

Etude du sismomètre SEIS (Encore)

ÉTUDE DU SISMOMÈTRE SEIS

1 Présentation

Après des années de recherche et de développement puis un voyage de 485 millions de kilomètres, la sonde InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) s'est posée sur Mars le 26 novembre 2018. Elle est le premier observatoire géophysique martien, dont l'objectif est d'étudier la structure interne de Mars et de comprendre la formation et l'évolution des planètes rocheuses du Système solaire. En mesurant la façon dont les ondes sismiques, provoquées par des séismes martiens ou des impacts de météorites, se propagent à l'intérieur de Mars, les géophysiciens vont pouvoir répondre avec précision à cet objectif.

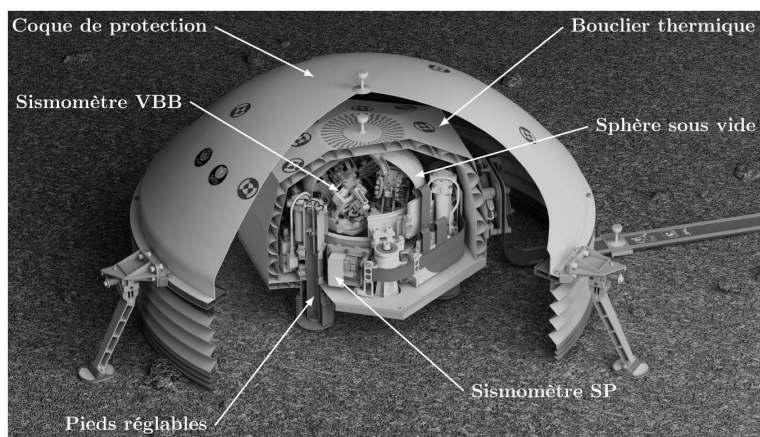


FIGURE 1 – Écorché de SEIS et ses différents niveaux de protection

Le sismomètre SEIS (Seismic Experiment for Interior Structures), déployé à la surface de Mars, est protégé des variations de la température et du vent à l'aide d'un bouclier thermique et d'une coque de protection. SEIS comporte deux sismomètres indépendants, le VBB (Very Broad Band) et le SP (Short Periods), montés sur une structure commune pouvant être réglée à l'horizontale grâce à des pieds de longueur variable.

- Le sismomètre VBB comporte trois systèmes identiques, composés chacun d'un pendule et d'un bâti, inclinés différemment par rapport au sol. Ils sont fixés dans une sphère en titane sous vide, et sensibles à une large bande de fréquence d'ondes sismiques, entre 0,01 Hz et 0,5 Hz.
- Le sismomètre SP est adapté aux ondes sismiques de plus hautes fréquences, entre 0,1 et 50 Hz.

Dans ce sujet, on s'attache à valider certaines étapes clés de la conception et du réglage d'un des trois systèmes du sismomètre VBB. Cette dernière étape ayant eu lieu sur Terre, il a fallu contourner les difficultés liées aux différences de gravité et de température entre la Terre et Mars.

Une vue détaillée d'un des systèmes du VBB est fournie en figure 2 et le détail des différents éléments qui le constituent est fourni en Annexe 1.

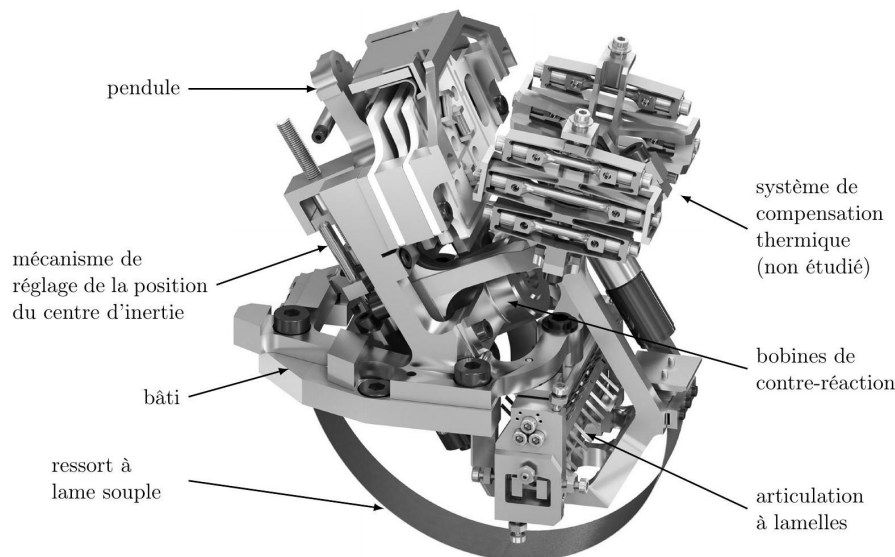


FIGURE 2 – Vue 3D d'un des trois systèmes du VBB

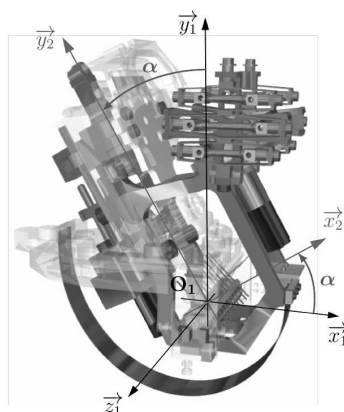
2 Réglage de la position d'équilibre du pendule

Comme pour les applications terrestres, chaque système du sismomètre VBB possède un pendule qui oscille par rapport à un bâti sous l'impulsion de secousses sismiques transmises par le sol à l'instrument. Une articulation à lamelles permet des mouvements de très faible amplitude avec un minimum de frottements visqueux entre le pendule et le bâti, et sans jeu. Elle constitue l'axe de rotation du pendule dans son mouvement par rapport au bâti.

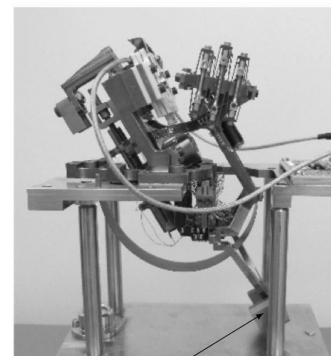
Le sismomètre VBB s'appuie sur le principe du pendule inversé. L'instabilité inhérente au pendule inversé lui confère une plus grande sensibilité que celle d'un pendule classique. Bien qu'instable par nature, le pendule inversé du sismomètre VBB conserve son équilibre grâce à un ressort à lame souple, recourbé en demi-cercle, et qui applique en permanence une action mécanique de rappel.

2.1 Compensation de la gravité terrestre

Le sismomètre étant optimisé pour fonctionner sous gravité martienne, il n'est pas possible de le tester sur Terre sans y apporter des modifications. En effet, pour un mouvement du sol donné sur Terre, l'amplitude résultante des oscillations du pendule risquerait de détériorer le mécanisme. Un contrepoids est ajouté au pendule, dont le moment généré sur son axe de rotation par rapport au bâti doit compenser celui dû à la différence de gravité entre la Terre et Mars (voir figure 3b).



(a) Pendule en niveaux de gris; bâti en transparence (voir aussi Annexe 1).



(b) Dispositif expérimental avec contrepoids pour tester les oscillations du pendule sur Terre

FIGURE 3

Objectif Etablir les conditions que doit respecter le contrepoids pour compenser la gravité terrestre lors d'expériences sur Terre.

Le schéma cinématique et le paramétrage du dispositif sont fournis en Annexe 2, ainsi que l'ensemble des notations et hypothèses utiles pour cette sous-partie.

On désigne par « ensemble mobile » le pendule noté (2) équipé du contrepoids noté (3). Le bâti, lié au sol, est noté (1).

Question 1 Écrire l'équation traduisant l'équilibre de l'ensemble mobile $\{(2) + (3)\}$ sur Terre, lorsque $\alpha(t) = \alpha_{eq}$. Préciser le bilan des actions mécaniques extérieures, le théorème ou principe utilisé, et les éléments d'application (projection, point éventuel).

Sur Mars, le pendule (2) n'est pas équipé du contrepoids (3). Cependant, la position d'équilibre du pendule (2) sans contrepoids (3) sur Mars, et celle du pendule (2) avec le contrepoids (3) sur Terre, doivent être identiques.

Question 2 Donner la condition sur la masse m_3 et la variable b pour compenser la différence de pesanteur entre la Terre et Mars. Pour cela, exprimer le produit $b m_3$ en fonction de a , M_2 , g_T et g_M .

Cette condition étant respectée, on peut alors traduire l'équilibre de l'ensemble mobile sur Terre :

$$a M_2 g_M \sin \alpha_{eq} + C_0 - k(\alpha_{eq} - \alpha_0) = 0$$

2.2 Conception d'un mécanisme de translation du centre d'inertie du pendule

Si l'inclinaison de la surface sur laquelle le sismomètre est posé n'est pas correctement corrigée par les pieds réglables, la position a du centre d'inertie G_2 du pendule (2) le long de l'axe (O_1, \vec{y}_2) peut être réglée à distance. Cela permet notamment d'assurer que α_{eq} conserve une valeur optimale déterminée lors d'expérimentations sur Terre.

Pour cela, un mécanisme embarqué sur (2), constitué d'un moteur pas-à-pas, d'un réducteur à train épicycloïdal, d'un joint d'accouplement (joint d'Oldham) et d'un système vis-écrou, indiqués en figure, est guidé en translation le long de l'axe (O_1, \vec{y}_2) .

Objectif Justifier les choix de conception du mécanisme de translation du centre d'inertie du pendule.

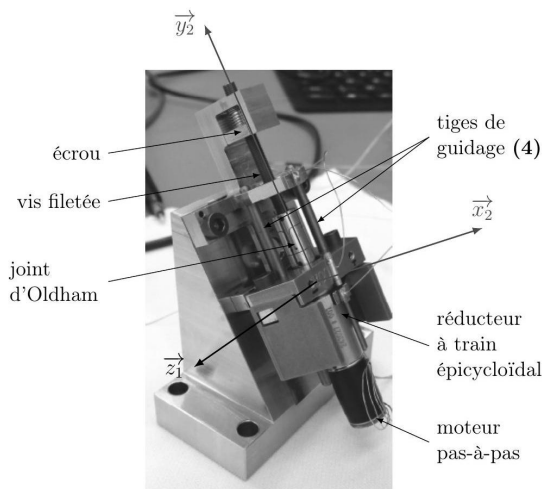


FIGURE 4 – Photographie du mécanisme de réglage de la position du centre d'inertie du pendule. Le mécanisme est ici fixé sur un support métallique incliné représentant le corps du pendule (2).

Pendant la phase de réglage de la position de son centre d'inertie, on suppose que le corps du pendule (2) reste immobile. L'ensemble du mécanisme embarqué est considéré comme mobile par rapport au corps du pendule (2) le temps de cette étude.

Le guidage en translation des tiges (4) par rapport à (2) permettant le réglage de la position du centre d'inertie est réalisé par l'association de 4 liaisons en parallèle (voir figure).

Question 3 Compléter, sur le Cahier Réponses, le graphe des liaisons fourni avec les noms et la (les) caractéristique(s) géométrique(s) des liaisons. Donner le nombre de boucles indépendantes (nombre cyclomatique γ) de ce modèle.

Question 4 Déterminer le degré d'hyperstatisme h de ce modèle. Préciser les mobilités internes (m_i) et utiles (m_u). Justifier, au regard du système et de son contexte d'utilisation, l'intérêt d'un tel degré d'hyperstatisme pour la

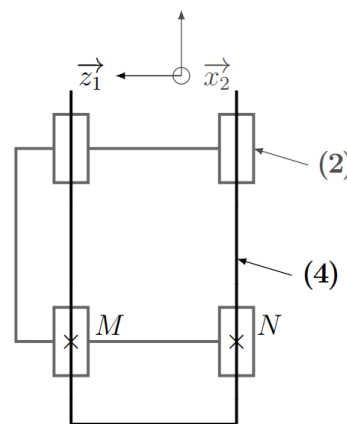


FIGURE 5 – Schéma cinématique du guidage en translation des tiges (4) par rapport au corps du pendule (2)

réalisation du guidage.

L'association des 4 liaisons en parallèle entre (4) et (2) correspond à une liaison glissière équivalente de direction \vec{y}_2 . La suite de l'étude s'appuiera sur le schéma cinématique réduit de la figure faisant apparaître cette liaison équivalente, ainsi que des éléments du mécanisme embarqué. Le schéma cinématique réduit de l'ensemble du mécanisme est fourni en Annexe 3.

Le joint de type Oldham assure l'accouplement de l'arbre (5) en sortie du réducteur à train épicycloïdal avec la vis (v).

La figure présente les éléments constitutifs d'un joint d'Oldham :

- le plateau d'entrée est cinématiquement lié à l'arbre (5) en sortie du réducteur ;
- le plateau de sortie est cinématiquement lié à la vis (v) ;
- la noix, repérée (N), est la pièce intermédiaire du joint.

On suppose que le joint est assemblé sans jeu entre les différentes surfaces de contact.

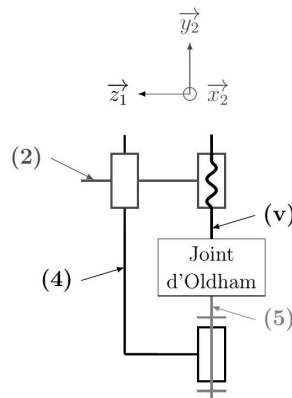


FIGURE 6 – Schéma cinématique réduit du mécanisme de déplacement du centre d'inertie du pendule

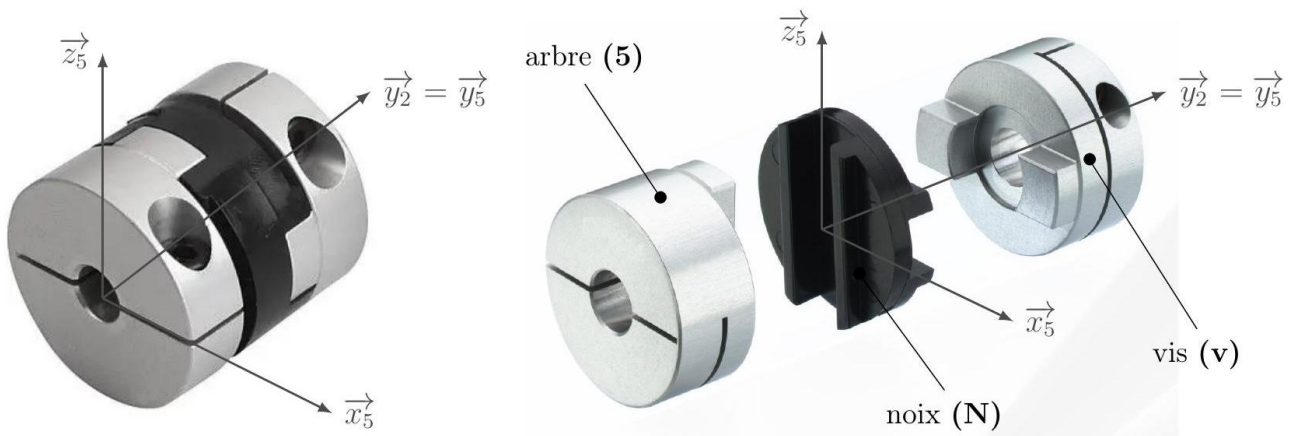


FIGURE 7 – Joint d'Oldham assemblé (à gauche) et éclaté (à droite)

Question 5 À l'aide de la figure 7 et par analyse des surfaces de contact, identifier la liaison entre (N) et (5) d'une part, et entre (N) et (v) d'autre part. Compléter le schéma cinématique en 3D du Cahier Réponses en traçant ces liaisons.

Ce type de joint permet de lier entre eux des éléments d'un mécanisme tout en corrigeant d'éventuels défauts de positionnement relatif entre les arbres (5) et (v).

Question 6 Pour chacune des 5 propositions de défauts géométriques du tableau du Cahier Réponses, entourer OUI lorsque le joint d'Oldham permet de rattraper le défaut et entourer NON lorsque ce n'est pas le cas.

2.3 Validation de la précision du positionnement du centre d'inertie du pendule

Objectif Vérifier que l'exigence 1.1 de précision du positionnement du centre d'inertie du pendule est bien validée.

Id	Exigence	Critère	Niveau
1	Ajuster la position d'équilibre du pendule sur Mars		
1.1	Déplacer le centre d'inertie du pendule	Précision du positionnement	$\pm 3\mu\text{m}$

TABLE 1 – Liste (non exhaustive) des exigences du mécanisme de translation du centre d'inertie du pendule

On introduit, pour le vecteur vitesse de rotation d'un solide i par rapport à un solide j , la notation suivante :

$$\vec{\Omega}_{i/j} \cdot \vec{y}_2 = \omega_{i/j}$$

Les éléments du mécanisme de transformation de mouvement permettant le déplacement du centre d'inertie du pendule sont rappelés en figure 8. Leurs caractéristiques y sont précisées.

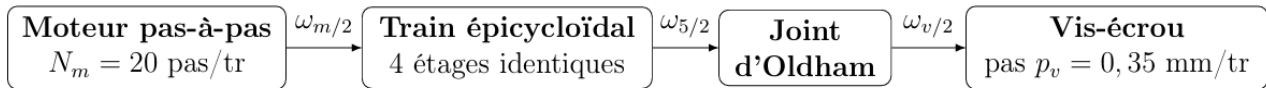


FIGURE 8 – Chaîne de transmission réalisant le déplacement de la position du centre d'inertie du pendule

Le joint d'Oldham est homocinétique, c'est-à-dire que la vitesse de rotation de l'arbre de sortie du réducteur (5) est la même que celle de la vis (v) par rapport au pendule (2) :

$$\omega_{5/2} = \omega_{v/2}$$

Le réducteur est à train épicycloïdal. Son schéma complet est fourni en Annexe 3. Comme il est composé de 4 étages identiques, on résume son étude à celle d'un seul étage, ici le dernier, de manière à en déduire par la suite le rapport de transmission global du train complet. Le schéma cinématique du dernier étage du réducteur est fourni en figure 9.

Question 7 Justifier que $\omega_{4/2} = 0$. Établir l'expression du rapport de transmission d'un étage $k = \frac{\omega_{5/2}}{\omega_{7/2}}$ en fonction des nombres de dents Z_i et faire l'application numérique.

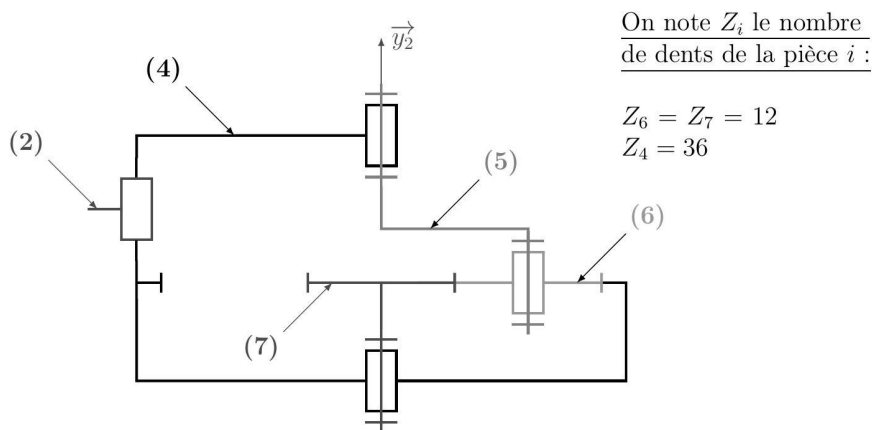


FIGURE 9 – Schéma cinématique du dernier étage du train épicycloïdal

Question 8 Exprimer le rapport de transmission global du réducteur $k_g = \frac{\omega_{5/2}}{\omega_{m/2}}$ en fonction de k .

Question 9 En s'appuyant sur les notations et données de la figure 8, établir l'expression du déplacement linéaire d_v de la vis (v) par pas du moteur en fonction de N_m , k_g et p_v . Faire l'application numérique et conclure vis-à-vis de l'exigence 1.1 de précision du positionnement du centre d'inertie.

Un capteur optique a permis de mesurer le déplacement de la vis, fourni en figure 10, et a mis en évidence une non-linéarité lors des changements de sens de rotation du moteur.

Question 10 Proposer une cause de la non-linéarité qui apparaît au changement de sens de rotation du moteur.

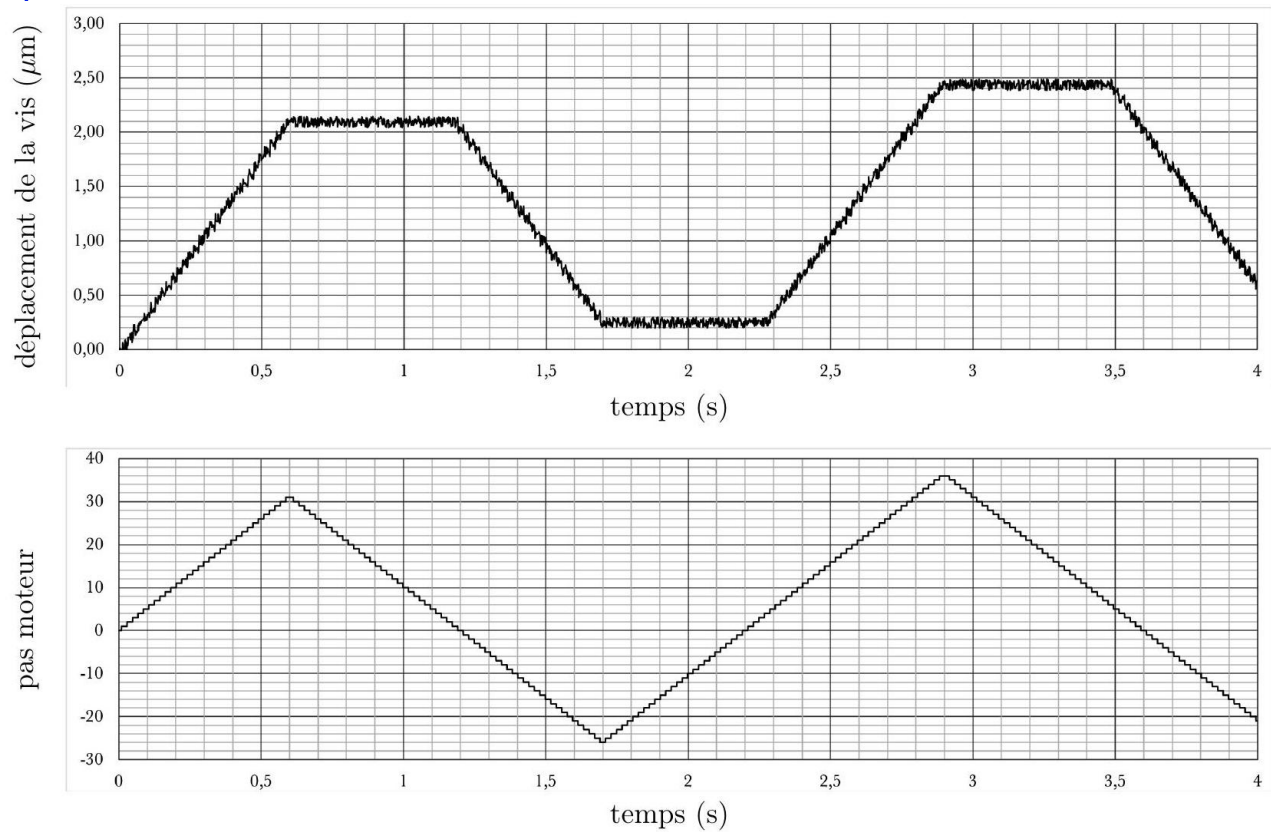


FIGURE 10 – Déplacement de la vis en μm et nombre de pas du moteur en fonction du temps

Question 11 Donner l'erreur de positionnement due à la non-linéarité. Conclure à nouveau vis-à-vis de l'exigence 1.1 de précision du positionnement du centre d'inertie.

Annexe 1 - Détail des éléments d'un des systèmes du VBB

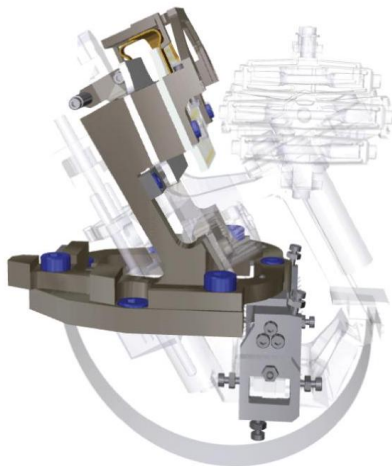


FIGURE 11 – Bâti (1)



FIGURE 12 – Articulation à lamelles entre (1) et (2)

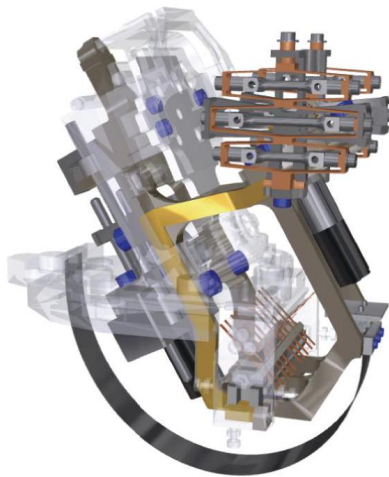


FIGURE 13 – Pendule (2)

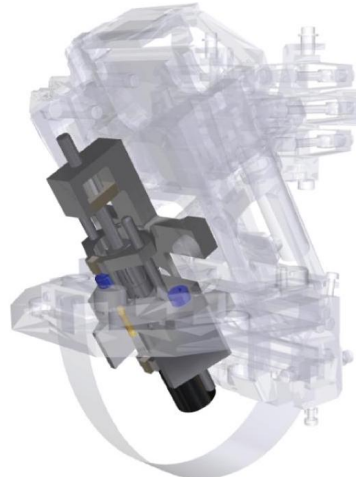


FIGURE 14 – Mécanisme de translation du centre d'inertie de (2)

DM 1

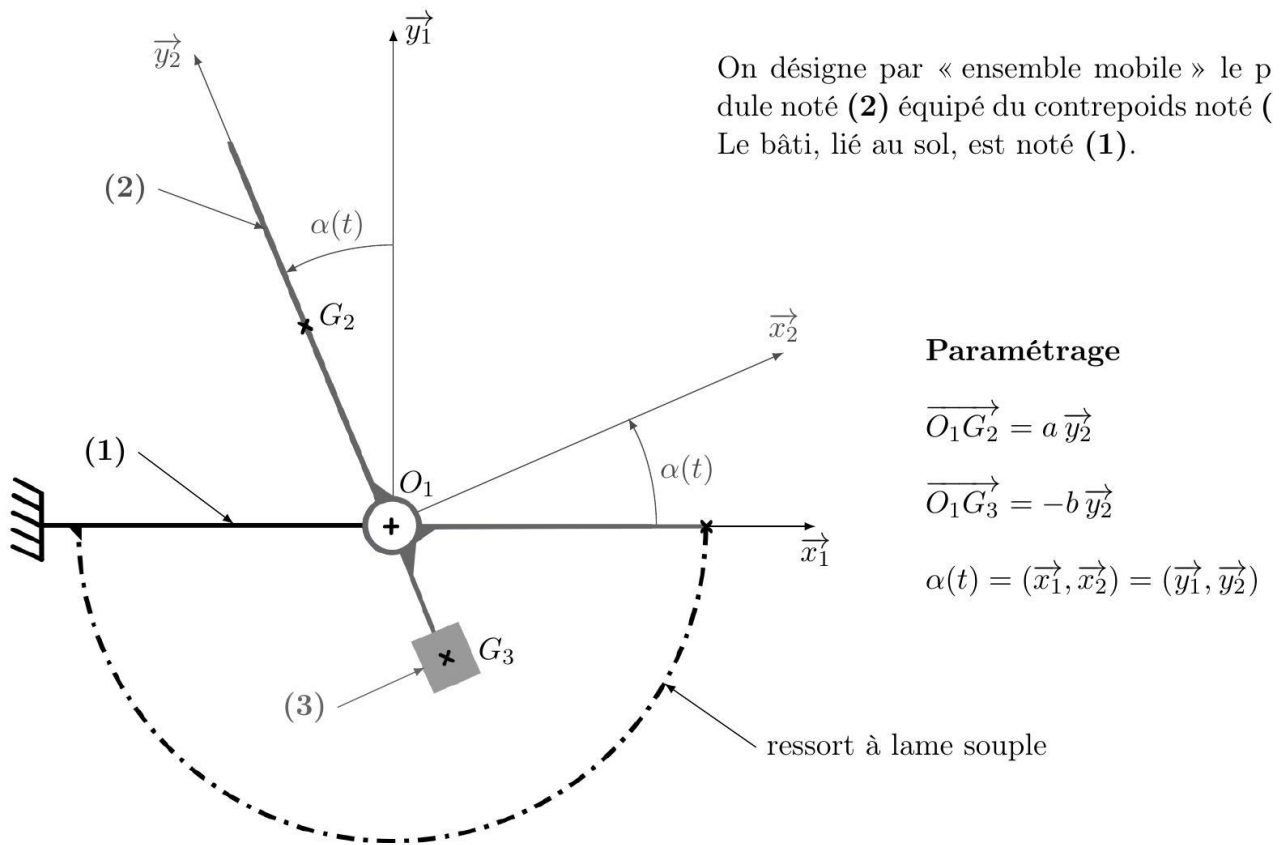
Annexe 2 - Modèle cinématique du système en l'absence de séisme

Notations

G_2	Centre d'inertie du pendule (2)
M_2	Masse du pendule (2)
G_3	Centre d'inertie du contrepoids (3)
m_3	Masse du contrepoids (3)
C_0	Moment de précontrainte de l'ensemble {ressort + articulation} sur {(2) + (3)}
k	Raideur de l'ensemble {ressort + articulation} sur l'axe (O_1, \vec{z}_1)
α_0	Position angulaire à vide de l'ensemble mobile
α_{eq}	position angulaire de l'ensemble mobile à l'équilibre (sous l'effet des actions de la pesanteur et du ressort)
g_T	Champ de pesanteur à la surface de la Terre, de direction $-\vec{y}_1$
g_M	Champ de pesanteur à la surface de Mars, de direction $-\vec{y}_1$

Hypothèses

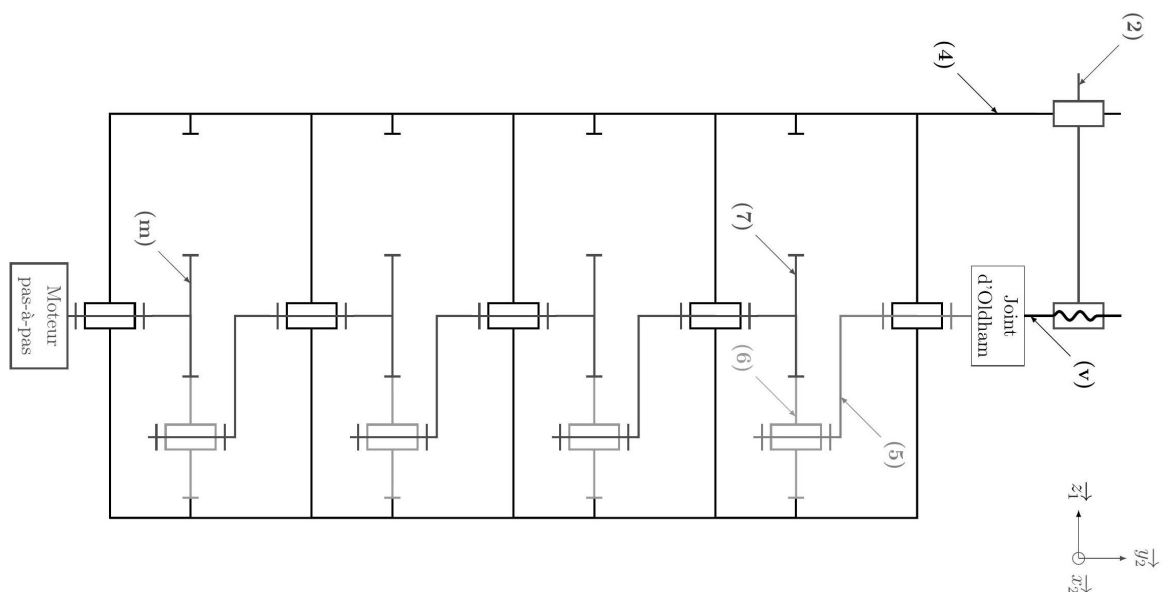
Le référentiel \mathcal{R}_1 , auquel est associé le repère $R_1 = (O_1, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ lié au sol, est supposé galiléen en l'absence de séisme.



La liaison pivot réalisée par l'articulation à lamelle sur l'axe de rotation (O_1, \vec{z}_1) de l'ensemble mobile n'est pas parfaite. Les frottements visqueux sont pris en compte à travers un coefficient de frottement $\mu (\mu > 0)$: $\{\mathcal{T}_{1 \rightarrow (2+3)} = \left\{ \begin{array}{l} X_O \vec{x}_1 + Y_O \vec{y}_1 + Z_O \vec{z}_1 \\ L_O \vec{x}_1 + M_O \vec{y}_1 - \mu \dot{\alpha}(t) \vec{z}_1 \end{array} \right\}_{O_1}$

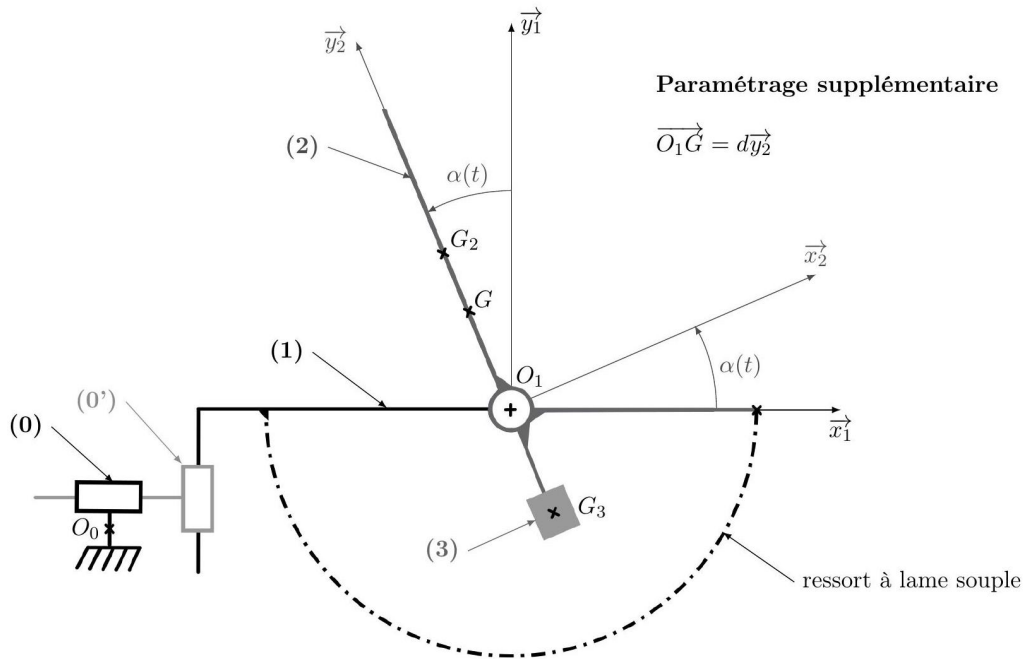
L'action de rappel de l'ensemble { ressort + articulation } est assimilée à un couple pur sur l'axe de rotation (O_1, \vec{z}_1) de l'ensemble mobile : $\{\mathcal{T}_{\text{ressort} \rightarrow (2+3)}\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{0} \\ (C_0 - k(\alpha(t) - \alpha_0)) \vec{z}_1 \end{matrix} \right\}_{O_1}$

Annexe 3 - Schéma cinématique du mécanisme de translation de la position du centre d'inertie du pendule



Annexe 4 - Modèle cinématique du système lors d'un séisme

Les torseurs d'actions mécaniques et les notations de l'Annexe 2 restent valables.



Notations et hypothèses supplémentaires

G	Centre d'inertie de l'ensemble mobile $\{(2) + (3)\}$ testé sur Terre
M	Masse de l'ensemble mobile $\{(2) + (3)\}$
I_{zz}	Moment d'inertie de l'ensemble mobile $\{(2) + (3)\}$ sur l'axe (O_1, \vec{z}_1)

Le référentiel \mathcal{R}_0 , auquel est associé le repère $R_0 = (O_0, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$, est supposé galiléen.

On note la vitesse du sol (1) par rapport à R_0 : $\vec{V}_{(O_1,1)/R_0} = V_x(t)\vec{x}_1 + V_y(t)\vec{y}_1$.

Grâce au contrepoids, l'action de la pesanteur sur l'ensemble mobile qui s'applique en G a un moment en O_1 égal à celui que subirait le pendule seul sur Mars : $\{\mathcal{T}_{\text{pesanteur} \rightarrow (2+3)}\} = \left\{ \begin{array}{l} -(M_2 + m_3)g_T \vec{y}_1 \\ a M_2 g_M \sin \alpha(t) \vec{z}_1 \end{array} \right\}_{O_1}$

Aucune autre action de pesanteur n'est à prendre en compte.

Le système de réglage de la position du centre d'inertie G_2 permet d'imposer $\alpha_{eq} = \alpha_0$. Dans ces conditions, l'équation traduisant l'équilibre de l'ensemble mobile en l'absence de séisme reste valable et se simplifie ainsi :

$$a M_2 g_M \sin \alpha_0 + C_0 = 0 \quad (\text{eq.1'})$$

Document réponse

Question ?? – Figure A

Fin du document réponse

DM 1