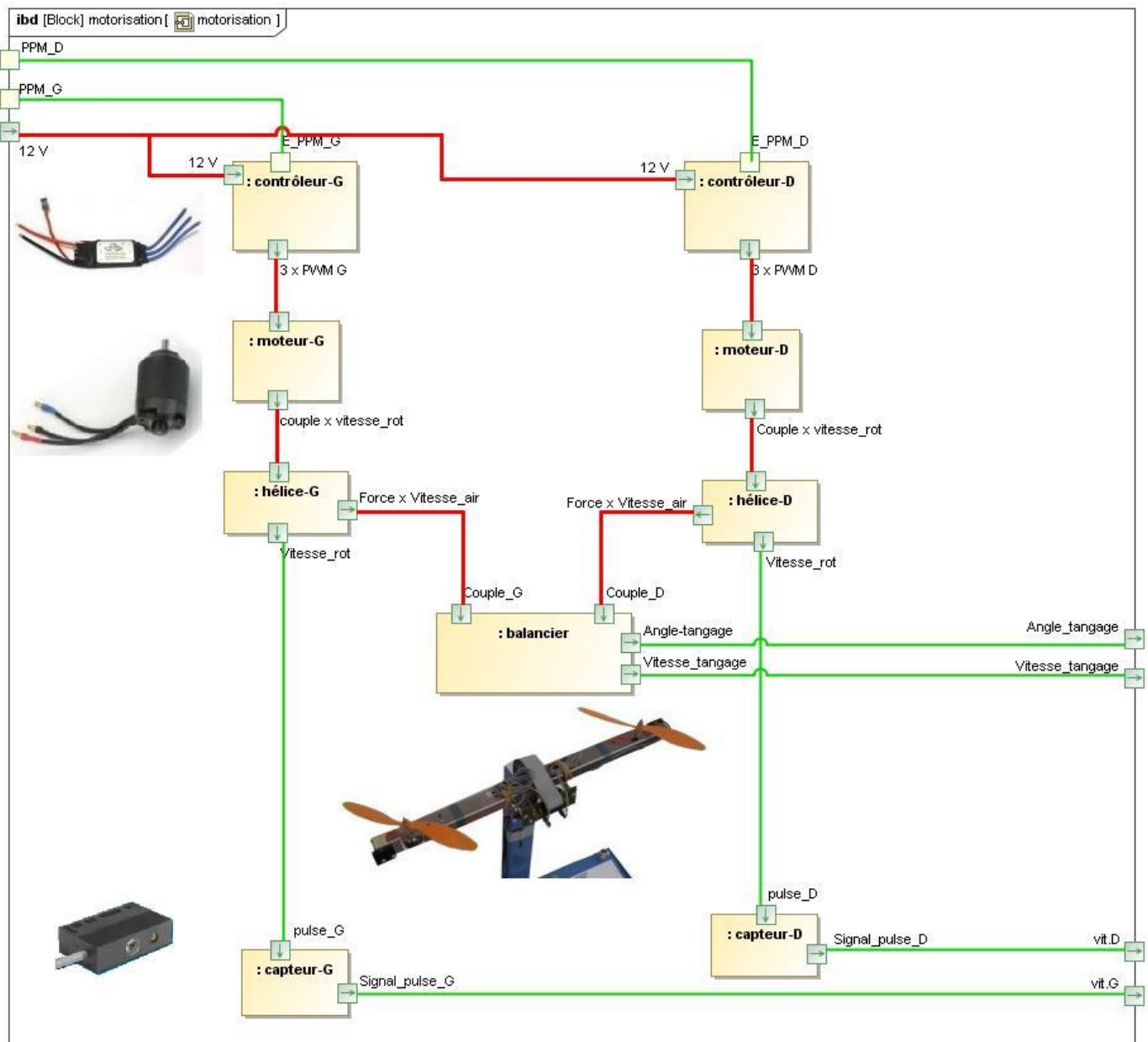
Q14 Après avoir compris la chronologie de l'étude présentée en Annexe 6, proposer des améliorations à envisager sur le support afin de le rendre plus résistant. Dessiner ces solutions sur la figure 6, en minimisant la masse de matière rapportée.

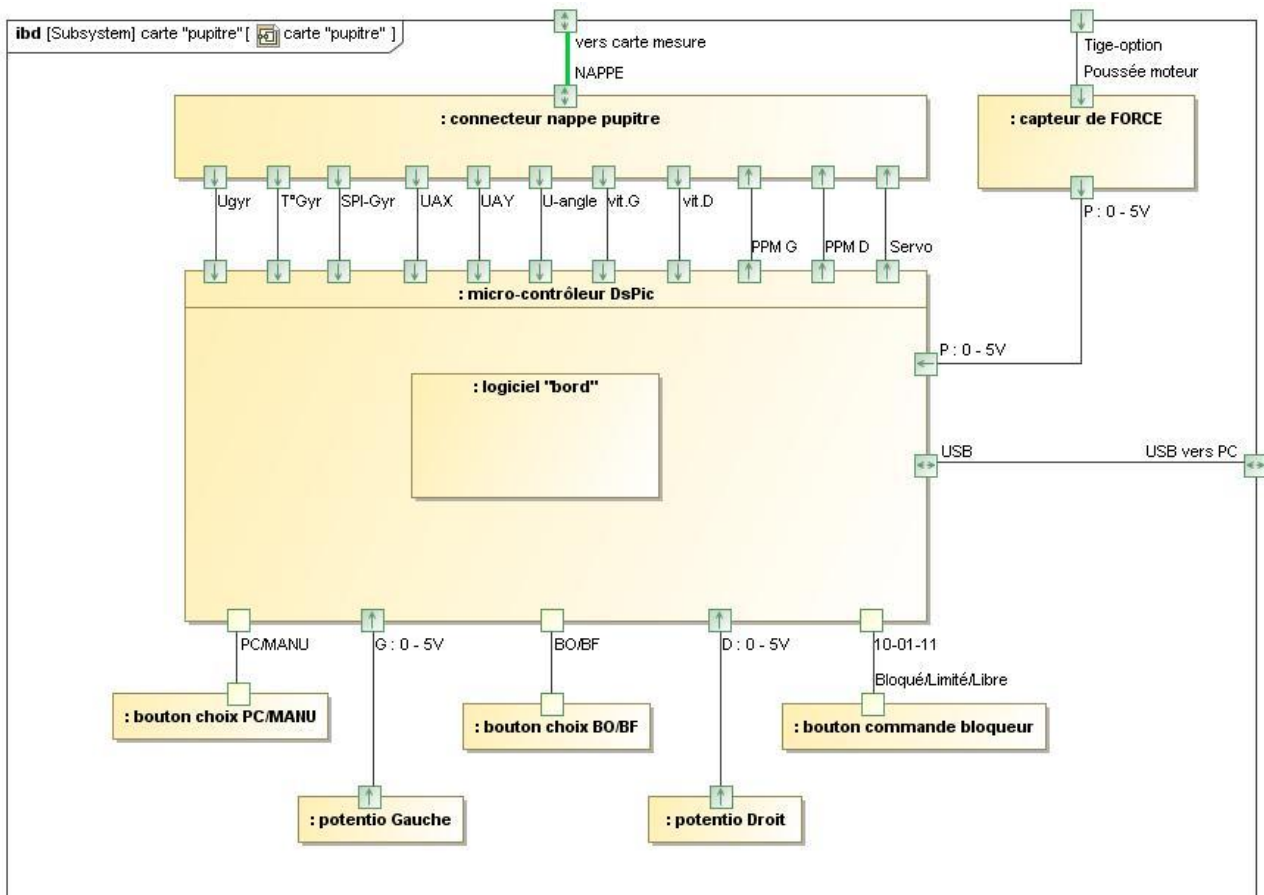
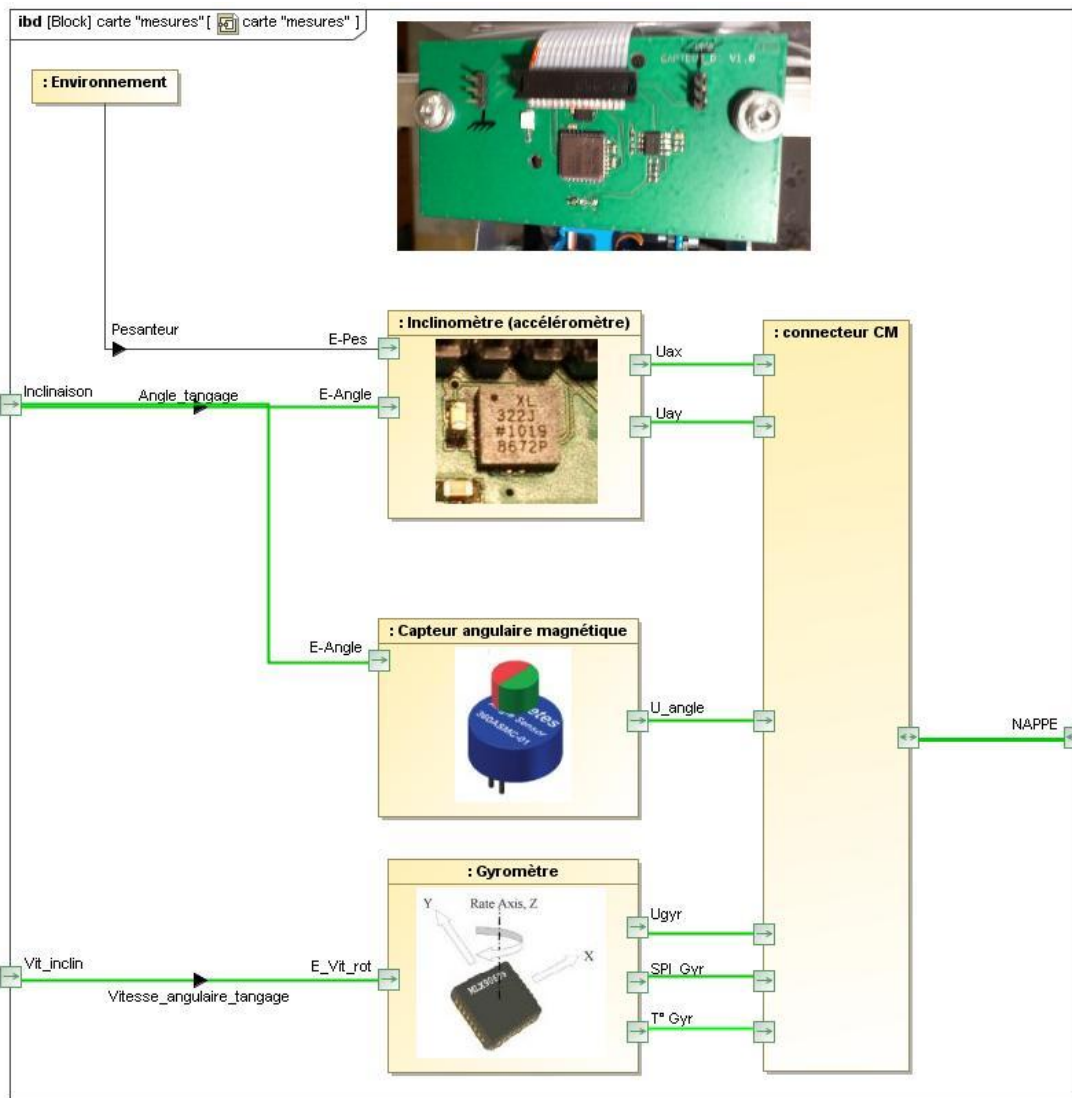
Q15 Recherche sur CES EduPack un éventuel matériau possédant des critères plus performants que le PA 6-6. Justifier votre choix final.

- pour le matériau : être résistant aux chocs avec une limite élastique ≥ 103 MPa, être recyclable, avoir un coût réduit, être le plus léger possible.
- pour le procédé : obtention des formes principales par moulage.

Partie 4 : conclusion sur le lien entre technologie, matériel et performances d'un système

Q16 Justifier le fait que le développement d'un système asservi de qualité passe également par une conception et un dimensionnement rigoureux de ses composants mécaniques.



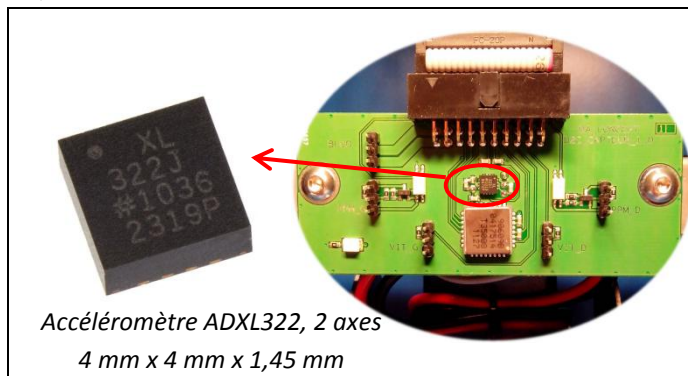


Annexe 2 Accéléromètre (capacitif)

- **Intérêt** : mesurer l'accélération linéaire suivant 1, 2 ou 3 axes.
- **Principales utilisations** :
 - Téléphones portables (commandes de jeux, orientation écran...)
 - Appareils de sports et liés à la santé (podomètres...)
 - Sécurité (arrêt DD PC en cas de chute de l'objet, déclenchement airbag...)

Vidéo (0<t<5') :

https://www.youtube.com/watch?v=V_zRvc1tNBM



• Principe de mesure sur 1 axe :

La masse mobile (5) avec ses plaques mobiles en forme de peigne (4) est suspendue de manière souple sur de fines lames-ressorts (6) ancrées aux extrémités (7) sur la puce.

Des plaques fixes (2, 3) placées sur la puce se trouvent de chaque côté des plaques mobiles (4). À l'accélération du capteur, la distance entre les plaques mobiles et fixes se modifie, entraînant une modification du signal électrique dans la puce d'interprétation.

Modèle mécanique équivalent pour 1 axe :

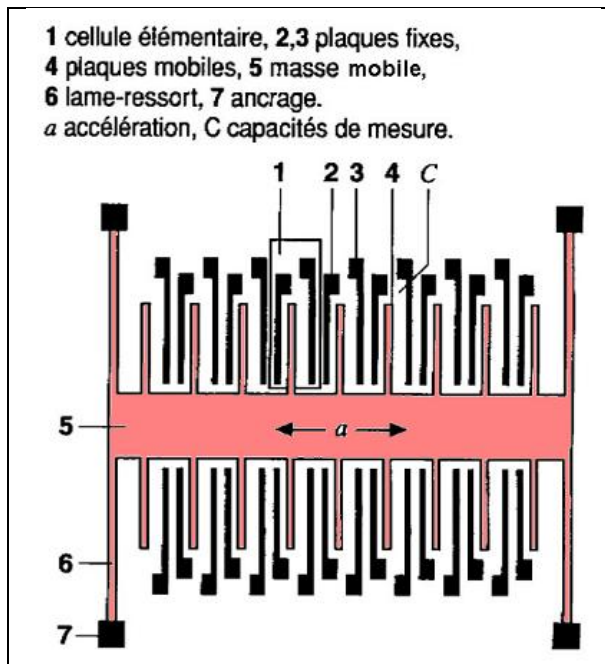
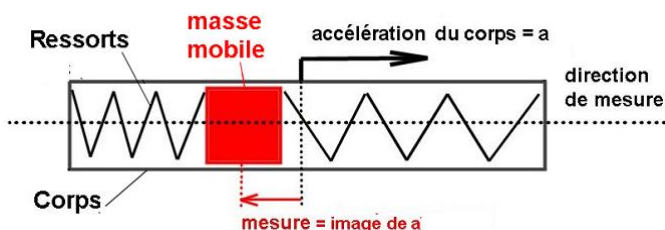
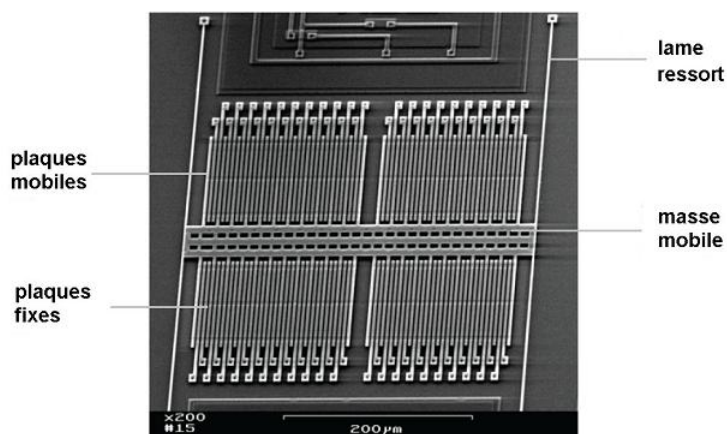
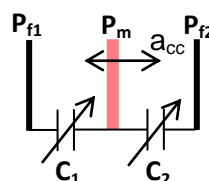


Schéma électrique équivalent entre 2 plaques fixes (P_{f1} et P_{f2}) et 1 plaque mobile (P_m):

Le déplacement de la masse sismique P_m entre les armatures fixes P_{f1} et P_{f2} entraîne des variations de capacité C_1 et C_2 qui sont fonction de l'accélération a_{cc} .

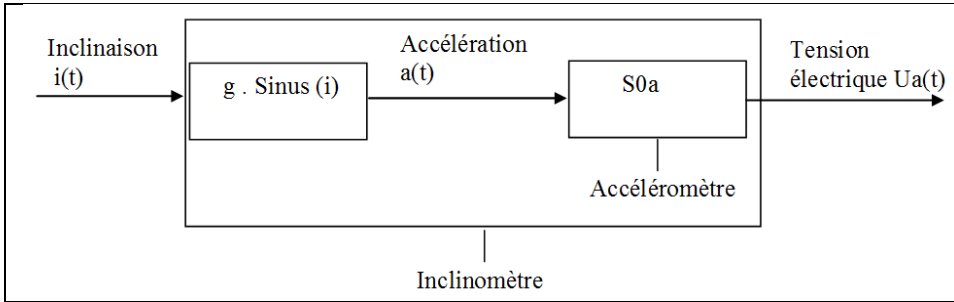
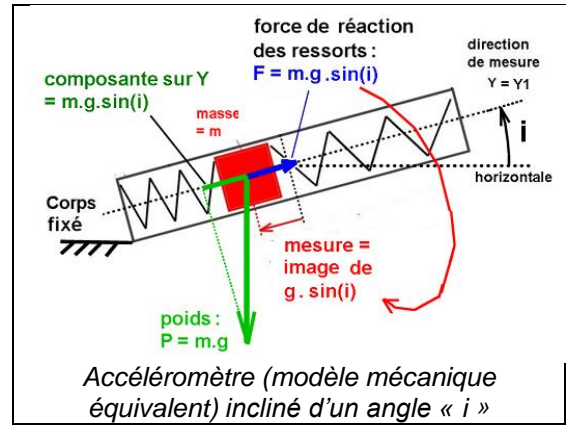


Vue au microscope de l'accéléromètre capacitif ADXL322

• **Utilisation de l'accéléromètre en inclinomètre**

Si l'accéléromètre est placé verticalement, et fixé au sol, la masse mobile est soumise à la force de pesanteur $P = m \cdot g$. Les ressorts exercent sur la masse la force de réaction $F = m \cdot g$; donc l'accéléromètre donne une mesure qui est l'image de l'accélération de la pesanteur « g ».

Si l'accéléromètre est incliné d'un angle « i » par rapport à l'horizontale, la composante du poids qui intervient dans la direction de mesure est $P_y = m \cdot g \cdot \sin(i)$; en conséquence les ressorts exercent la force de réaction $F = m \cdot g \cdot \sin(i)$. L'accéléromètre fournit donc une image de $g \cdot \sin(i)$ et permet de mesurer ainsi l'angle « i ».

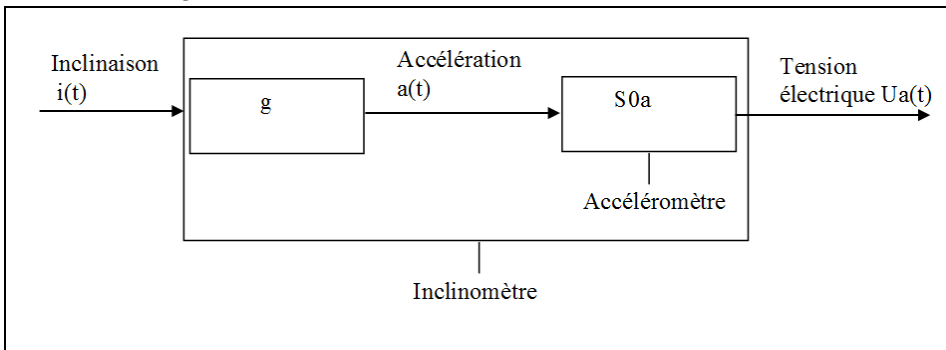


Avec S_{0a} sensibilité (ou fonction de transfert) de l'accéléromètre :

$$S_{0a} = \frac{U_a(t)}{a(t)}$$

S_{0a} en $V \cdot s^2 / m$ ou en Volts / g (g, accélération de la pesanteur)

Pour des angles « i » petits, on peut faire l'approximation $\sin i \approx i$, d'où le schéma suivant :



Dans ce cas : $a(t) = g \cdot i(t)$ et $U_a(t) = S_{0a} \cdot g \cdot i(t)$

Comme S_{0a} est exprimé en « Volts / g », on retient :

$$U_a(t) = S_{0a} \cdot i(t)$$

Pour une expression de $i(t)$ en degrés, alors

$$U_a(t) = S_{0a} \cdot i(t) \cdot \frac{\pi}{180}$$

La fonction de transfert S_{0i} de l'inclinomètre peut donc s'écrire :

$$S_{0i} = \frac{U_a(t)}{i(t)} = S_{0a} \cdot \frac{\pi}{180} \quad \text{avec } U_a(t) \text{ en V/g et } i(t) \text{ en } ^\circ.$$

Extrait de caractéristiques de l'accéléromètre ADXL322 :

USE WITH OPERATING VOLTAGES OTHER THAN 3 V

The ADXL322 is tested and specified at $V_s = 3$ V; however, this part can be powered with V_s as low as 2.4 V or as high as 6 V. Note that some performance parameters change as the supply voltage is varied.

The ADXL322 output is ratiometric, so the output sensitivity (or scale factor) varies proportionally to supply voltage. At $V_s = 5$ V, the output sensitivity is typically 750 mV/g. At $V_s = 2.4$ V, the output sensitivity is typically 335 mV/g.

The zero g bias output is also ratiometric, so the zero g output is nominally equal to $V_s/2$ at all supply voltages.

Sensibilité, si alimentation à 5V

Tension de sortie à accélération nulle, si alimentation à V_s

En conclusion, dans le cas du drone D2C, avec l'alimentation en 5V :

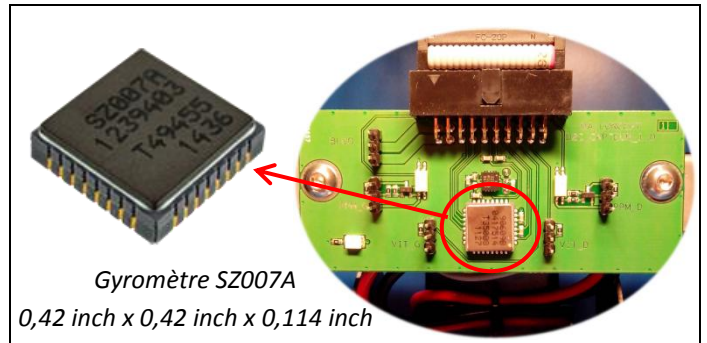
- Sensibilité si utilisé en accéléromètre : $S_{0a} = 0,75$ V/g
- Sensibilité si utilisé en inclinomètre au voisinage de la position horizontale : $S_{0i} = 0,013$ V/°
- Biais (offset) = 2,5 V

Annexe 3 Gyromètre

- **Intérêt** : mesurer la vitesse angulaire du composant sur lequel le gyromètre est lié. Ne pas confondre avec un gyroscope qui est un capteur angulaire.
- **Principales utilisations** :
Téléphones portables (mouvements, correction de stabilité photo...)
Appareils de sports et liés à la santé (contrôle de l'attitude gestuelle...)
Sécurité (ESP véhicules...)

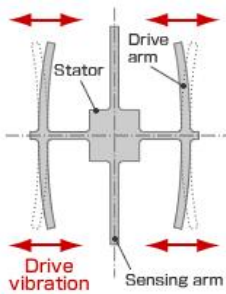
Vidéo :

<https://www.youtube.com/watch?v=eqZqxR6eRjo>

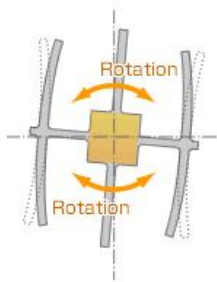


Principe de la mesure autour d'un axe :

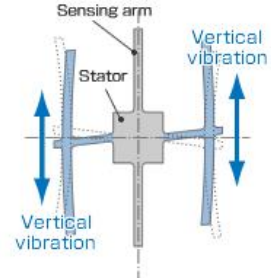
Epson Gyro product (https://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/gyro/index.html)



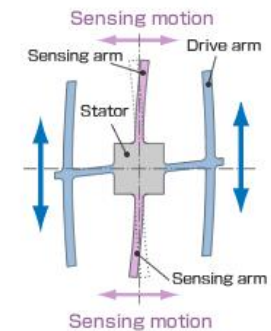
1. Normally, a drive arm vibrates in a certain direction.



2. Direction of rotation



3. When the gyro is rotated, the Coriolis force acts on the drive arms, producing vertical vibration.



4. The stationary part bends due to vertical drive arm vibration, producing a sensing motion in the sensing arms.

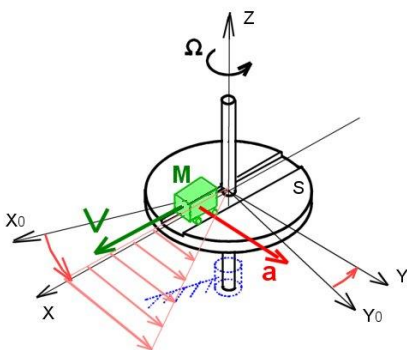


5. The motion of a pair of sensing arms produces a potential difference from which angular velocity is sensed. The angular velocity is converted to, and output as, an electrical signal.

Accélération de Coriolis :

Lorsqu'un mobile M se déplace à la vitesse V dans la direction X, et que S tourne autour d'un axe vertical à Ω constante, alors M subit une accélération dite « accélération de Coriolis » qui s'exerce dans la direction Y.

$$\vec{a}_{coriolis} = 2\vec{\Omega}_{S/R_g} \wedge \vec{V}_{M/S}$$



Plus intuitif : M subit une vitesse tangentielle de plus en plus importante lorsqu'il s'éloigne de l'axe de rotation ($V=R \cdot \Omega$) ; donc pendant son déplacement à la vitesse V dans la direction X, il doit accélérer selon la direction Y.

On relève :

- pleine échelle : + ou - 300 °/s
- **sensibilité : 6,67 mV/°/s**
- tension de sortie à vitesse nulle : 2,5 V

Extrait des spécifications du gyromètre SZ007A

DC Operating Parameters T=-40°C to 85°C, Vdd=4.75V to 5.25V (unless otherwise specified)
All parameters specified are @ Vdd=5.0V and T=25°C

Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
<u>Full Scale Range</u>	N		±75		°/s
	E		±150		°/s
	R		±300		°/s
Non-Linearity	Best fit line		±0.5		% of FS
<u>Sensitivity</u> /Scale Factor	N		26.67		mV/°/s
			12.8		LSB/°/s
	E		13.33		mV/°/s
			6.4		LSB/°/s
	R		6.67		mV/°/s
Scale Factor Drift	-40°C~85°C		±5		%S ₀
<u>Zero Rate Output(ZRO)</u>			2.5		V
			1008		LSB

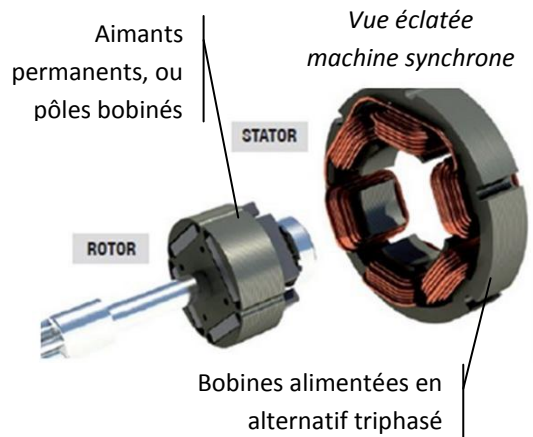
Moteur brushless :

Pour éviter les problèmes liés à l'usure des balais sur un moteur à courant continu, on utilise désormais des moteurs brushless.

Les bobines sont alimentées de façon séquentielle (alimentation alternative triphasée). Cela crée un champ magnétique tournant à la même fréquence que les tensions d'alimentation. Dans le cas d'une machine synchrone (moteur brushless), on a :

$$N_{\text{rotor}} = N_{\text{statorique}} = \frac{60f}{p}$$

Dans ce type de moteur brushless, des capteurs à effet hall (3 en général) sont utilisés pour connaître à tout moment la position du rotor, et adapter en conséquence l'alimentation des bobines et le champ magnétique. Le capteur va détecter le passage d'un pôle magnétique, et à partir de cette information, le circuit de commande électronique assurera la commutation des bobines.



Vidéo : machine synchrone
Moteur brushless
Fonctionnement différents moteurs

- <https://www.youtube.com/watch?v=JeoJcx9blsw> (2'11)
- <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac> (4'39)
- <http://www.moteurindustrie.com/brushless/technique.html>



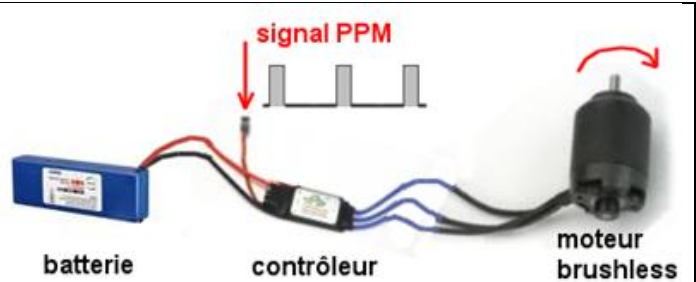
Système D2C : Moteur brushless outrunner D2632-1000

Specification
No.of cells:2-3 LI-POLY
RPM/V:1000 RPM/V
Max.efficiency:80%
Max.efficiency current:7A-13A
No load current:11.1V/0.4A
Current capacity:13A/20S
Internal Resistance:0.262 ohm
Dimensions(diameter.X length):Φ25.8X32.2mm
Shaft diameter:Φ3.0mm
Weight with Adapters:61 g

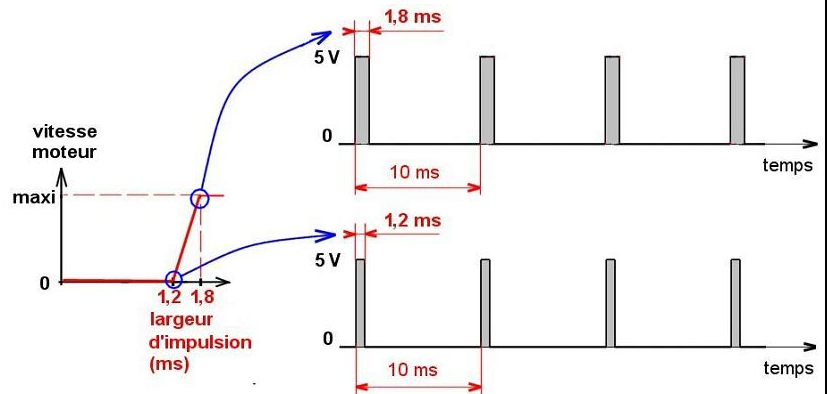
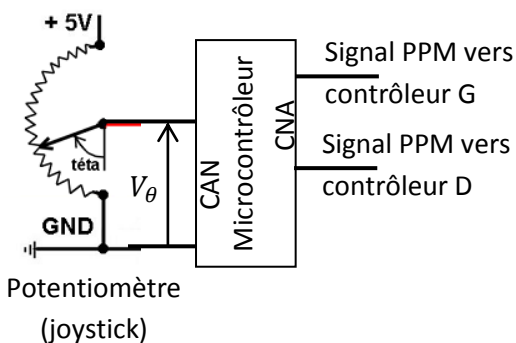
Commande des moteurs brushless :

La structure de commande des moteurs brushless d'un drone est donnée ci-contre.

La batterie délivre une tension continue 12 V. Le **contrôleur** génère des signaux PWM (ou MLI) pour alimenter en tension et courant alternatifs triphasés le moteur brushless → rôle d'un **onduleur**.

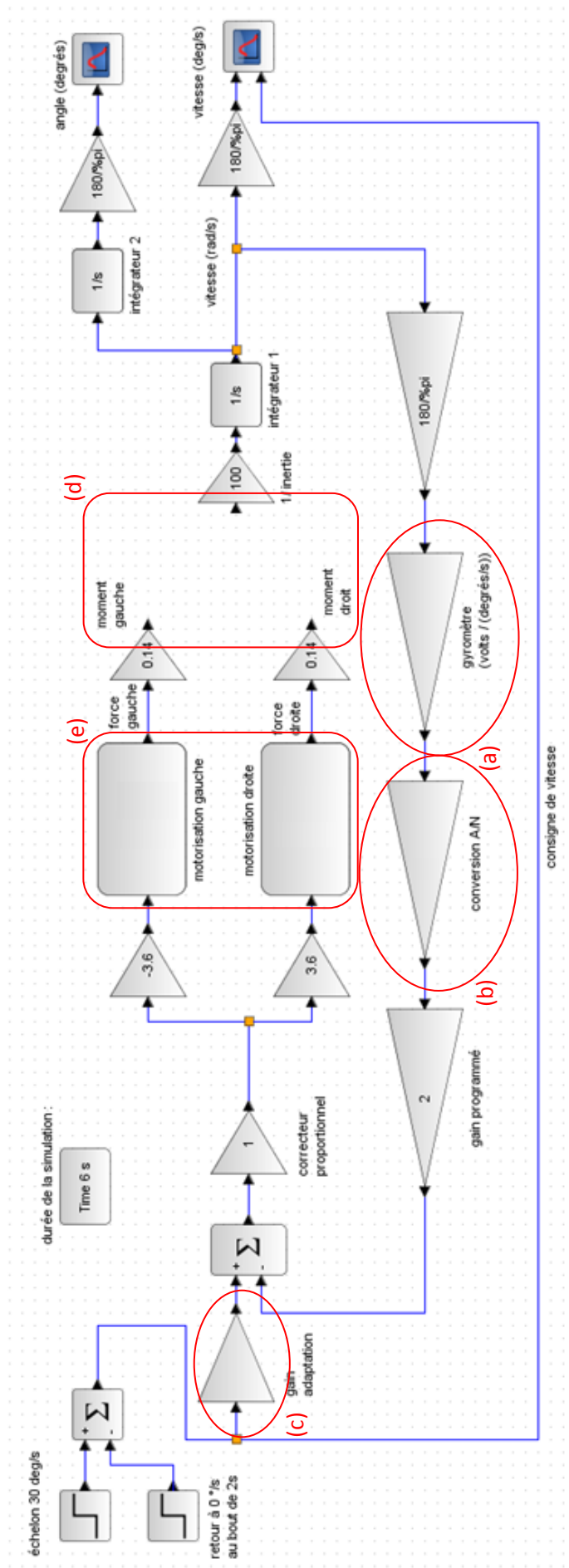


Le signal PPM (Pulse Proportional Modulation) correspond à une image de la consigne (position ou vitesse) produite sur le joystick par le pilote

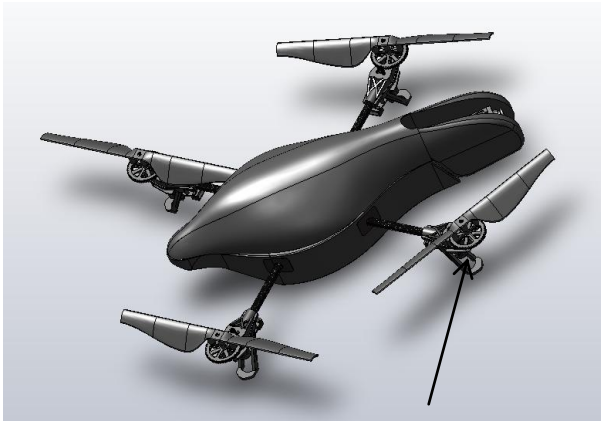


À chaque nouveau signal PPM reçu, le contrôleur adapte la fréquence des signaux électriques envoyés au moteur.

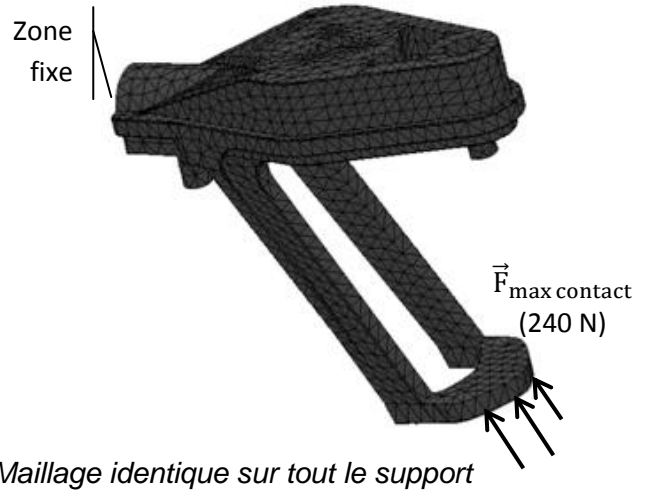
Annexe 5 Modèle de l'asservissement en vitesse du mouvement de tangage du D2C



Annexe 6 AR-Drone Parrot / analyse du comportement des supports lors d'une chute d'une hauteur d'1 m du drone sur le sol



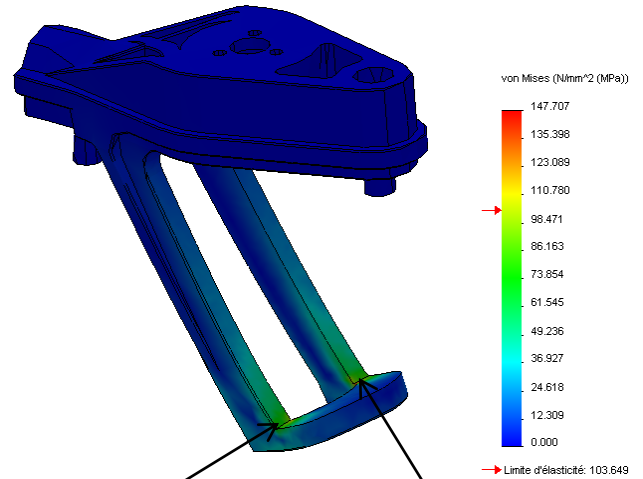
Étude de résistance d'un des 4 supports du drone lors du choc sur le sol



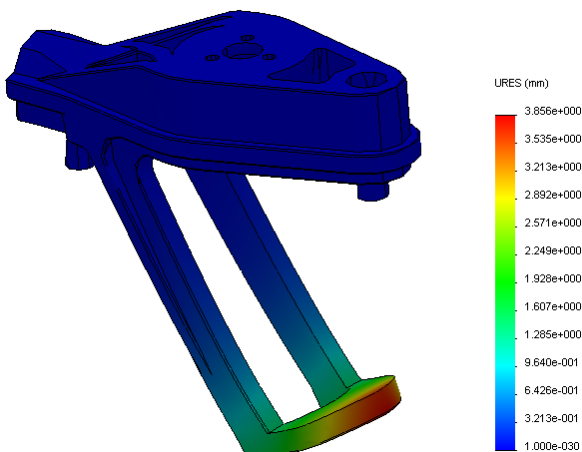
Maillage identique sur tout le support



Maillage localement plus précis : permet d'exprimer au mieux la contrainte maximale sans trop influencer le temps de calcul



La limite élastique du matériau (PA6-6) est dépassée dans certaines zones



Le déplacement maxi (volontairement augmenté visuellement) = 3,85 mm

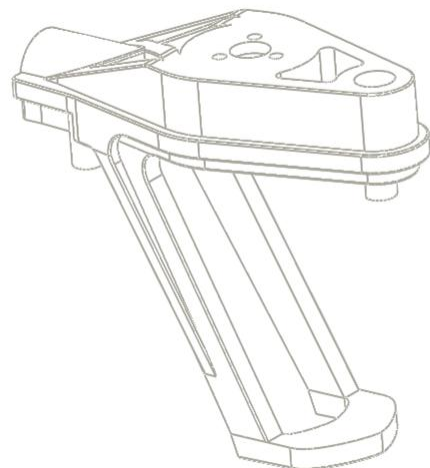
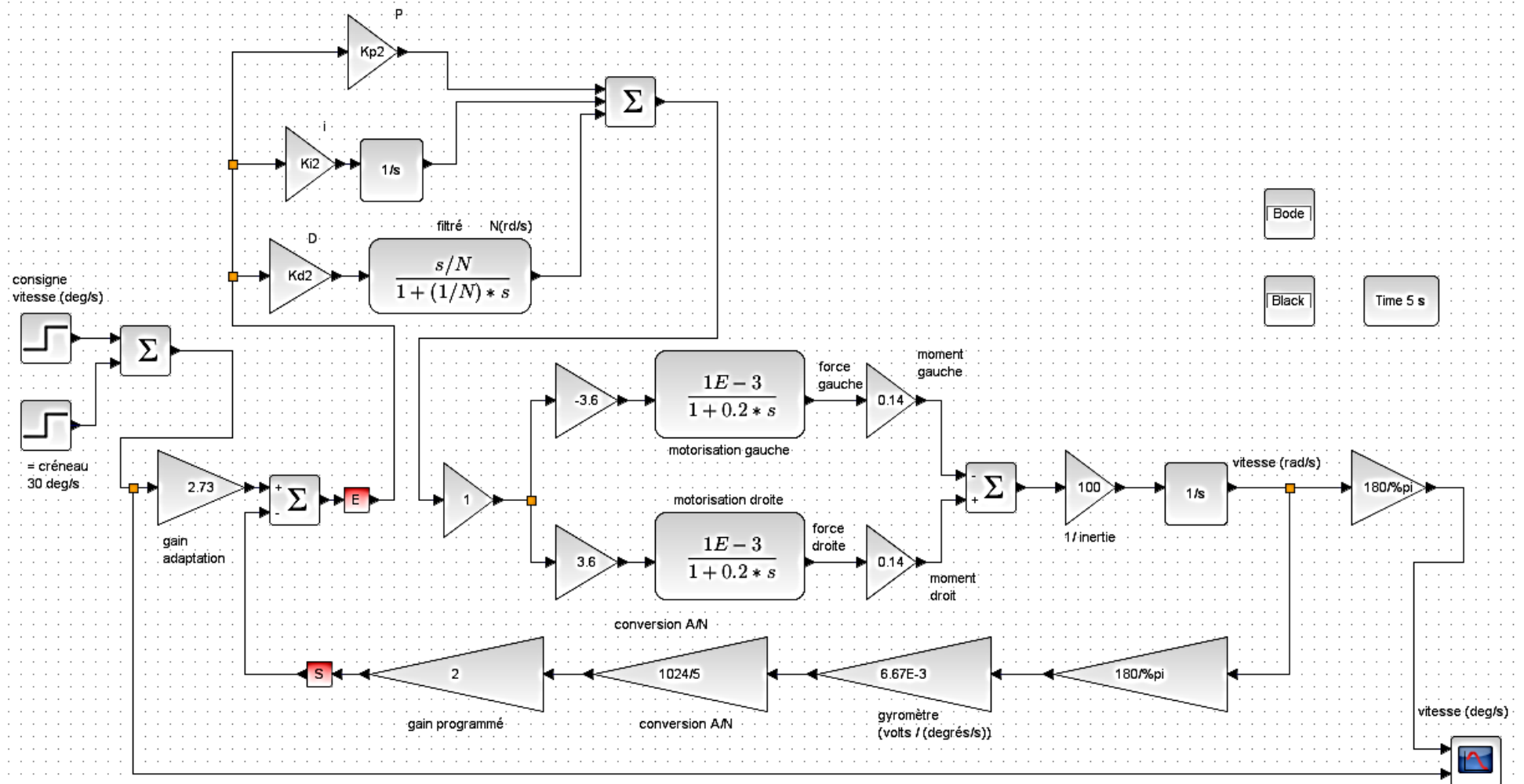


Figure 6 : Solution(s) pour rigidifier le support ?

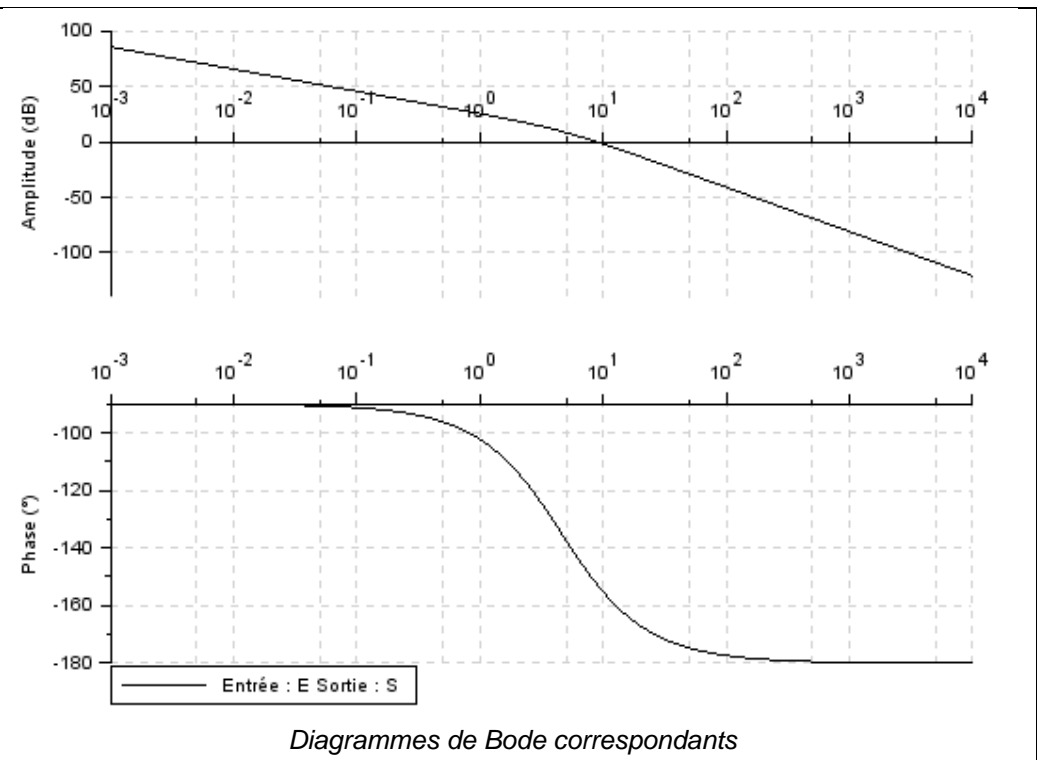
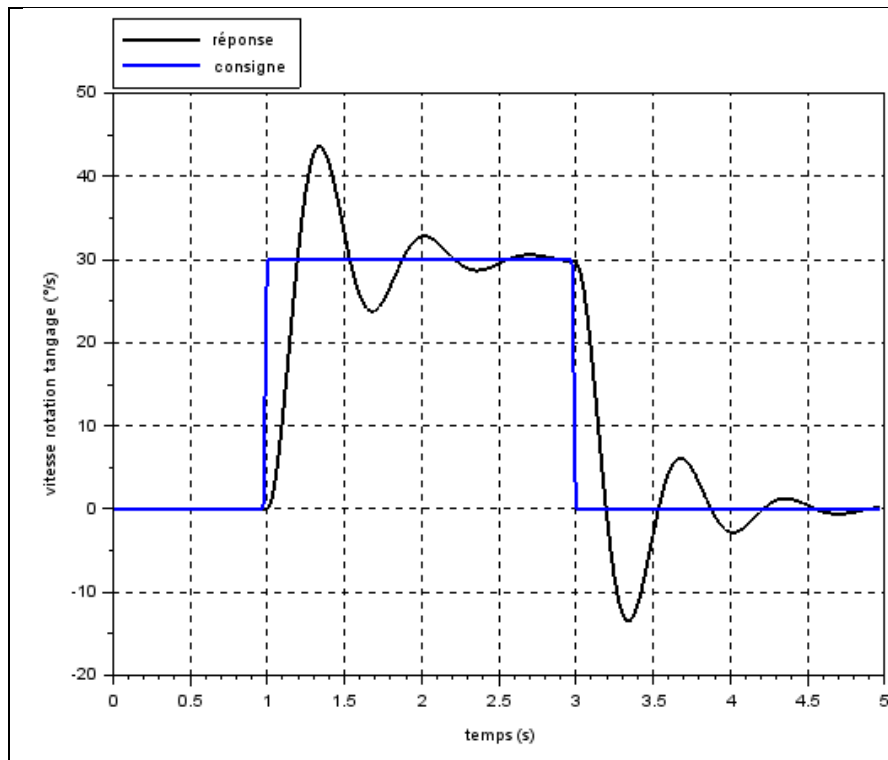


Modèle Scilab utilisé pour observer le comportement en vitesse du balancier du D2C avec la boucle d'asservissement associée.

Q7 Localiser le correcteur dans le modèle et exprimer sa fonction de transfert sous forme de produit. Montrer alors qu'il s'agit d'un correcteur **PID** (Proportionnel, Intégral, Dérivé) et exprimer les trois coefficients **Kp**, **Ti** et **Td**. Forme générale d'un correcteur PID : $K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d p}{1 + \frac{T_d p}{K}} \right)$ avec $K > 1$.

Cas 1 : Évolution de la vitesse angulaire de tangage ($^{\circ}/s$) en fonction du temps (s) à partir d'une consigne de vitesse = $30^{\circ}/s$.

Correcteur : $K_p = 1$ $K_i = 0$ $K_d = 0$



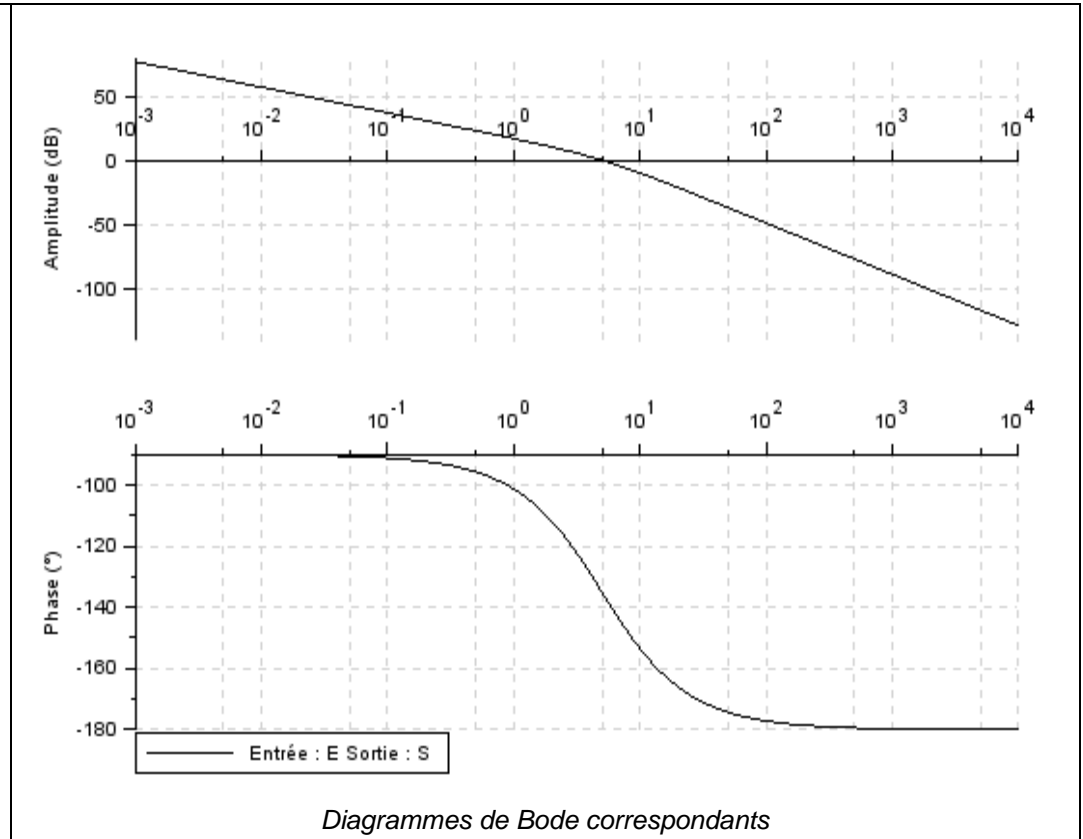
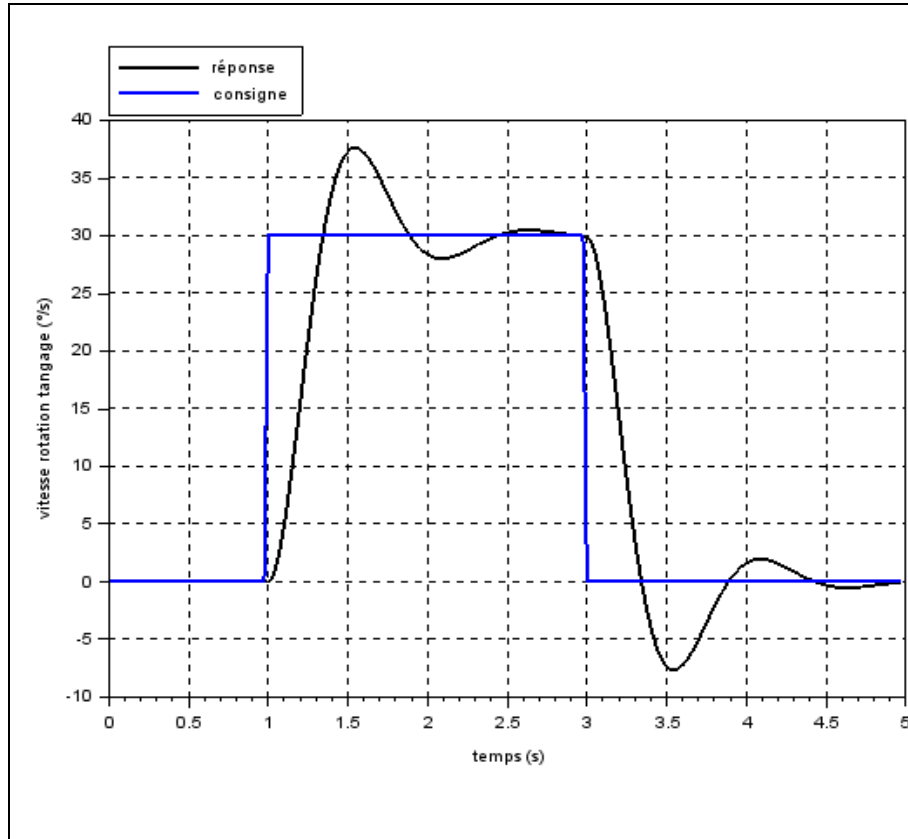
Q8 Exploiter les résultats de simulation ci-dessus et vérifier les critères suivants :

fonction	critère	niveau	Valeurs relevées	Critère vérifié O / N
Obtenir un bon comportement de la boucle de vitesse	1- Marge de phase	$> 45^{\circ}$		
	2- Dépassement maxi	$< 25\%$		
	3- Temps de réponse à 5%	$< 0,5s$		

Q9 Commenter le comportement et le réglage du correcteur, proposer l'évolution à apporter.

Cas2 : Évolution de la vitesse angulaire de tangage ($^{\circ}/s$) en fonction du temps (s) à partir d'une consigne de vitesse = $30 \text{ }^{\circ}/s$.

Correcteur : $K_p = 0.5$ $K_i = 0$ $K_d = 0$



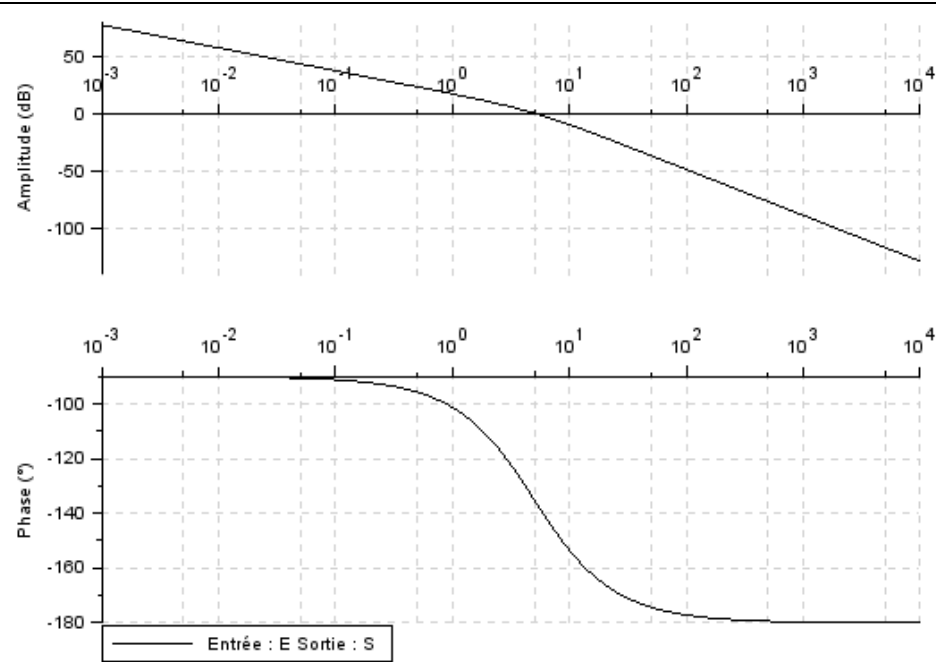
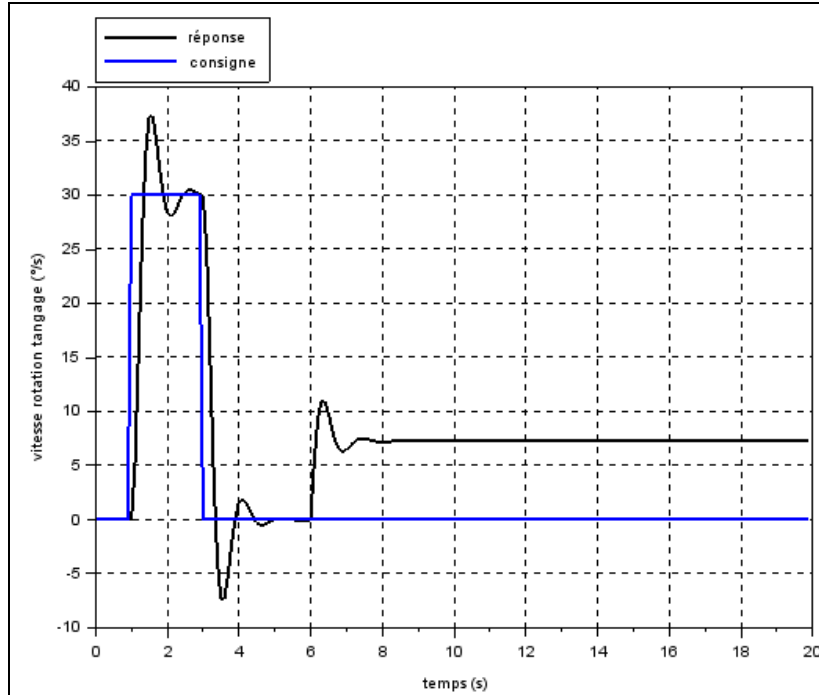
Q10 Exploiter les résultats de simulation ci-dessus et vérifier les critères suivants

fonction	critère	niveau	Valeurs relevées	Critère vérifié O / N
Obtenir un bon comportement de la boucle de vitesse	1- Marge de phase	$> 45^{\circ}$		
	2- Dépassement maxi	$< 25\%$		
	3- Temps de réponse à 5%	$< 0,5s$		

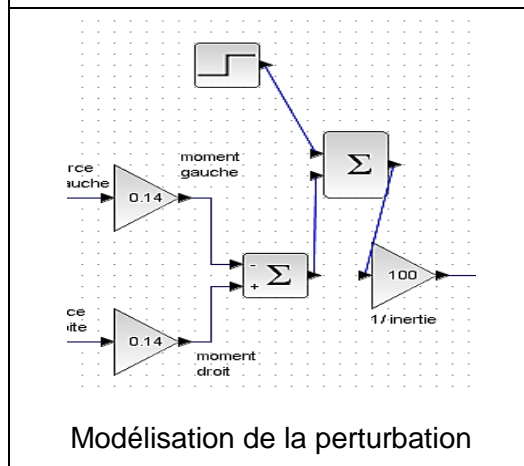
Cas 3 : Évolution de la vitesse angulaire de tangage ($^{\circ}/s$) en fonction du temps (s) à partir :

- d'une consigne de vitesse = $30 \text{ }^{\circ}/s$
- puis d'une perturbation (Couple) à $t = 6 \text{ s}$ sur le balancier.

Correcteur : $K_p = 0.5 \text{ } K_i = 0 \text{ } K_d = 0$



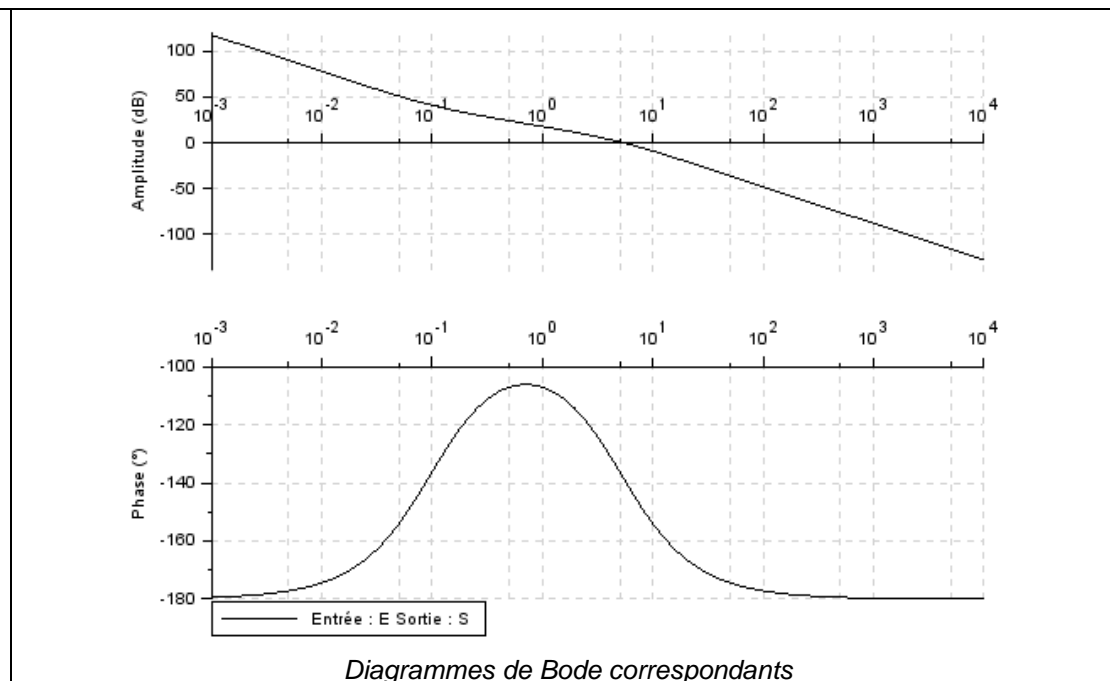
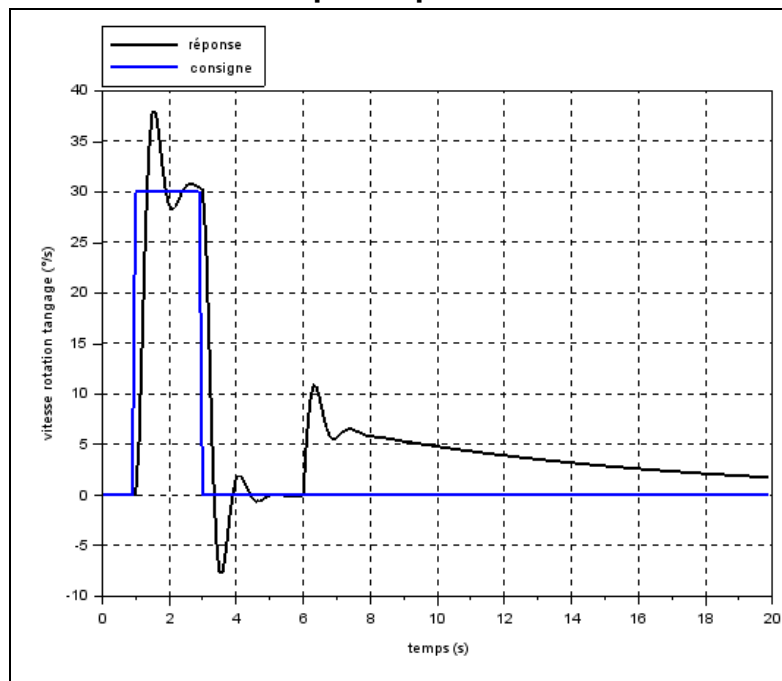
Diagrammes de Bode correspondants



Modélisation de la perturbation

Q11 Commenter la conséquence de la perturbation sur la position finale.

On modifie le correcteur par : $K_p = 0.5$ $K_i = 0.05$ $K_d = 0$



Q12 Commenter le comportement en fonction du réglage du correcteur. Proposer une action sur la correction pour diminuer le temps de réponse après perturbation.

Q13 Représenter le lieu de fonctionnement du système pour une pulsation ω croissante dans le plan complexe et localiser le point -1. Justifier sa stabilité.