

Le sismomètre SEIS

Corrigé UPSTI

1 Présentation

2 Réglage de la position d'équilibre du pendule

- Objectif -

Définir la position d'équilibre du pendule et valider l'exigence 1.1 de réglage à distance de cette position.

Question 1 Par application du Principe Fondamental de la Statique au pendule (2) à l'équilibre sur Mars, lorsque $\alpha(t) = \alpha_{eq}$, exprimer le moment de précontrainte C_0 en fonction des autres paramètres de l'étude. Préciser le bilan des actions mécaniques extérieures, le théorème appliqué et les éléments d'application du théorème (projection, point éventuel...).

(2) est soumis à

- l'action du bâti $\{\mathcal{T}_{1 \rightarrow 2}\}$ (donnée en annexe)
- l'action du ressort $\{\mathcal{T}_{ressort \rightarrow 2}\}$ (donnée en annexe)
- la pesanteur $\{\mathcal{T}_{pes \rightarrow 2}\} = \left\{ \begin{matrix} -g_M M \vec{y}_1 \\ \vec{0} \end{matrix} \right\}_G = \left\{ \begin{matrix} -g_M M \vec{y}_1 \\ \vec{O_1 G} \wedge (-g_M M \vec{y}_1) \end{matrix} \right\}_{O_1} = \left\{ \begin{matrix} -g_M M \vec{y}_1 \\ dg_M M \sin(\alpha) \vec{z}_1 \end{matrix} \right\}_{O_1}$

Le Théorème du Moment Statique (TMS) en O_1 projeté sur $\vec{z}_1$ donne :

$$-\mu \dot{\alpha}(t) + C_0 - k(\alpha(t) - \alpha_0) + dg_M M \sin(\alpha(t)) = 0$$

d'où avec $\alpha(t) = \alpha_{eq}$: $C_0 = -dg_M M \sin(\alpha_{eq}) + k(\alpha_{eq} - \alpha_0)$

Question 2 Calculer le moment en N.mm sur l'axe de rotation du pendule, généré par le déplacement de la masse m , en supposant $\alpha_{eq} = \alpha_0$. Conclure vis-à-vis de l'exigence 1.1.

Avec $\alpha_{eq} = \alpha_0$, on adapte le calcul du moment de la pesanteur effectué ci-dessus pour obtenir, dans les positions extrêmes de la masselotte :

$$\overrightarrow{M_{pes \rightarrow 2}}(O_1) \cdot \vec{z}_1 = dg_M(M - m) \sin \alpha_0 + (d \pm \frac{c}{2}) g_M m \sin \alpha_0 = \overrightarrow{M_{pes \rightarrow 2}}(O_1) \cdot \vec{z}_1 (\text{sans défaut}) \pm \frac{c}{2} g_M m \sin \alpha_0$$

On peut donc faire varier le moment $\Delta M = \pm \frac{c}{2} g_M m \sin \alpha_0$

$$\text{A.N. : } \Delta M = \frac{18}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot \frac{1}{2} \text{ d'où } \Delta M \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ N.m} > 0.9 \text{ N.mm}$$

1.1 est bien respectée

3 Sensibilité intrinsèque d'un pendule à un séisme

- Objectif -

Mettre en évidence la grandeur physique à laquelle le pendule est sensible lors d'un séisme, ainsi que ses

caractéristiques dynamiques, en vue du réglage de sa commande.

Question 3 Déterminer, dans son mouvement par rapport au repère R_0 , l'expression du moment cinétique du pendule (2) en O_1 , $\vec{\sigma}_{O_1,2/R_0}$. On l'exprimera en fonction des paramètres cinétiques de (2) et des paramètres géométriques et cinématiques du système.

$$\vec{\sigma}_{O_1,2/R_0} = \bar{I}_{(O_1,2)} \vec{\Omega}_{2/0} + M \overrightarrow{O_1 G} \wedge \vec{V}_{O_1,2/R_0}$$

$$\text{avec } \vec{\Omega}_{2/0} = \vec{\Omega}_{2/1} + \vec{\Omega}_{1/0} = \dot{\alpha}(t) \vec{z}_1$$

$$\text{et } \vec{V}_{O_1,2/R_0} = \vec{V}_{O_1,2/1} + \vec{V}_{O_1,1/R_0} = \vec{0} + V_x(t) \vec{x}_1 + V_y(t) \vec{y}_1$$

$$\text{d'où } \vec{\sigma}_{O_1,2/R_0} = \dot{\alpha}(t) J \vec{z}_1 + M(d \vec{y}_2) \wedge (V_x(t) \vec{x}_1 + V_y(t) \vec{y}_1)$$

$$\boxed{\vec{\sigma}_{O_1,2/R_0} = [\dot{\alpha}(t)J - Md(V_x \cos \alpha + V_y \sin \alpha)] \vec{z}_1}$$

Question 4 Montrer que la projection sur $\vec{z}_1$ du moment dynamique du pendule (2) dans son mouvement par rapport au repère R_0 en O_1 , est de la forme donnée.

$$\vec{\delta}_{O_1,2/R_0} = \left. \frac{d}{dt} \vec{\sigma}_{O_1,2/R_0} \right|_{R_0} + M \vec{V}_{O_1/R_0} \wedge \vec{V}_{G,2/R_0}$$

$$\text{Or } \vec{V}_{G,2/R_0} = \vec{V}_{G,2/1}(\text{rotation}) + \vec{V}_{G,1/R_0}(\text{translation} = \vec{V}_{O_1/R_0})$$

$$\begin{aligned} \text{soit } \vec{V}_{O_1/R_0} \wedge \vec{V}_{G,2/R_0} &= (V_x(t) \vec{x}_1 + V_y(t) \vec{y}_1) \wedge (-d\dot{\alpha} \vec{x}_2 + V_x(t) \vec{x}_1 + V_y(t) \vec{y}_1) \\ &= (V_x(t) \vec{x}_1 + V_y(t) \vec{y}_1) \wedge (-d\dot{\alpha} \vec{x}_2) \\ &= d\dot{\alpha} (-V_x \sin \alpha + V_y \cos \alpha) \vec{z}_1 \end{aligned}$$

$$\text{d'où } \vec{\delta}_{O_1,2/R_0} = \left[J\ddot{\alpha} - Md \left(-V_x \dot{\alpha} \sin \alpha + \dot{V}_x \cos \alpha + V_y \dot{\alpha} \cos \alpha + \dot{V}_y \sin \alpha \right) + Md\dot{\alpha} (-V_x \sin \alpha + V_y \cos \alpha) \right] \vec{z}_1$$

$$\text{soit après simplification : } \boxed{\vec{\delta}_{O_1,2/R_0} = J\ddot{\alpha} - dM \underbrace{(\dot{V}_x \cos \alpha + \dot{V}_y \sin \alpha)}_{\gamma_{x_2}(t)}}$$

Remarque : On retrouve bien uniquement les composantes de la dérivée de $\vec{V}_{O_1,1/R_0} = (V_x(t) \vec{x}_1 + V_y(t) \vec{y}_1)$ en projection sur $\vec{x}_2$ d'où le nom γ_{x_2} .

Remarque : On aurait pu effectuer les calculs en G avant de déplacer le résultat en O_1 (calculs légèrement plus rapides), mais la question 3 impose le calcul complet en O_1 .

Question 5 Préciser, sans faire de calculs, le système isolé et l'équation issue du Principe Fondamental de la Dynamique qui permet d'obtenir l'équation du mouvement donnée. Donner les éléments d'application (équation, projection, point éventuel...) du théorème utilisé. Justifier que l'équation obtenue n'est pas linéaire, indépendamment de l'expression de γ_{x_2} .

On isole (2) puis on applique le TMD en O_1 projeté sur $\vec{z}_1$ pour obtenir (eq. 1).

Le terme en $\sin \alpha(t)$ est non-linéaire.

Remarque : La forme de (eq. 1) permet de vérifier la Question 1.

Question 6 Montrer que l'équation du mouvement linéarisée s'écrit sous la forme donnée.

$$\text{On pose } \alpha(t) = \alpha_0 + \Delta\alpha(t)$$

$$\text{Ainsi, } \dot{\alpha}(t) = \dot{\Delta\alpha}(t) \text{ et } \ddot{\alpha}(t) = \ddot{\Delta\alpha}(t)$$

$$\text{A l'ordre 1, on a : } \underbrace{\sin(\alpha_0 + \Delta\alpha(t))}_{\alpha(t)} = \sin \alpha_0 + \Delta\alpha(t) \cos \alpha_0 + O(\Delta\alpha^2)$$

$$\text{d'où } \boxed{J\ddot{\Delta\alpha} + \mu\dot{\Delta\alpha} + k\Delta\alpha = dMg_M\Delta\alpha(t) \cos \alpha_0 + dM\gamma_{x_2}} + \underbrace{dMg_M \sin \alpha_0 + C_0}_{=0 \text{ d'après Q1 avec } \alpha_{eq}=\alpha_0}$$

Question 7 Exprimer, sous forme canonique, la fonction de transfert du pendule $\frac{\alpha(p)}{\gamma_{x_2}(p)}$ et donner la condition de stabilité du pendule sous la forme d'une inéquation. Conclure sur le rôle stabilisateur du ressort.

Dans les condition de Heaviside, (eq. 2) donne : $Jp^2\alpha(p) + \mu p\alpha(p) + k\alpha(p) = dMg_M\alpha(p) \cos \alpha_0 + dM\gamma_{x_2}(p)$

$$\text{d'où } \frac{\alpha(p)}{\gamma_{x_2}(p)} = \frac{dM}{(k - dMg_M \cos \alpha_0) + \mu p + Jp^2}$$

$$\text{soit } \frac{\alpha(p)}{\gamma_{x_2}(p)} = \frac{\frac{dM}{k - dMg_M \cos \alpha_0}}{1 + \frac{\mu}{k - dMg_M \cos \alpha_0}p + \frac{J}{k - dMg_M \cos \alpha_0}p^2}$$

Cette fonction d'ordre 2 est stable si tous les coefficients de son dénominateur sont de même signe, donc si $k - dMg_M \cos \alpha_0 > 0$, soit $\boxed{k > dMg_M \cos \alpha_0}$

Il faut donc un ressort de raideur k suffisante pour maintenir le système dans un état stable. C'est lui qui permet de compenser le moment de la pesanteur qui déséquilibre ce pendule inversé.

Question 8 Donner, en fonction des constantes du problème, les expressions des constantes caractéristiques de cette fonction de transfert : gain d'amplification mécanique noté A , pulsation propre ω_0 et coefficient d'amortissement ξ .

$$\text{On identifie : } A = \frac{dM}{k - dMg_M \cos \alpha_0}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k - dMg_M \cos \alpha_0}{J}}$$

$$\text{et } \xi = \frac{\omega_0}{2} \cdot \frac{\mu}{k - dMg_M \cos \alpha_0} = \frac{\mu}{2\sqrt{J(k - dMg_M \cos \alpha_0)}}$$

Question 9 Donner l'expression de α_0 permettant de maximiser le gain d'amplification mécanique A .

A est maximal si $k - dMg_M \cos \alpha_0$ est minimal, donc si $\cos \alpha_0$ est maximal : $\alpha_0 = 0$ donne la meilleur amplification.

Question 10 Conclure vis-à-vis de l'exigence 2.2. Les tracés nécessaires devront figurer sur la Figure la Figure A.

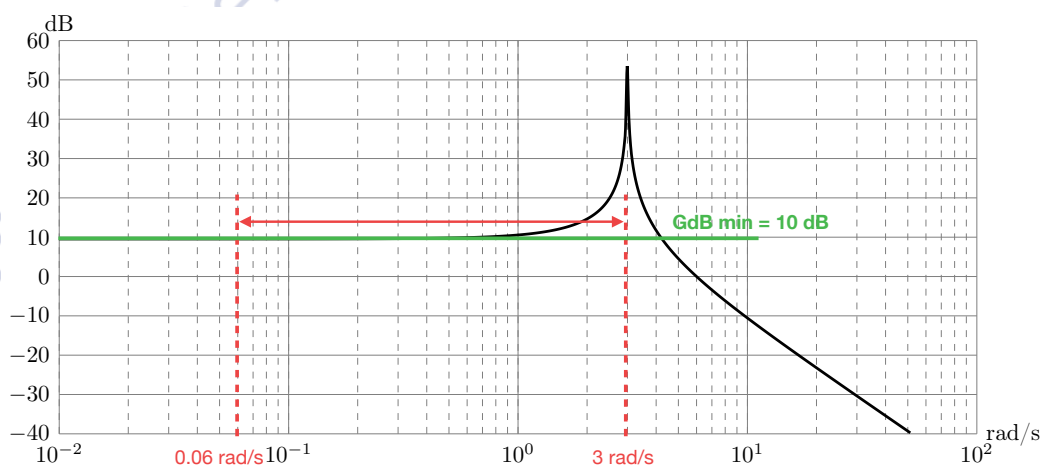


FIGURE A

On constate que le Gain décibel est bien supérieur à 10dB entre 0.06 et 3 rad/s : l'exigence 2.2 est respectée.

Remarque : On peut constater que 2.1 est bien validée également pour $A = 10$ dB, ce qui correspond à $A = 3.1 \text{ rad.m}^{-1}.\text{s}^2$.

4 Optimisation de la réponse d'un pendule à un séisme par un asservissement

- Objectif -

Régler la correction des bobines HF et BF.

Question 11 Déterminer la fonction de transfert $H_\gamma(p) = \frac{U(p)}{\gamma_{x_2}(p)}$, avec $U_C(p) = 0$, en l'exprimant sous la forme donnée.

Avec $U_C(p) = 0$, on obtient par lecture sur le schéma-blocs :

$$U(p) = \frac{K_D}{K + Jp^2} \left[dM\gamma_{x_2}(p) + \frac{K_H}{1 + \tau_H p} K_1 p (-U(p)) \right]$$

$$\text{d'où } \frac{U(p)}{\gamma_{x_2}(p)} = \frac{\frac{dMK_D}{K + Jp^2}}{1 + \frac{K_D}{K + Jp^2} \cdot \frac{K_H}{1 + \tau_H p} K_1 p}$$

$$= \frac{dMK_D(1 + \tau_H p)}{(K + Jp^2)(1 + \tau_H p) + pK_D K_H K_1}$$

$$= \frac{dMK_D}{K} \frac{1 + \tau_H p}{1 + p \left(\tau_H + \frac{K_D K_H K_1}{K} \right) + p^2 \frac{J}{K} + p^3 \frac{J\tau_H}{K}} = K_{HF} \frac{1 + a_1 p}{1 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3}$$

Ce qui permet d'identifier $K_{HF} = \frac{dMK_D}{K}; a_1 = \tau_H; b_1 = \left(\tau_H + \frac{K_D K_H K_1}{K} \right); b_2 = \frac{J}{K}; b_3 = \frac{J\tau_H}{K}$

Question 12 Justifier que $H_\gamma(p)$ correspond à un système stable quelle que soit la valeur retenue pour K_1 dans la gamme $[0.05; 5]$ s. Choisir, en justifiant, la valeur de K_1 parmi les valeurs proposées, la plus adaptée au réglage de l'asservissement avec l'action de la bobine HF seule.

Les pôles sont à partie réelles négatives dans tous les cas présentés, donc $H_\gamma(p)$ correspond toujours à un système stable.

On élimine $K_1 = 0.05$ s car le résultat ne doit pas présenter de résonance. Pour obtenir une Bande Passante à -3dB maximale et respecter l'exigence 3.1, il faut choisir $K_1 = 0.5$ s. Cependant, l'exigence 3.3 n'est respectée dans aucun des cas : à très basse fréquence ($\omega < 0.06$ rad/s), on a toujours une amplification supérieure à 110 dB.

Ce correcteur ne permet pas de respecter l'intégralité des exigences proposées.

Question 13 Justifier que, pour la valeur retenue de K_1 , la fonction de transfert peut s'écrire sous la forme donnée.

Pour $K_1 = 0.5$ s, on a trois pôles réels négatifs, on note alors :

$$H_\gamma(p) = \frac{K_{HF}(1 + \tau_H)}{\left(1 - \frac{p}{p_1}\right) \left(1 - \frac{p}{p_2}\right) \left(1 - \frac{p}{p_3}\right)}$$

or $\tau_H = 0.001$ s d'après l'annexe 4 et par lecture dans la Table 4, $-\frac{1}{p_1} = 0.001$ s. Donc en simplifiant :

$$H_\gamma(p) = \frac{K_{HF}}{(1 + \tau_2 p)(1 + \tau_3 p)}$$

avec $\tau_2 = -\frac{1}{p_2} = -\frac{1}{-2/3} = 1.5 \text{ s}$ et $\tau_3 = -\frac{1}{p_3} = 0.1 \text{ s}$.

Question 14 Justifier que l'asservissement avec l'action de la bobine HF seule ne permet pas de satisfaire les exigences 3.2 et 3.3.

La fonction de transfert en boucle fermée n'a pas de gain unitaire → l'écart statique ne sera donc pas nul en réponse à un échelon, l'exigence 3.2 n'est pas respectée.

On lit sur le diagramme de Bode Figure 5 que $G_{dB} < 110 \text{ dB}$ pour $\omega > 0.7 \text{ rad/s}$, or on veut $G_{dB} \geq 110 \text{ dB}$ jusqu'à $\omega = 3 \text{ rad/s}$, l'exigence 3.3 n'est pas respectée.

Question 15 Préciser l'intérêt de la chaîne d'action BF vis-à-vis de l'exigence 3.2.

La FTBO possède un intégrateur avant la perturbation grâce à la correction PI, l'erreur statique est donc nulle en réponse à un échelon d'accélération (qui est la perturbation dans ce schéma-blocs), 3.2 est respectée.

Question 16 Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte de l'asservissement, $H_{BO} = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)}$. Donner, en justifiant, la valeur retenue pour τ_4 .

$$H_{BO} = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{K_4(1 + \tau_4 p)}{p} \cdot \frac{K_B}{1 + \tau_B p} \cdot \frac{K_D}{K(1 + \tau_2 p)(1 + \tau_3 p)}$$

Or $\tau_B = 0.1 \text{ s}$, $\tau_2 = 1.5 \text{ s}$ et $\tau_3 = 0.1 \text{ s}$. Ainsi on pose $\tau_4 = \tau_2 = 1.5 \text{ s}$ afin de compenser le pôle dominant du système et optimiser la rapidité.

Question 17 Choisir, en justifiant, la valeur de K_4 qui permet de vérifier au mieux les exigences 3.3 et 3.4. Les tracés nécessaires apparaîtront sur la Figure B.

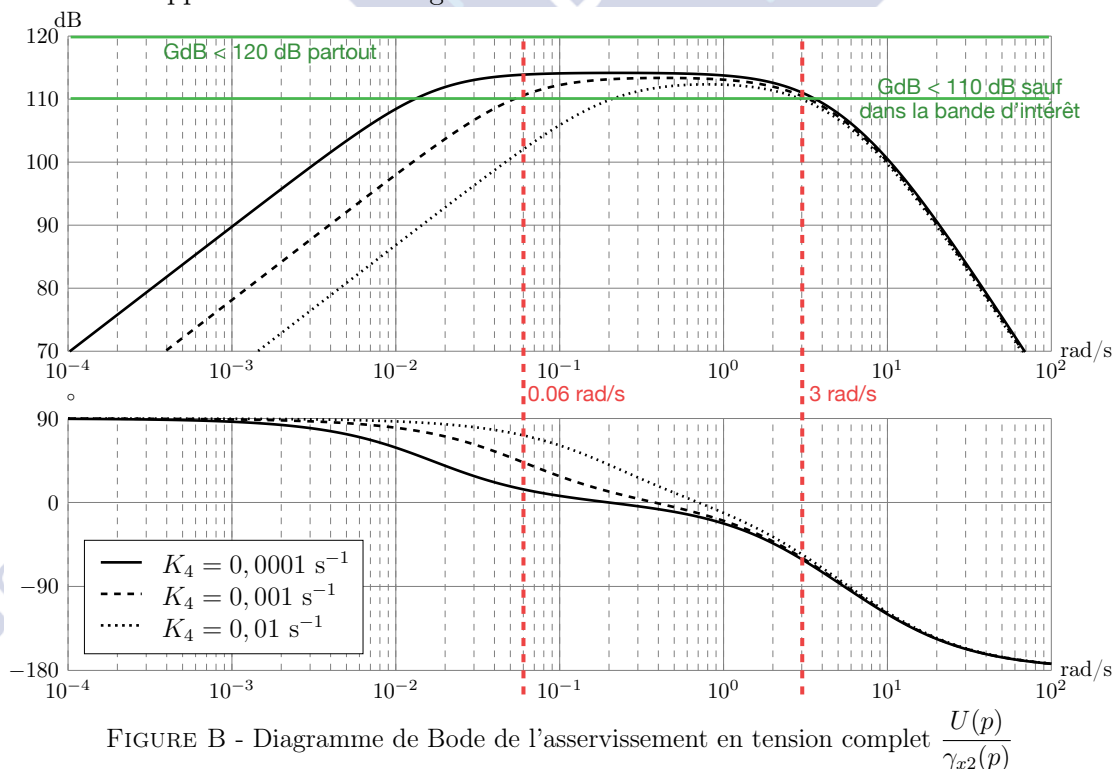


FIGURE B - Diagramme de Bode de l'asservissement en tension complet $\frac{U(p)}{\gamma_{x2}(p)}$

Tous les signaux respectent l'exigence 3.4 car tous les gains sont bien inférieurs à 120 dB.

Le gain $K_4 = 0.001 \text{ s}^{-1}$ permet bien d'amplifier à plus de 110 dB dans la bande d'intérêt mais pas à l'extérieur

de celle-ci : c'est le seul à respecter complètement l'exigence 3.3.

Question 18 Donner le nom du type de filtre réalisé par le pendule asservi et préciser l'intérêt de cette solution pour la mesure des séismes par le sismomètre VBB.

Un filtre passe-bande permet de sélectionner les fréquences d'intérêt (celles des séismes ici) et de les amplifier tout en :

- éliminant le bruit (à HF).
- restant autour d'une position d'équilibre (il n'y a pas d'influence des séismes ou autres perturbations à très basses fréquences, c'est à dire en statique).

5 Insensibilité des pendules au bruit environnant

- Objectif

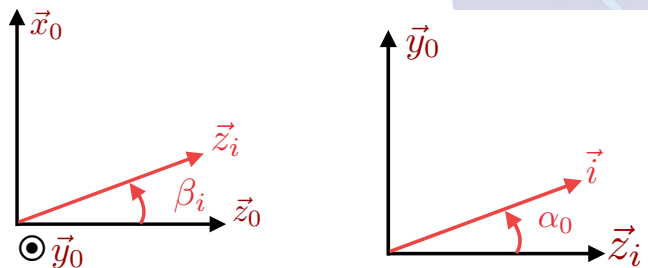
Montrer l'intérêt de la disposition des trois systèmes quant à l'atténuation du bruit environnant.

Question 19 Compléter les 6 termes manquants de la matrice P , en fonction de α_0 , β_u , β_v et β_w .

On définit P telle que :

$$\begin{pmatrix} \gamma_u \\ \gamma_w \\ \gamma_w \end{pmatrix}_{(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})} = P \begin{pmatrix} \gamma_{x_0} \\ \gamma_{y_0} \\ \gamma_{z_0} \end{pmatrix}_{(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)}$$

On trace les figures planes suivantes valables pour $i \in \{u, v, w\}$:



En projetant : $\vec{i} = \cos \alpha_0 \vec{z}_i + \sin \alpha_0 \vec{y}_0 = \cos \alpha_0 (\cos \beta_i \vec{z}_0 + \sin \beta_i \vec{x}_0) + \sin \alpha_0 \vec{y}_0$

En remplaçant i par u, v et w , on obtient la matrice de passage :

$$P = \begin{pmatrix} \cos \alpha_0 \sin \beta_u & \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 \cos \beta_u \\ \cos \alpha_0 \sin \beta_v & \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 \cos \beta_v \\ \cos \alpha_0 \sin \beta_w & \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 \cos \beta_w \end{pmatrix}_{(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)}$$

Question 20 Exprimer la matrice P en fonction de l'angle α_0 uniquement, en utilisant les valeurs numériques $\beta_u = 0^\circ$, $\beta_v = 120^\circ$ et $\beta_w = 240^\circ$.

Les applications numériques donnent alors :

$$\sin \beta_u = 0; \sin \beta_v = \frac{\sqrt{3}}{2}; \sin \beta_w = -\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\text{et } \cos \beta_u = 1; \cos \beta_v = -\frac{1}{2}; \cos \beta_w = -\frac{1}{2}$$

d'où
$$P = \begin{pmatrix} 0 & \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 \\ \cos \alpha_0 \frac{\sqrt{3}}{2} & \sin \alpha_0 & -\frac{\cos \alpha_0}{2} \\ -\cos \alpha_0 \frac{\sqrt{3}}{2} & \sin \alpha_0 & -\frac{\cos \alpha_0}{2} \end{pmatrix}_{(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)}$$

Remarque : On peut vérifier rapidement que $P^{-1}P = I_d$

Question 21 Déterminer les expressions des composantes $\gamma_{x_0}^*$, $\gamma_{y_0}^*$ et $\gamma_{z_0}^*$ en fonction de γ_u , γ_v , γ_w , α_0 et ε , puis en fonction de γ_{x_0} , γ_{y_0} , γ_{z_0} , α_0 et ε . Préciser l'impact du bruit dans chacune des directions de la base b_0 .

$$\vec{\Gamma}_{O_{1,1}/R_0}^* = \begin{pmatrix} \gamma_{x_0}^* \\ \gamma_{y_0}^* \\ \gamma_{z_0}^* \end{pmatrix}_{(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)} = \begin{pmatrix} \gamma_u + \varepsilon \\ \gamma_v + \varepsilon \\ \gamma_w + \varepsilon \end{pmatrix}_{(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})} \quad \text{donc} \quad \begin{pmatrix} \gamma_{x_0}^* \\ \gamma_{y_0}^* \\ \gamma_{z_0}^* \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} \gamma_u + \varepsilon \\ \gamma_v + \varepsilon \\ \gamma_w + \varepsilon \end{pmatrix}$$

$$\text{d'où par produit matriciel : } \gamma_{x_0}^* = (\gamma_v + \varepsilon) \frac{1}{\sqrt{3} \cos \alpha_0} - (\gamma_w + \varepsilon) \frac{1}{\sqrt{3} \cos \alpha_0}$$

$$\text{soit } \boxed{\gamma_{x_0}^* = \frac{\gamma_v - \gamma_w}{\sqrt{3} \cos \alpha_0}}$$

$$\gamma_{y_0}^* = [(\gamma_u + \varepsilon) + (\gamma_v + \varepsilon) + (\gamma_w + \varepsilon)] \frac{1}{3 \sin \alpha_0}$$

$$\text{donc } \boxed{\gamma_{y_0}^* = \left(\frac{\gamma_u + \gamma_v + \gamma_w}{3} + \varepsilon \right) \frac{1}{\sin \alpha_0}}$$

$$\text{Et enfin : } \gamma_{z_0}^* = [2(\gamma_u + \varepsilon) - (\gamma_v + \varepsilon) - (\gamma_w + \varepsilon)] \frac{1}{3 \cos \alpha_0}$$

$$\text{soit } \boxed{\gamma_{y_0}^* = \frac{2\gamma_u - \gamma_v - \gamma_w}{3 \cos \alpha_0}}$$

$$\text{Or } \begin{pmatrix} \gamma_u \\ \gamma_v \\ \gamma_w \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} \gamma_{x_0} \\ \gamma_{y_0} \\ \gamma_{z_0} \end{pmatrix}$$

d'où :

$$\gamma_u = \sin \alpha_0 \gamma_{y_0} + \cos \alpha_0 \gamma_{z_0}$$

$$\gamma_v = \cos \alpha_0 \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma_{x_0} + \sin \alpha_0 \gamma_{y_0} - \frac{\cos \alpha_0}{2} \gamma_{z_0}$$

$$\text{et } \gamma_w = -\cos \alpha_0 \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma_{x_0} + \sin \alpha_0 \gamma_{y_0} - \frac{\cos \alpha_0}{2} \gamma_{z_0}$$

En réintégrant cette forme dans les expressions encadrées ci-dessous, on obtient alors

$$\boxed{\gamma_{x_0}^*} = \frac{\cos \alpha_0 \sqrt{3} \gamma_{x_0}}{\sqrt{3} \cos \alpha_0} = \boxed{\gamma_{x_0}}$$

$$\boxed{\gamma_{y_0}^*} = \left(\frac{3 \sin \alpha_0 \gamma_{y_0}}{3} + \varepsilon \right) \frac{1}{\sin \alpha_0} = \boxed{\gamma_{y_0} + \frac{\varepsilon}{\sin \alpha_0}}$$

$$\boxed{\gamma_{z_0}^*} = \left(\cos \alpha_0 \gamma_{z_0} \left(2 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) \right) \frac{1}{3 \cos \alpha_0} = \boxed{\gamma_{z_0}}$$

Seule la composante verticale de l'accélération est affectée par le bruit.

Remarque : Il est beaucoup plus rapide d'écrire :

$$\begin{pmatrix} \gamma_{x_0}^* \\ \gamma_{y_0}^* \\ \gamma_{z_0}^* \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} \gamma_u \\ \gamma_v \\ \gamma_w \end{pmatrix} + P^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \varepsilon = \underbrace{P^{-1}P}_{I_d} \begin{pmatrix} \gamma_{x_0} \\ \gamma_{y_0} \\ \gamma_{z_0} \end{pmatrix} + P^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \varepsilon$$

ce qui donne presque immédiatement le résultat demandé :-). Cependant l'énoncé demande explicitement le résultat intermédiaire :-).

Question 22 Comment choisir la valeur de α_0 de façon à minimiser l'impact du bruit mesuré? Préciser si

cette valeur est réaliste pour mesurer l'accélération du sol dans les trois directions de l'espace, et si elle permet de maximiser le gain d'amplification mécanique A du pendule comme vu en Q9.

- On minimise ce bruit si $|\sin \alpha_0|$ est maximal, ce qui correspond à $\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$, la valeur maximale possible (pas d'inclinaison du pendule).
- Cette condition est en contradiction avec le résultat de la question 9 qui demande un angle minimal pour maximiser l'amplification du signal.
- Par ailleurs, si $\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$, on ne peut pas identifier les composantes horizontales de l'accélération suivant $\vec{x}_0$ et $\vec{z}_0$. (P n'est plus inversible entre autres conséquences). Cette grandeur n'est pas réaliste.

6 Filtrage et stockage des données mesurées

- Objectif

Estimer le nombre de jours pendant lequel les données mesurées sur Mars sont disponibles pour analyse sur Terre.

Question 23 Donner les fréquences d'échantillonnage en vitesse f_{evmin} et en position f_{epmin} minimales permettant d'éviter le repliement de spectre.

D'après le théorème de Shannon, il faut au moins que $f_{evmin} = 2f_{ev} = 2 \text{ Hz}$ et $f_{epmin} = 2f_p = 0.2 \text{ Hz}$.

Remarque : Notion hors programme de SII en MP, c'est bien au programme de physique par contre.

Question 24 Déterminer la capacité mémoire nécessaire en Mo pour stocker 24 heures de données échantillonnées et numérisées sur 24 bits, soit la vitesse et la position du sol mesurées par les trois systèmes VBB.

$24 \text{ bit} = 3 \times 8 \text{ bit} = 3 \text{ octets}$ par mesure à effectuer.

Pour la vitesse, il faut stocker : $f_{ev} \times 24 \times 3600 \times (3 \text{ octets}) \times 3$ (nb capteurs)

et pour la position : $f_{ep} \times 24 \times 3600 \times (3 \text{ octets})$

d'où un stockage de $3 \times \underbrace{24}_{\sim 25} \times \underbrace{3600 \times 3}_{\sim 10^4} \times \underbrace{(20 + 1)}_{\sim 20} \simeq 15.10^6 = 15 \text{ Mo}$

Question 25 Estimer le nombre de jours de stockage disponibles avec une carte mémoire de 500 Mo pour l'ensemble des données.

Il faut donc un peu plus de 100 Mo par jour. Une carte de 500 Mo permet de stocker complètement les données de 4 jours.

7 Synthèse

Question 26 Donner, en précisant leur rôle, trois éléments qui permettent au sismomètre VBB de SEIS de donner une mesure fidèle de la vitesse et de la position du sol dans toutes les directions de l'espace, tout en s'affranchissant des défauts de positionnement sur le sol martien et du bruit environnant l'instrument.

- La structure de pendule inversé est mise en oscillations par les ondes sismiques
- La masselotte mobile permet d'optimiser la position d'équilibre du pendule même sur un sol incliné
- Les bobines et correcteurs associés permettent de filtrer et d'amplifier les signaux captés par le pendule pour isoler les ondes sismiques.
- L'association des 3 VBB à 120° permet de filtrer le bruit pour les ondes horizontales.