

Systeme de télé-échographie robotisé :

Bareme sur 30 points:

Partie 1 sur 18 points

Sous partie 2 sur 12 points

Sous partie 3 sur 12 points

« MELODY »

CORRECTION

Sous-partie.1.

Analyser la transmission d'information entre la sonde fictive et la sonde réelle

Question 1.1 À partir de la présentation précédente, **donner** deux avantages (en les argumentant) de la solution d'échographie robotisée MELODY.

2 pts

- ✓ De répondre à une problématique grandissante de désertification médicale (manque d'experts) en **s'affranchissant de la distance** entre un médecin échographe et son patient (évitant des déplacements longs, fatigants et coûteux).
- ✓ **D'optimiser le diagnostic par un acte fiable et précis** afin d'apporter un soin pertinent et rapide (télé-expertise possible) selon les pathologies (en évitant ainsi la dégradation éventuelle de l'état de santé du patient).
- ✓ **De mettre en sécurité** l'expert en cas de pandémie (évitant ainsi une contagion par manque de distanciation physique).
- ✓ **De réaliser cet acte dans des lieux particuliers** (centres carcéraux, Ehpad, plateforme pétrolière, etc.) ou la distanciation sanitaire et/ou sécuritaire est nécessaire.

Analyse du fonctionnement de la sonde fictive dans son espace d'orientation (ψ , θ et φ)

Question 1.2 **Justifier** l'importance de la « contrainte d'étalonnage initiale du système (id = 1.4) », dans le diagramme SysML d'exigences. **En déduire**, parmi les trois groupes de grandeurs physiques acquises par la centrale inertielle, celle permettant l'obtention d'un repère absolu ?

2 pts

✓ Cette prise de repère initiale « absolue » va permettre à chaque redémarrage du système de rapidement synchroniser la sonde fictive avec le positionnement réel du patient. Elle permettra au médecin une prise de contrôle immédiate du robot en faisant correspondre plus rapidement le positionnement de la sonde avec l'organe ou la partie à analyser sur le patient distant, et ce quelles que soient son orientation et celle du bras robotisé.

✓ La grandeur physique contribuant à ce repérage absolu est celle concernant la mesure du champ magnétique terrestre (selon les trois axes X, Y et Z au niveau du capteur U1).

Cette disposition participe à la notion de « transparence robotique », visant à réduire au maximum l'impact physique et émotionnel d'une telle structure sur le patient lors de l'examen !

Question 1.3 Lorsque la sonde fictive est maintenue, par le praticien, parfaitement verticale (donc dans l'axe Z_0), **précisez** quelles composantes axiales X_n et/ou Y_n et/ou Z_n subissent une accélération. **Donnez** pour chacune les valeurs algébriques de ces accélérations.

2 pts

✓ Les accélérations selon les directions X_n et Y_n seront nulles, tandis que celle perçue selon la direction Z_n sera égale à $-9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, car induite exclusivement par la gravité terrestre (et opposée au sens naturel de détection de la centrale inertielle).

Question 1.4

DR1 : tableau des positions de la sonde fictive.

À partir des éléments de la **figure 4** et du relevé de la **figure 5**, et sachant que la position initiale **1** de la sonde fictive est verticale :

- ✓ **identifier** les positions de la sonde sur les phases **2**, **4** et **5** ;
- ✓ **décrire** l'intégralité du mouvement réalisé par la sonde (sur les 12 s visualisées) et l'intérêt d'une telle manipulation, en complétant le tableau du document réponse **DR1** ;
- ✓ **préciser** pour chaque phase les valeurs numériques approximatives des accélérations **Acc_X_n**, **Acc_Y_n** et **Acc_Z_n**.

Voir DR1 en annexe

3 pts

Question 1.5

Écrire la relation entre la valeur **Acc_Z_n**, **g** et l'angle **θ**. **Calculer** la valeur de l'angle **θ** (déplacement angulaire de l'axe **Z_n** autour de **X₀**) à l'instant **t = 17,600 s**.

- ✓ À l'aide du tableau, pour la valeur **t = 17,600 s**, la composante **Acc_Z_n ≈ - 8,84 m·s⁻²**.

2 pts

$$\begin{aligned} \text{Soit } \cos \theta &= -\text{Acc_Zn} / g \\ \theta &= \cos^{-1} (-\text{Acc_Zn} / g) \\ \theta &= \cos^{-1} (8,80 / 9,81) \\ \theta &\approx 26,2^\circ \end{aligned}$$

Question 1.6

D'après le diagramme des exigences, la sonde réelle pourrait-elle répondre à cette consigne angulaire ? **Justifier** la réponse par des valeurs numériques.

1 pt

Absolument, car l'inclinaison maximale de la sonde réelle autorisée par le bras robotisé est fixée à **60° max**, bien au-delà de l'angle de **25°** imposé par la sonde fictive pour cette question.

Question 1.7

À partir des informations de la **figure 8**, **montrer** que les valeurs hexadécimales des trois accélérations présentes sur cette trame correspondent (en norme) à celles de la **figure 6** (pour la position inclinée stable de la sonde fictive dans le plan).

Détailler cette explication par un calcul pour chaque accélération.

1 pt

$$\begin{aligned} \text{Acc_Yn} : \$006B &\Rightarrow 107_{10} \times 0,0383 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 4,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} (\approx 4,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}) \\ \text{Acc_Xn} : \$0001 &\Rightarrow 1_{10} \times 0,0383 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 0,0383 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} (\approx 0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}) \\ \text{Acc_Zn} : \$00E7 &\Rightarrow 231_{10} \times 0,0383 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 8,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} (\approx 8,84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}) \end{aligned}$$

$$\sqrt{(\text{Acc_Xn})^2 + (\text{Acc_Yn})^2 + (\text{Acc_Zn})^2} = g \text{ soit l'accélération de la pesanteur } 9,81 \text{ m/s}^2$$

Question 1.8 À partir des informations de la **figure 9** :

2 pt

✓ **retrouver** la valeur hexadécimale de la consigne angulaire d'orientation φ présente dans cette trame ;

✓ sachant qu'elle est codée en dixième de degré, **déterminer** la valeur numérique réelle de cette consigne.

$$\text{\$CE} = 206_{10}$$

$$\text{\$05**} = 5 * 16^2 = 1280_{10} \quad \varphi \Rightarrow \text{\$05CE} \Rightarrow 1486_{10}, \text{ soit } \varphi_{\text{réel}} = 148,6^\circ$$

Question 1.9 À partir des informations de la **figure 10** et des éléments de langage spécifique du tableau **figure 11**, **compléter** sur le document réponse **DR2** le programme python « checksum.py » partiel permettant de calculer le code détecteur d'erreur (ou checksum) spécifique à cette partie de trame.

DR2 : programme python.

3 pts

Voir DR2 en annexe

Sous-partie 2. Analyse du bras robotisé et de son pied porteur

Question 1.10 À l'aide du diagramme SysML page 6, **préciser** les exigences (en termes de normes ISO) concernant le matériau de la pièce 1 (Base) en contact avec la peau du patient. La pièce 2 (Sonde réelle) est soumise aux mêmes exigences mais n'est pas fournie avec le robot MELODY.

2 pts

Puis, à l'aide du tableau du statut de biocompatibilité des matériaux ci-après, **proposer** un matériau pour chaque élément – la base et la sonde réelle - en adéquation avec les normes ISO imposées, ainsi que leur couleur.

Normes imposées sur diagramme des exigences :

Normes **ISO 10993-5** et **ISO 10993-10**

Matériau retenu sur la base des normes précédentes :

Base : **Ketron Classix LSG PEEK blanc**

Sonde réelle : **Ketron LSG PEEK gris et noir**

Question 1.11 À l'aide du diagramme SysML des exigences en page 6 :

2 pts

✓ **en déduire** la valeur de la force ponctuelle $F_{S/C}$ maximale que la sonde réelle peut appliquer sur le corps du patient ;

✓ **calculer** la raideur (k) du ressort placé au-dessus de la sonde réelle.

Exigence sur diagramme des exigences : **$F_{\text{max}} = 20\text{N}$**

$$F_{S/C \text{ max}} = k \times \Delta L, \text{ soit } k = F_{S/C \text{ max}} / \Delta L = 20 / 2,6 = \mathbf{7,69 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-1}}$$

Question 1.12 **Expliquer** pourquoi la configuration avec le bras déployé est retenue comme cas critique.

1 pt

Le bras de levier entre le centre de gravité du robot et celui du pied porteur est maximum lorsque le bras est déployé.

Question 1.13 On considère sur la **figure 17** l'ensemble pied porteur + robot Melody en plan. Le point A représente les deux roues situées à droite du pied et le point B représente les deux roues situées à gauche du pied. En isolant le pied porteur et le robot Melody, **établir** un bilan des actions mécaniques et les **dessiner** sur le document réponse **DR3**. Le calcul des réactions d'appui n'est pas demandé.

DR3 : Bilan des actions mécaniques.

4 pts au total

2 pts bilan de AM

Voir DR3 en annexe

2 pts(0,5 chaque force dessinée)

Question 1.14 Au repos, **préciser** le point de basculement du pied porteur.

1 pt

Le point A est le point de basculement à l'équilibre.

Question 1.15 En appliquant le Principe Fondamental de la Statique au point A **déterminer** la norme de la réaction d'appui au point B sachant que la masse du robot Melody est de 4 kg.

2 pts

Sachant que la limite de basculement correspond à une réaction d'appui au point B nulle., **conclure** quant au risque de basculement de l'ensemble pied « porteur + robot ».

Le PFS appliqué en A donne l'équation : $P_2 \times 1380 - P_1 \times 140 + R_B \times 480 = 0$

Avec $P_1 = m_1 \times g$ et $P_2 = m_2 \times g$

On aboutit à $R_B = 58,9 \text{ N}$

La norme de R_B est non nulle, il n'y aura donc pas basculement de l'ensemble pied porteur + robot.

Choix 2 – Sous-partie 3. Analyse du fonctionnement du bras robotisé dans son espace « articulaire ».

Question 1.16

DR4 : chaîne de puissance.

À partir du diagramme de définition de blocs internes de la chaîne de puissance du mécanisme de déplacement de la sonde réelle de la page suivante, **compléter** le document réponse **DR4** :

2,5 pts

(5 sur 6 informations bien complétées)

- ✓ en **indiquant** précisément la nature des puissances repérées **①**, **②** et **③** ;
- ✓ en **nommant** les éléments structurels **④** et **⑤** réalisant les deux blocs fonctionnels « convertir » et « transmettre » ;
- ✓ et enfin en **précisant** la nature de la valeur ajoutée **⑥** en sortie du système.

Voir DR4 en annexe

Question 1.17 **Caractériser** les natures des mouvements de la sonde réelle pendant la **phase 1** ($0 < t < 0,334$ s), la **phase 2** ($0,334$ s $< t < 1,5$ s) et la **phase 3** ($1,5$ s $< t < 2$ s).

1,5 pts

Pendant la **phase 1**, la sonde a **un mouvement circulaire uniformément accéléré**, car la vitesse varie de manière linéaire.

Pendant la **phase 2**, le mouvement est **un mouvement circulaire uniforme**, la vitesse est constante.

Pendant la **phase 3**, la sonde a **un mouvement circulaire uniformément décéléré**, car la vitesse varie de manière linéaire.

Question 1.18 À partir de la vitesse V_P du point P , pendant la phase 2 et de sa position :

1,5 pts

- ✓ **calculer** la vitesse angulaire de rotation maximale (ω_{max} en $\text{degré} \cdot \text{s}^{-1}$), ainsi que la fréquence de rotation maximale (N_{max} en $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$) de la sonde réelle ;
- ✓ **déterminer** également la valeur maximale de l'accélération angulaire α_s au cours de la phase 1.

$$\omega_{\text{max}} = V_P / r = 0,312 / 0,109 = 2,86 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \text{ soit } 164 \text{ degré} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$N_{\text{max}} = (30 \times \omega_{\text{max}}) / \pi = 27,3 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\alpha_s = \omega_{\text{max}} / (t - t_0) = 2,86 / (0,334 - 0) = 8,56 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

accélération angulaire = $d\omega / dt = (\omega_{\text{Maxi}} - \omega_0) / (t_1 - t_0)$ lus sur le graphe lors de la phase 1

Question 1.19

$$C_m = J_G \times \alpha_s = 0,356 \times 8,56 = 3,05 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Choix du moteur : MT-8A-50 $\Rightarrow$ Sous dimensionné au niveau couple,

MT-8A-100 $\Rightarrow$ Optimisé au niveau dimensionnement (couple / vitesse),

MT-11A-50 $\Rightarrow$ Surdimensionné pour les besoins ...

1 pt

Pour la correction : le choix ne portant ici que sur les deux grandeurs couple et vitesse, la sélection de la référence **moteur MT-11A-50** est donc possible. Le barème de correction intégrera cette spécificité en considérant cette réponse partiellement juste en regard de la question posée ... et de la mention explicite « **la mieux adaptée** ».

Question 1.20 Sachant que l'électronique de la partie traitement comptabilise à la fois les **fronts montants** et les **fronts descendants** des deux signaux A et B :

1,5 pts

- ✓ **calculer** la plus petite valeur angulaire β_{min} détectable au niveau de l'axe de sortie du moteur avant réduction de vitesse ;
- ✓ **calculer**, en intégrant désormais la réduction présente en sortie du motoréducteur, la valeur angulaire théorique β_{smin} détectable en sortie de mécanisme ;
- ✓ **conclure** en comparaison de la précision de positionnement minimale évoquée dans le diagramme des exigences.

$$\beta_{min} = 360^\circ / (4_{\text{FRONTS DETECTABLES}} \times 1024) \approx 0,088^\circ$$

$\beta_{smin} = \beta_{min} \times r \approx 0,00088^\circ$, bien inférieure à celle de $0,1^\circ$ préconisée dans le diagramme des exigences.

Question 1.21 **Justifier** les rôles des blocs « PWM Generation » et « Four-Quadrant Chopper1 » (anglicismes respectifs de « génération d'une modulation en largeur d'impulsion, autre acronyme MLI » pour le premier et de « pont en H » pour le second) dans la structure multi-physique de la **figure 22**.

2 pts

- ✓ « **PWM Generation** » : Ce bloc assure la création d'un signal, classiquement de fréquence fixe, dont le rapport cyclique varie en fonction d'un signal (ou d'un paramètre spécifique) en l'occurrence ici, l'erreur de consigne en vitesse (err_corr).
- ✓ « **Four-Quadrant Chopper1** » : Ce bloc assure (sous le contrôle de la modulation « en largeur d'impulsion »), le transfert énergétique en direction du moteur afin de contrôler sa vitesse et son sens de rotation. Il intervient également sur des phases transitoires de récupération d'énergie optimisant ainsi la commande dynamique du moteur.

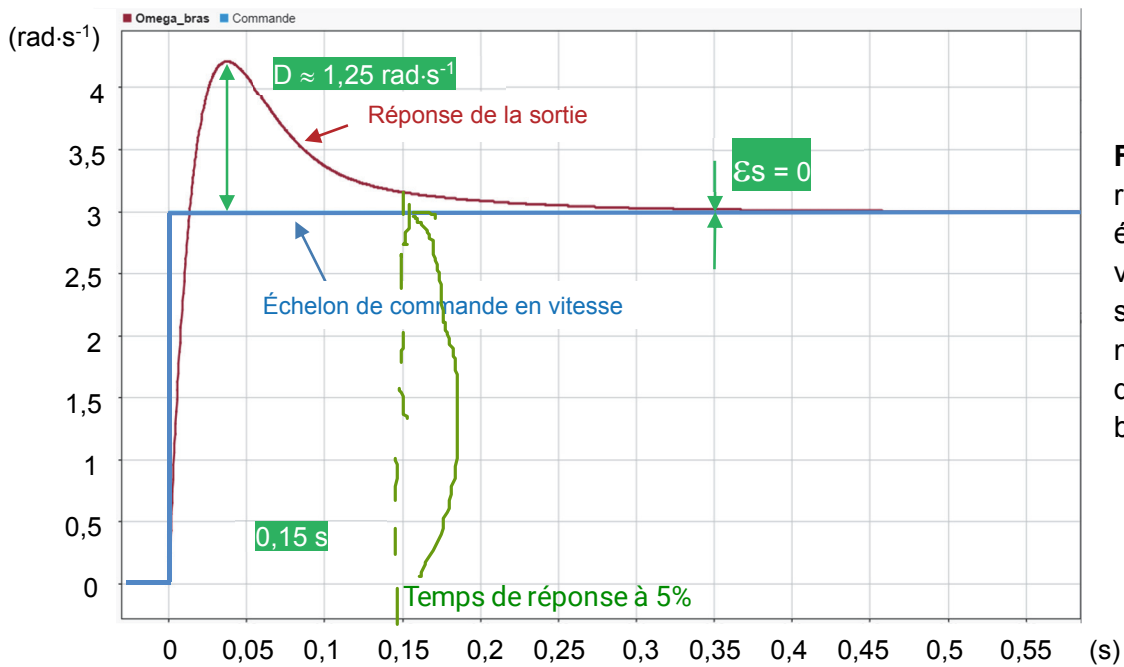
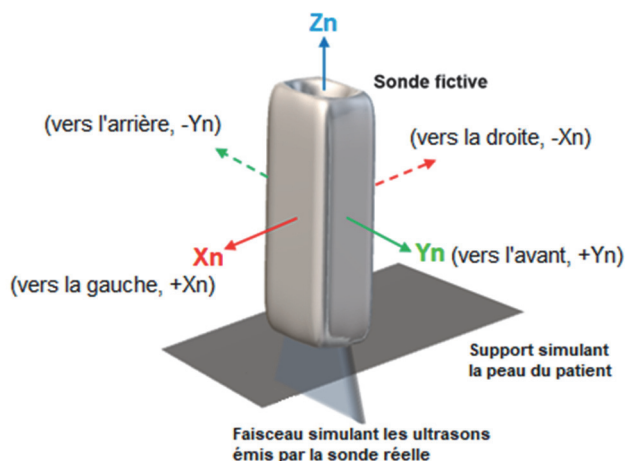


Figure 23 : réponse à un échelon de vitesse de la structure multi-physique du bras 1 en boucle fermée.

Question C.7 **Recenser** deux critères, issus de la **figure 23**, vous permettant d'évaluer la qualité de l'asservissement réalisé dans le cadre du contrôle en vitesse du bras 1, en termes de performances (précision, stabilité, rapidité).

Question 1.22
2 pts

- ✓ L'erreur « statique » (ϵ_s) est nulle, induisant une parfaite similitude entre la vitesse de consigne maximale (ici 3 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) et celle résultante du bras. Cette donnée est conforme à celle évoquée dans le diagramme des exigences.
- ✓ Le dépassement ($D \approx 1,25 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) est « contenu » dans les limites imposées par le diagramme des exigences, à savoir inférieur ou égal à 1,35 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (45% de l'échelon de 3 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$).



Phase	Position de la sonde fictive
① soit à $t = 15,5 \text{ s}$	Sonde « verticale » $\text{Acc_Xn} \approx 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{Acc_Yn} \approx -0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{Acc_Zn} \approx -1 \text{ g}$
② soit à $t = 19 \text{ s}$	Sonde « inclinée vers la droite » ou rotation positive d'axe $(0; \vec{y})$ $\text{Acc_Xn} \approx -6,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{Acc_Yn} \approx 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{Acc_Zn} \approx -7,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
③ soit à $t = 21 \text{ s}$	Sonde « verticale » $\text{Acc_Xn} \approx 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{Acc_Yn} \approx -0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{Acc_Zn} \approx -1 \text{ g}$
④ soit à $t = 23 \text{ s}$	Sonde « inclinée vers la gauche » ou rotation négative d'axe $(0; \vec{y})$ $\text{Acc_Xn} \approx 5,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{Acc_Yn} \approx -0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{Acc_Zn} \approx -8,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
⑤ soit à $t = 26 \text{ s}$	Sonde « verticale » $\text{Acc_Xn} \approx 0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{Acc_Yn} \approx -0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{Acc_Zn} \approx -1 \text{ g}$
Description et intérêt du mouvement final (association des phases ①, ②, ③, ④ et ⑤) réalisé par la sonde fictive du praticien, durant un examen en conditions réelles (présence d'un patient distant).	Le praticien positionne la sonde verticalement ①, puis décide de l'incliner vers la droite ② afin de déplacer l'orientation des ultrasons dans les tissus. Il la repositionne ensuite verticalement ③, puis décide de l'incliner vers la gauche ④ afin que le balayage de la zone et la recherche (ou scrutation d'un point particulier sous la peau du patient) soit la plus complète possible. Il termine enfin l'analyse en la repositionnant verticalement ⑤.

Pour la correction : les valeurs numériques des accélérations données par les élèves peuvent être très approximatives. Elles ne sont que le prétexte pour appréhender la position (élément prépondérant au niveau de la correction), sur chaque phase, de la sonde fictive dans l'espace.

0x5443= 11000010 01001100 = 49740₁₀
 0x0102= 1 00000010 = 258₁₀
 + = 11000011 01001110 = 49998₁₀

Programme "checksum.py"

**liste=[0x54, 0x43, 0x01, 0x02, 0x02, 0x44, 0x00, 0x01,
 0xda, 0x22, 0x05, 0xff, 0x00, 0x3a, 0x05, 0xce]**

Liste d'octets de l'entête Trame au paramètre φ

n=len(liste) # extraction du nombre n d'octets de la liste précédente

checksum,i=0,0 # initialisation des variables

while i < n :

N.B : 16 est également accepté à la place de « n »

val=(liste[i] << 8) + liste[i+ 1]

N.B : le « | » est également accepté à la place du « + »

checksum = checksum + val

i=i+ 2

checksum=(~checksum & 0xffff)

le ET logique permet d'écrire tout le mot
complet de 16 bit

& 0xffff pour l'écriture du résultat final sur un format de 16 bits

(...)
Identification
des zones du
programme à
compléter

print ("Checksum sur 16 bits :", hex(checksum))

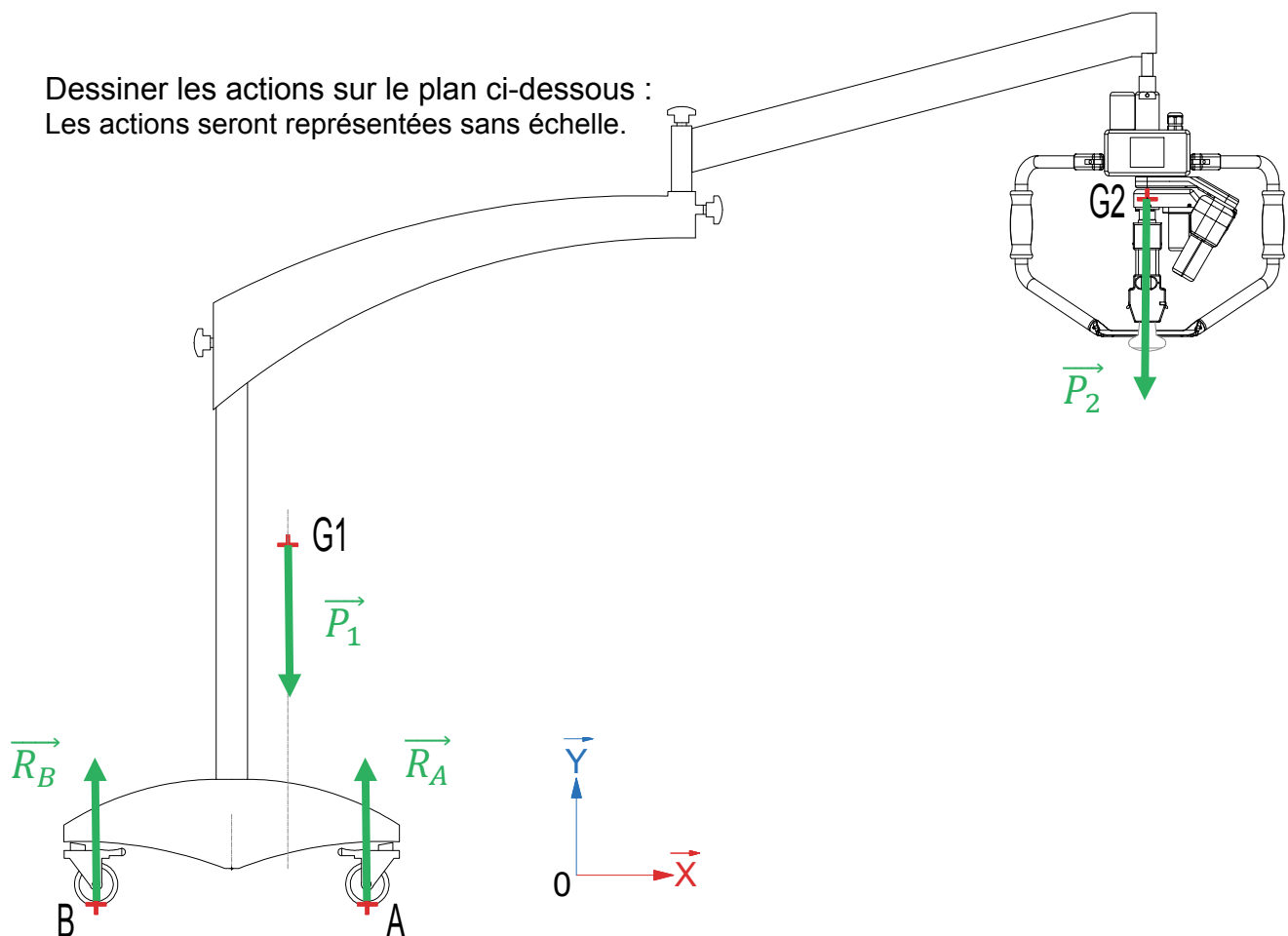
Affichage du code détecteur d'erreur en hexadécimal

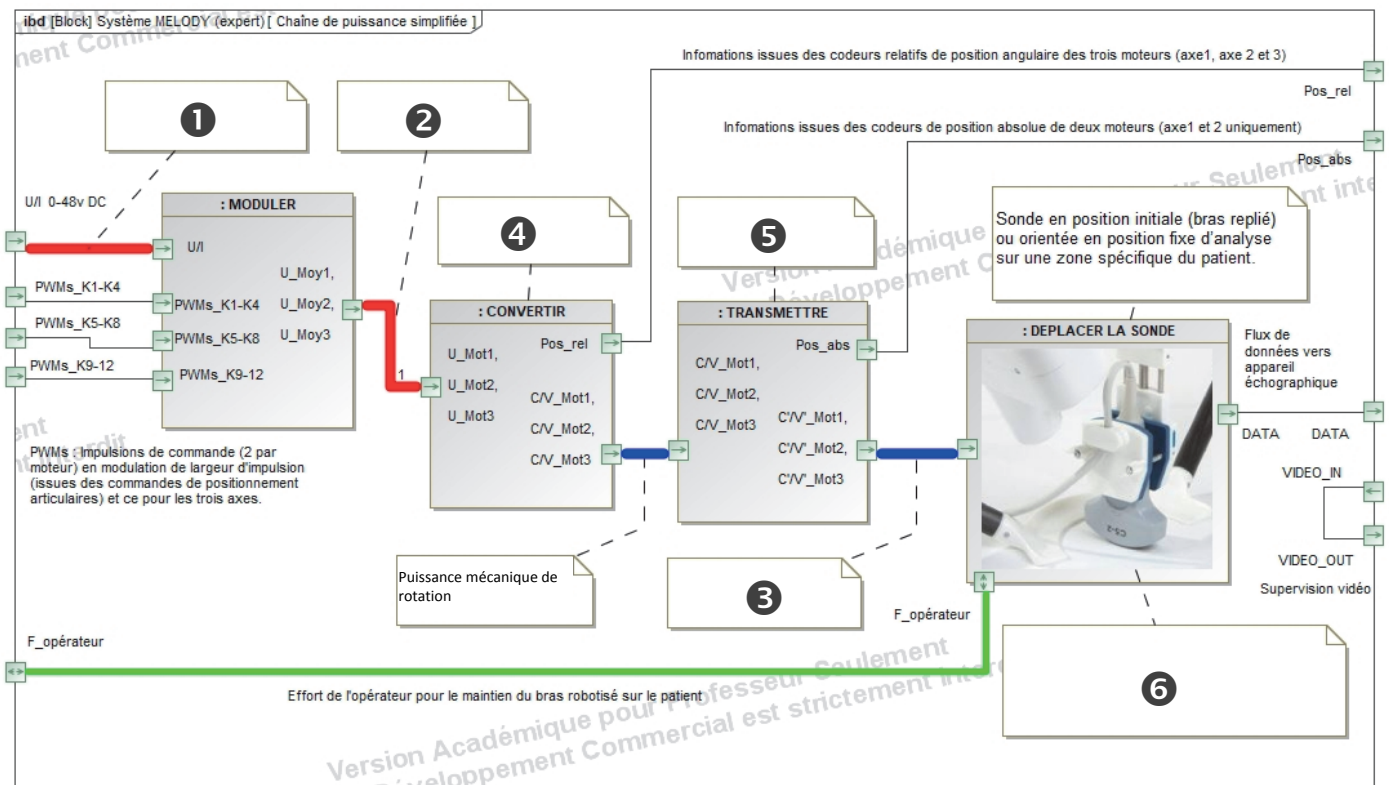
→ inversion bit à bit, c'est à dire 0 devient 1 et 1 devient 0

Établir le bilan des actions mécaniques:

Nom	Point d'application	Sens	Direction	Norme
$\vec{R}_A$	A	Vertical	Vers le haut	R_A
$\vec{R}_B$	B	Vertical	Vers le haut	R_B
$\vec{P}_1$	G₁	Vertical	Vers le bas	$m_1 \times g = 60 \times 9,81 = 588,6 \text{ N}$
$\vec{P}_2$	G₂	Vertical	Vers le bas	$m_2 \times g = 3 \times 9,81 = 29,5 \text{ N}$

Dessiner les actions sur le plan ci-dessous :
Les actions seront représentées sans échelle.





- ① : Energie électrique « constante »,
- ② : Energie électrique « modulée »,
- ③ : Energie mécanique « de rotation »,
- ④ : Moteur électrique,
- ⑤ : Réducteur ou Engrenage(s) et courroie(s) ,
- ⑥ : Bras déplié et rotation de la sonde sur une nouvelle position d'analyse spécifique du patient.