Banque PT, France

Session 2026, filière PT

Sciences industrielles B

Durée : 6 heures

Ce que traite le sujet

- Présentation et travail demandé
- Partie I : caractéristiques de la centrifugeuse
- Partie II : validation de l'exigence de sécurité (exigence 1.3)
- Partie III : précision de l'accélération imposée (exigence 1.1.1)
- Partie IV : proposition d'une évolution technique

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/banque-pt/pt/2026/si-b

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

Epreuve de Sciences Industrielles B

Durée 6 h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est interdit.

Aucun document n'est autorisé.

Composition du sujet :

- 1 cahier de 18 pages contenant une description de l'étude et le travail demandé, et des documents annexes (15 pages) ;
- 1 cahier réponse de 15 pages **à rendre à la fin de l'épreuve.**

Remarque :

Le document annexe N présente un tableau récapitulant les données et les notations principales utilisées dans l'épreuve.

Il est demandé au candidat :

- de rédiger l'ensemble des réponses uniquement sur le cahier réponse fourni avec le sujet et exclusivement dans les cardes réponses prévus. Les réponses sur feuilles de copies additionnelles ou sur papier brouillon ne seront pas acceptées ;
- de formuler toutes les hypothèses qu'il jugera nécessaires pour répondre aux questions posées ;
- de rédiger tous les calculs en **littéral** avant de faire, si elles sont demandées, les applications numériques ;
- d'**encadrer** les réponses finales.

La **présentation**, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la **rédaction, la clarté et la précision** des raisonnements entreront pour une **part importante dans l'appréciation des copies**. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte.

Tournez la page S.V.P

Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance.

Centrifugeuse de précision pour la calibration de capteurs accélérométriques



Figure 1 – Image d'une centrifugeuse de la famille CTR produite par la société Exail

Les accéléromètres sont largement utilisés, que ce soit dans les produits grand public (smartphone), pour l'automobile, l'aéronautique ou les domaines militaires, pour mesurer l'inclinaison, l'accélération ou les vibrations. Ce type de capteur doit néanmoins être calibré au préalable pour fournir à l'utilisateur futur le lien entre la sortie (une tension par exemple) et l'entrée du capteur (l'accélération vue par le capteur). Cette procédure de calibration nécessite d'imposer un ensemble d'entrées connues sur le capteur et de mesurer les sorties correspondantes.

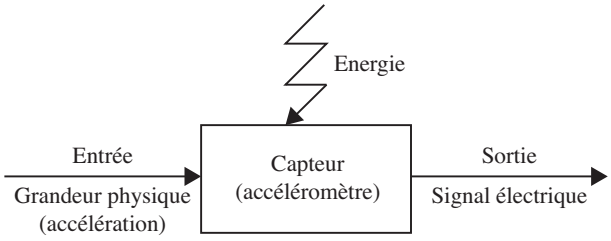


Figure 2 – Entrée et sortie d'un capteur, par exemple de type accéléromètre

La société Exail conçoit, réalise et commercialise des centrifugeuses (figure 1) de pointe permettant de tester avec précision les accéléromètres linéaires et les centrales inertielles de haute performance. De façon très schématique, une centrifugeuse est constituée d'un bras de longueur L mis en rotation autour d'un axe fixe $(O, \vec{z})$. En plaçant l'accéléromètre à calibrer en bout de bras, celui-ci est soumis à une accélération centripète dont l'intensité est directement liée à la vitesse de rotation du bras. Ainsi, la connaissance de la vitesse de rotation permet de déterminer l'entrée du capteur, et la mesure de sa sortie permet de déterminer un point de calibration. En répétant cette opération pour un ensemble de vitesses de rotation, le capteur peut être calibré sur toute sa plage de fonctionnement.

En pratique, ce comportement peut être variable en fonction de la température. La société prévoit de placer le capteur en bout de bras dans une chambre climatique (aussi appelée étuve dans la suite), dont la température et l'humidité sont pilotées. En répétant la calibration pour différents niveaux de température, le comportement du capteur est alors connu sur toute sa plage de fonctionnement et pour toutes les températures représentatives de son futur environnement de fonctionnement.

Enfin, pour des raisons évidentes de gain de temps, ce sont plusieurs capteurs qui peuvent être montés en bout de bras sur un même plateau support, au sein de l'étuve. Cet ensemble de capteurs et éléments associés constitue la charge utile de la centrifugeuse.

La gamme des centrifugeuses conçues par Exail est assez large. Elle permet de calibrer un ensemble de capteurs allant jusqu'à 200 kg, avec une accélération imposée allant jusqu'à 100 fois la gravité ($100g$), et une précision de 0.01% sur l'accélération imposée. L'objet de la présente étude est la centrifugeuse CTR-20 pouvant embarquer un ensemble de capteurs allant jusqu'à 20 kg.

1 Cahier des charges partiel associé au système d'ouverture de porte

La centrifugeuse étudiée est présentée à l'aide du diagramme de contexte de la figure 3. Les principales exigences fonctionnelles associées au système étudié sont présentées sur la figure 4.

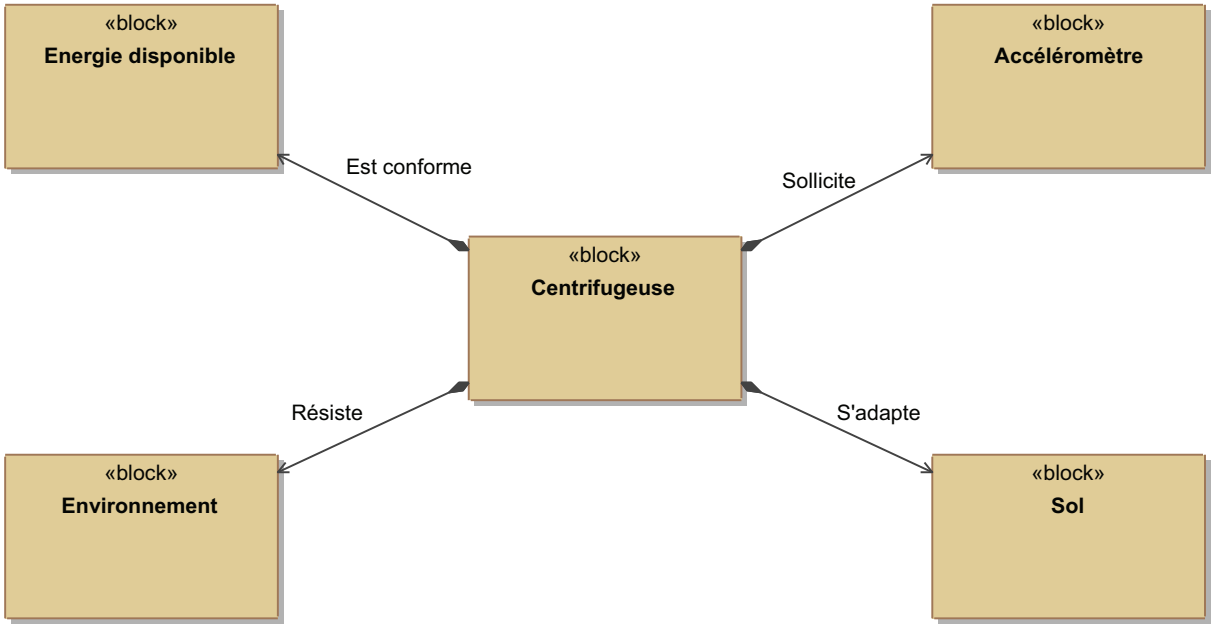


Figure 3 – Diagramme SysML de contexte associé à la centrifugeuse objet de l'étude

La présente étude porte sur les exigences 1.1, 1.3 et 1.4 (voir figure 4) permettant d'assurer que le système peut fonctionner sur toute l'étendue de la gamme envisagée, avec le niveau de précision souhaitée et en toute sécurité. Les sous-exigences associées à l'exigence 1.1 exprimée de manière globale sont détaillées spécifiquement en annexe A sur la figure 5. La figure 6 de l'annexe A présente quant à elle les sous-exigences de l'exigence 1.3 :

- la sous-exigence 1.1.1 permettant d'assurer que l'accélération centripète imposée au capteur soit maîtrisée ;
- la sous-exigence 1.3.2 permettant d'assurer que le système ne sera pas mis en mouvement s'il existe un niveau de déséquilibre statique trop important.

Enfin la sous -exigence 1.4.3 permet d'assurer que la montée en régime de la centrifugeuse est suffisamment rapide.

2 Travail demandé

Travail demandé

Ce sujet comporte trois parties indépendantes, elles-mêmes constituées de nombreuses questions qui peuvent être traitées séparément :

— la **Partie I** (durée conseillée 1h30 min) se concentre sur l'évaluation des performances de la centrifugeuse étudiée et notamment sur la gamme de mesure (exigence 1.1.1.0) ;
— la **Partie II** (durée conseillée 1h00) se concentre sur la sécurité du système (exigence 1.3) ;
— la **Partie III** (durée conseillée 1h30 min) se concentre sur la maîtrise de l'accélération imposée au capteur à calibrer (exigence 1.1.1.0) ;
— la **Partie IV** (durée conseillée 1h30) porte à nouveau sur les exigences 1.1.1.0 et 1.1.1.1 ; elle propose l'étude d'une modification structurelle permettant d'améliorer les performances.

Une lecture préalable du sujet complet est vivement conseillée (durée indicative 30 min).

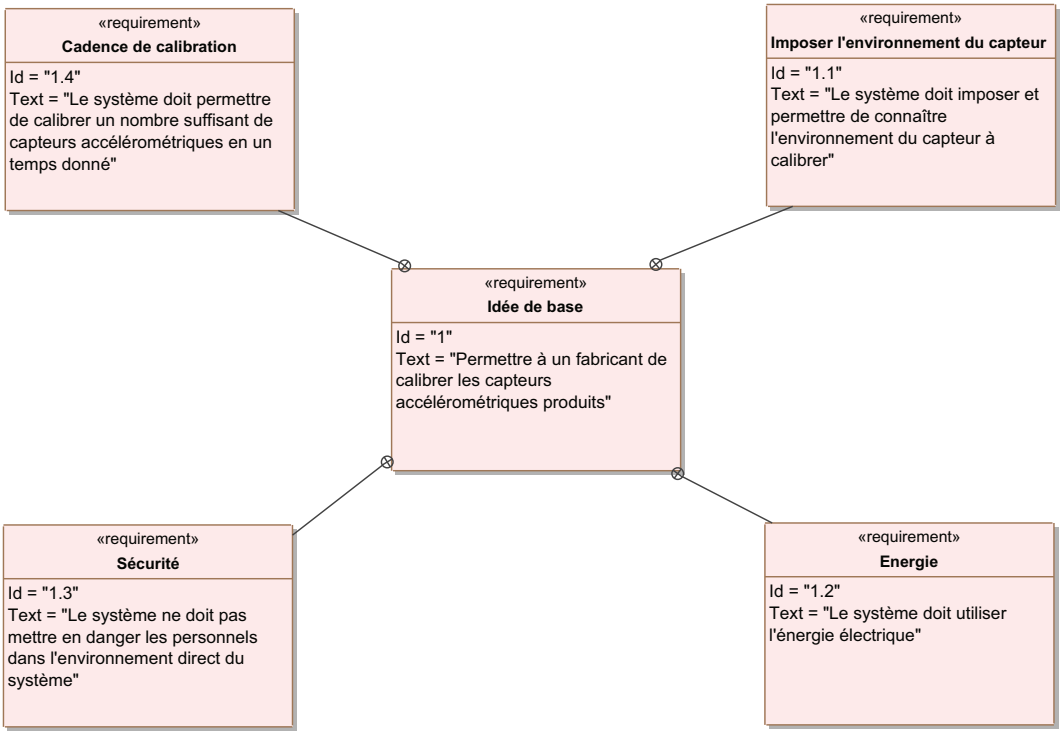


Figure 4 – Diagramme SysML des principales exigences associées à la centrifugeuse

Applications numériques. — Dans le domaine des Sciences Industrielles, le fait de savoir calculer et analyser les valeurs des grandeurs utiles au dimensionnement est aussi important que celui de savoir déterminer leurs expressions littérales. C'est pourquoi, **une attention toute particulière sera accordée à la réalisation des applications numériques**.

Pour réaliser celles-ci sans l'usage d'une calculatrice, le candidat pourra faire des approximations de bon sens, qui conduiront éventuellement à une erreur relative de quelques pourcents sur le résultat final, tolérée par le correcteur.

PARTIE

Caractéristiques de la centrifugeuse

Objectif. — Dans cette partie, on souhaite déterminer les caractéristiques principales de la centrifugeuse étudiée, à savoir la vitesse de rotation à atteindre permettant d'obtenir l'accélération centripète maximale voulue, et le couple moteur nécessaire pour l'actionner et atteindre cette vitesse maximale en un temps raisonnable.

I.1 — Gamme d'accélération centripète

L'objectif est tout d'abord de lier l'accélération vue par le capteur accéléromètre placé en bout de bras à la vitesse de rotation. Un schéma de la centrifugeuse est présenté sur la figure 9 du document annexe C. Le double-bras (2), constitué de deux bras solidaires (2^+) et (2^-) disposés symétriquement par rapport à l'axe de rotation, est en liaison pivot d'axe $(O,\vec{z})$ avec le chassis (1). On associe au double-bras (2) la base $(\vec{x}_2,\vec{y}_2,\vec{z}_2)$ avec $\vec{z}=\vec{z}_2$. Elle est orientée avec l'angle θ tel que $\theta=(\vec{x},\vec{x}_2)=(\vec{y},\vec{y}_2)$. On note dans la suite $\Omega=\dot{\theta}$ la vitesse angulaire du double-bras. Le châssis de la centrifugeuse est solidarisé avec le sol (0) auquel on associe la base $(\vec{x},\vec{y},\vec{z})$, et on considère qu'aucun mouvement relatif n'est possible entre (1) et (0). Le capteur accélérométrique, représenté par le point M^+, est monté en bout de bras (2^+) tel que $\vec{AM^+}=L\vec{x}_2+y_c^+\vec{y}_2+z_c^+\vec{z}$. Un autre capteur représenté par le point M^- peut être monté en bout de bras opposé (2^-) tel que $\vec{AM^-}=-L\vec{x}_2+y_c^-\vec{y}_2+z_c^-\vec{z}$.

Dans la suite, afin d'alléger légèrement les écritures, on note :
— $\vec{V}_{P,i/j}$ la vitesse du point P dans le mouvement du solide (i) par rapport au solide (j) ;
— $\vec{\Gamma}_{P,i/j}$ l'accélération du point P dans le mouvement du solide (i) par rapport au solide (j) ;

Question 1 Exprimer la vitesse $\vec{V}_{M^+,2/0}$ en fonction de $\Omega(t)$ et des dimensions géométriques précédemment introduites à savoir L et y_c^+.

Question 2 Exprimer les composantes selon $\vec{x}_2$, $\vec{y}_2$ et $\vec{z}_2$ de l'accélération $\vec{\Gamma}_{M^+,2/0}$ en fonction de $\Omega(t)$, $\dot{\Omega}(t)$ et des dimensions géométriques L et y_c^+.

On considère que l'axe de mesure du capteur est parfaitement perpendiculaire au plan sur lequel le capteur est fixé, c'est-à-dire porté par $\vec{x}_2$. Ainsi, l'accélération mesurée par le capteur est $\Gamma_{M^+}=\vec{\Gamma}_{M^+,2/0}.\vec{x}_2$.

Question 3 En se plaçant en régime permanent, exprimer l'accélération Γ_{M^+} vue par le capteur en fonction de $\Omega(t)$ et des dimensions géométriques.

Question 4 Toujours en régime permanent, donner l'expression de la vitesse de rotation Ω_{max} permettant d'atteindre une accélération Γ_{M^+} valant $|\Gamma_{max}|$; effectuer l'application numérique en $rad.s^{-1}$ puis en $tour.min^{-1}$ pour les valeurs de Γ_{max} et L fournies en annexe N.

I.2 — Temps de montée en régime

Dans cette sous partie on cherche à dimensionner le couple moteur nécessaire pour atteindre 95% du régime maximal en un temps τ imposé par le cahier des charges. Le moteur est à choisir dans la gamme présentée en document annexe E. Il s'agit de moteurs brushless à fort couple, destinés à être montés en prise directe sur la partie à entraîner, sans aucun réducteur.

Dans un premier temps, on cherche à estimer l'inertie du système ramenée à l'axe moteur $(A, \vec{z})$. Pour cela, on propose le modèle présenté sur la figure 8 du document annexe B. On tient compte :

— de la masse m_b de chacun des deux bras, supposée répartie uniformément sur la longueur des bras ; l'inertie associée au double-bras ramenée sur l'axe moteur, notée J_b, est définie par :

$$J_b = 2\int_0^L \frac{m_b}{L} x^2 dx;$$

— de la masse de chacune des deux étuves et du chargement, que l'on suppose ponctuelles et placées à une distance L de l'axe de rotation ; on note J_e l'inertie ramenée à l'axe moteur associée aux deux étuves, équipées de capteurs, de masse unitaire $m_e + m_c$;

— de l'inertie du rotor moteur notée J_r.

Question 5 Donner l'expression de l'inertie J_b en fonction de m_b et L ; donner l'expression de l'inertie équivalente J_e en fonction de m_e, m_c et L ; donner enfin l'inertie équivalente totale J_{eq} ramenée à l'axe moteur en fonction de J_r, m_e, m_c, m_b et L.

On considère que les seules pertes dans le système sont liées au frottement dans l'air du double-bras lui même, et des deux étuves (e^+) et (e^-) liées aux deux extrémités du double-bras en H^+ et H^- tels que $\vec{AH^+} = L\vec{x}_2$ et $\vec{AH^-} = -L\vec{x}_2$. Le frottement de l'air sur l'étuve (e^+) est modélisé par un effort ponctuel appliqué au point H^+ tel que :

$$\vec{F}_{a\to e^+} = \varepsilon_e \frac{1}{2}\rho_a S_e C_{x,e} ||\vec{V}_{H^+,2^+/0}||^2 \ \vec{y}_2$$

où ρ_a est la masse volumique de l'air, S_e la surface de l'étuve projetée selon $\vec{y}_2$, et $C_{x,e}$ le coefficient de traînée sur l'étuve. Le coefficient ε_e vaut ± 1 et permet de définir le sens des efforts résistants selon $\vec{y}_2$ en fonction du sens de rotation du double-bras. Les deux étuves (e^+) et (e^-) ayant la même géométrie, on définit de la même manière :

$$\vec{F}_{a\to e^-} = -\varepsilon_e \frac{1}{2}\rho_a S_e C_{x,e} ||\vec{V}_{H^-,2^-/0}||^2 \ \vec{y}_2$$

On considère un tronçon du bras (2^+) ou (2^-), de longueur dx et de hauteur H_b selon $\vec{z}$, centré sur un point K du bras. Le frottement de l'air sur ce tronçon de bras est d'une forme similaire :

$$d\vec{F}_{a\to 2^+} = \varepsilon_e \frac{1}{2}\rho_a (H_b dx) C_{x,b} ||\vec{V}_{K,2^+/0}||^2 \ \vec{y}_2$$
$$d\vec{F}_{a\to 2^-} = -\varepsilon_e \frac{1}{2}\rho_a (H_b dx) C_{x,b} ||\vec{V}_{K,2^-/0}||^2 \ \vec{y}_2$$

Question 6 Donner la valeur du coefficient ε_e pour une vitesse de rotation $\Omega > 0$; justifier la réponse.

Question 7 Donner l'expression du vecteur vitesse $\vec{V}_{K,2/0}$ d'un point K quelconque du bras tel que $\vec{AK} = x\vec{x}_2$, en fonction de x et Ω.

Question 8 Pour $\Omega > 0$, donner l'expression du moment $\vec{M}_{A,a\to e^+}$ en A de l'effort $\vec{F}_{a\to e^+}$ en fonction de L, Ω, ρ_a, S_e et $C_{x,e}$.

Question 9 Pour $\Omega > 0$, donner l'expression du moment élémentaire $d\vec{M}_{A,a\to 2^+}$ en A de l'effort élémentaire $d\vec{F}_{a\to 2^+}$ en fonction de ρ_a, H_b, $C_{x,b}$, Ω, x et dx ; en déduire l'expression du couple de frottement total $\vec{M}_{A,a\to 2^+}$ après intégration sur le bras (2^+) en fonction de ρ_a, H_b, $C_{x,b}$, Ω et L.

Question 10 En considérant les deux bras et les deux étuves de part et d'autre de la liaison pivot, donner l'expression du couple de frottement total C_{aero} porté par $\vec{z} = \vec{z}_2$ en fonction de Ω, ρ_a, S_e, $C_{x,e}$, $C_{x,b}$, H_b et L.

Le moteur exerce un couple $C_m(\Omega)\vec{z}$ sur le bras. On suppose qu'on travaille dans une gamme de vitesses de rotation où C_m ne dépend pas de la vitesse de rotation Ω. En isolant tout le système tournant, et en

écrivant l'équation de moment dynamique en A en projection sur l'axe $\vec{z}$, on obtient l'équation différentielle de mouvement de la forme suivante :

$$\dot{\Omega} + A\Omega^2 = B.$$

Question 11 Préciser les expressions des termes A et B en fonction de L, H_b, S_e, $C_{x,e}$, $C_{x,b}$, ρ_a, J_{eq} et C_m. L'équation différentielle à résoudre est-elle linéaire ?

La solution de l'équation différentielle précédemment obtenue est de la forme $\Omega(t) = \alpha \tanh(\beta t)$. On rappelle pour la suite que la dérivée de $\tanh(t)$ est $\dfrac{1}{\cosh^2(t)}$ et que $\cosh^2(t) - \sinh^2(t) = 1$.

Question 12 Préciser les expressions des coefficients α et β en fonction de A et B uniquement ; quelle est la limite de $\Omega(t)$ quand $t \to +\infty$ en fonction de A et B ?

La solution mise en évidence a été calculée pour différents couples C_m appliqués, constants sur tout l'intervalle de temps d'étude. Pour chaque solution, on a relevé la vitesse angulaire $\Omega(t)$ atteinte quand $t \to +\infty$ (notée Ω_∞) et le temps t permettant d'atteindre différents pourcentages de cette vitesse maximale. Le tableau 1 en annexe D récapitule les résultats obtenus.

Question 13 Enoncer les critères permettant de choisir une motorisation à partir de la documentation moteur fournie dans le document technique E, puis préciser les références des moteurs qui sont adaptées pour satisfaire les exigences 1.1.1.0 et 1.4.3.1.

PARTIE II

Validation de l'exigence de sécurité (exigence 1.3)

Objectif — Dans cette partie, on se focalise sur la sécurité du système. En particulier, on souhaite pouvoir détecter un défaut de chargement du bras (chargement non symétrique) et assurer que le guidage en rotation du bras a une durée de vie suffisante.

II.1 — Détection d'un défaut de chargement

Afin de détecter si le système est mal chargé au départ, le constructeur envisage la procédure suivante : on fait tourner le bras à très faible vitesse, et on regarde comment varient les efforts au niveau des appuis sur le sol. Pour cela, un des trois pieds de la centrifugeuse est instrumenté au moyen d'un capteur d'effort qui mesure l'effort de réaction vertical du sol sur le pied. Si le centre de gravité de l'ensemble mobile est centré sur l'axe de rotation, on ne doit pas mesurer de variation significative de l'effort mesuré par ce capteur. Etant donnée la très faible vitesse de rotation du système au cours de la procédure, la présente étude est réalisée en statique.

Pour cette étude, on se base sur le schéma proposé sur la figure 10 du document annexe C. La centrifugeuse est scellée dans le sol en trois points P_1, P_2, et P_3, disposés à un rayon R_P de l'axe de rotation et équi-répartis angulairement tels que :

$$\vec{OP_1} = R_P\vec{x} - h\vec{z}$$
$$\vec{OP_2} = -\frac{1}{2}R_P\vec{x} + \frac{\sqrt{3}}{2}R_P\vec{y} - h\vec{z}$$
$$\vec{OP_3} = -\frac{1}{2}R_P\vec{x} - \frac{\sqrt{3}}{2}R_P\vec{y} - h\vec{z}$$

La liaison encastrement entre le châssis (1) de la centrifugeuse et le sol (0) est constituée de trois liaisons élémentaires :

— une ponctuelle de normale $(P_1, \vec{z})$;
— une rotule de centre P_2 ;
— une sphère-cylindre d'axe $(P_3, \vec{y})$.

Par ailleurs, le double-bras tourne dans un plan $(A, \vec{x}, \vec{y})$ à une distance H du plan $(O, \vec{x}, \vec{y})$: $\vec{OA} = H\vec{z}$.

On note M_{tot} la masse totale de la centrifugeuse en l'absence de chargement. On suppose que la centrifugeuse vide est équilibrée de sorte que le centre de gravité de la partie tournante (2) est sur l'axe $(O, \vec{z})$. Le centre de gravité du châssis (1) de la centrifugeuse est également supposé être sur l'axe $(O, \vec{z})$.

Un ensemble de capteurs à calibrer est placé dans chacune des zones de chargement en bout de bras. Ces chargements sont équivalents à :

— une masse ponctuelle m_c^+ en M^+ avec $\vec{OM^+} = L\vec{x_2} + y_c^+\vec{y_2} + (H + z_c^+)\vec{z}$;
— une masse ponctuelle m_c^- en M^- avec $\vec{OM^-} = -L\vec{x_2} + y_c^-\vec{y_2} + (H + z_c^-)\vec{z}$.

On fait l'hypothèse que le chargement de la centrifugeuse est déséquilibré.

Question 14 Donner les expressions des coordonnées du centre de gravité G_m, notées (x_G, y_G, z_G), de l'ensemble $\{m_c^+, m_c^-\}$ dans le repère $(O, \vec{x_2}, \vec{y_2}, \vec{z})$ en fonction de m_c^+, m_c^-, y_c^+, y_c^-, z_c^+, z_c^-, L et H.

Pour une liaison en P entre le solide (i) et le solide (j), la forme générale du torseur des actions mécaniques transmissibles du solide (i) sur le solide (j) sera pris de la forme suivante, avec des composantes exprimées dans la base $\mathcal{B} = (\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

$$\left\{\mathcal{T}^{P}_{(i)\to(j)}\right\} = \begin{Bmatrix} X_P & L_P \\ Y_P & M_P \\ Z_P & N_P \end{Bmatrix}_{P,\mathcal{B}}$$

Question 15 A partir de la figure 10 du document annexe C, donner la forme des torseurs statiques représentant les actions transmissibles dans les trois liaisons entre le châssis (1) et le sol (0).

Question 16 Préciser l'isolement, le (ou les) théorème(s) utilisé(s), permettant de déterminer les actions de liaison en P_1, P_2, et P_3.

La solution partielle du problème posé est la suivante :

$$Z_{P_1} = Z^0_{P_1} + A_{P_1}\cos(\theta) + B_{P_1}\sin(\theta)$$

avec :

$$Z^0_{P_1} = \frac{(m_c^+ + m_c^- + M_{tot})g}{3},$$
$$A_{P_1} = \frac{2L(m_c^+ - m_c^-)g}{3R_P},$$
$$B_{P_1} = -\frac{2(m_c^+ y_c^+ + m_c^- y_c^-)g}{3R_P}.$$

On souhaite instrumenter le pied P_1 de façon à mesurer la quantité Z_{P_1} et détecter la présence d'un chargement non équilibré statiquement. On place donc un capteur d'effort dans le pied, et on cherche quelle doit être sa résolution pour détecter un défaut de chargement $\Delta m = |m_c^+ - m_c^-|$.

Question 17 Dans le cas particulier où $y_c^+ = y_c^- = 0$, quelle est l'amplitude de l'oscillation de l'effort ΔF mesurée par le capteur en fonction de Δm, g, R_P et L ? Effectuer l'application numérique.

Question 18 En supposant que les masses m_c^+ et m_c^- sont négligeables devant la masse totale de la centrifugeuse, quel doit être l'ordre de grandeur de l'effort F^{max} devant être supporté par le capteur en fonction de la masse M_{tot} de l'ensemble reposant sur les trois pieds ? Effectuer l'application numérique.

Question 19 Donner la(les) référence(s) pouvant être retenue(s) parmi les différents modèles de capteurs d'effort présentés dans le document annexe F ? Justifier le choix.

II.2 — Réalisation et durée de vie de la liaison pivot

On s'intéresse au montage de roulements qui permet de guider l'ensemble {rotor moteur, bras} par rapport au châssis de la centrifugeuse. Un schéma d'architecture représente la solution technique envisagée sur la figure 13 du document annexe G. Dans cette solution, le bras est solidaire du rotor moteur guidé en rotation au moyen de deux roulements à billes à contact oblique montés dans le bâti.

Cette liaison est très majoritairement sollicitée par la pesanteur qui s'applique à l'ensemble mobile. On note $-P_m\vec{z}_2$ la charge appliquée sur la liaison pivot.

Question 20 Le schéma d'architecture présenté sur la figure 13 indique clairement que le roulement A est de plus grand diamètre que le roulement B ; quel est l'intérêt de ce choix ?

Afin de maximiser la rigidité de la liaison et éviter tout jeu dans le guidage, on souhaite précharger celui-ci.

Question 21 Pour chaque type de montage envisagé (O ou X), et pour différents scenarios de serrage des bagues, indiquer dans le tableau du document réponse ce qu'il faut faire pour réaliser la précharge en cochant la bonne case sur chaque ligne.

Dans la présente application, si l'on considère que le système n'est mis en rotation que lorsqu'il est équilibré, il n'existe pas de charge radiale sur la liaison pivot étudiée. Aussi, le choix des bagues à serrer n'est guidé que par la facilité de montage. Il est ainsi choisi de serrer les bagues extérieures des roulements dans le bâti.

Question 22 Indiquer et justifier le type de montage retenu.

On souhaite déterminer la précharge à installer dans le montage. Pour cela, on fait l'hypothèse que seuls les roulements se déforment lors de l'application de cette précharge, et que leur comportement peut être considéré linéaire. On modélise donc les roulements A et B par des ressorts de raideurs k_A et k_B respectivement. On note F_A et F_B les efforts, considérés positifs, exercés par les roulements sur l'arbre, dans l'axe de l'arbre. On note enfin δ_A et δ_B les compressions des roulements A et B. Les quantités δ_A et δ_B sont considérées positives quand le roulement est comprimé axialement. Elles ne devraient jamais être négatives puisqu'on ne souhaite pas avoir de jeu axial dans le roulement. On a donc les deux relations :

$$F_A = k_A\delta_A \quad \text{et} \quad F_B = k_B\delta_B$$

Dans la suite, pour simplifier les expressions littérales, on introduit la rigidité équivalente k_{eq} donnée par ;

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_A} + \frac{1}{k_B}$$

Le problème étudié est ainsi représenté sur la figure 14 du document annexe H.

On étudie tout d'abord la phase de précharge (pas d'effort extérieur P_m). Dans cette phase, toutes les quantités X introduites sont notées X^0. Lors de la phase de précharge, une cale d'épaisseur p est insérée entre la bague extérieure du roulement B et le bâti. Lors de cette action de précharge, l'arbre, considéré infiniment rigide, se déplace d'une quantité δ^0 du fait de la "compression" δ_A^0 et δ_B^0 des roulements A et B respectivement. Les efforts exercés par les roulements sur l'arbre sont notés F_A^0 et F_B^0.

Question 23 Indiquer le lien entre l'épaisseur de la cale p, δ_A^0 et δ_B^0 ; indiquer le lien entre F_A^0 et F_B^0 ; en déduire les expressions de F_A^0 et F_B^0 en fonction de p et k_{eq} uniquement.

On étudie maintenant la phase avec le chargement extérieur P_m en plus de la préchage. Dans cette nouvelle phase, le chargement extérieur conduit à un déplacement de l'arbre, relativement à la configuration préchargée, que l'on note δ. Par rapport à la phase de précharge, ce déplacement conduit à comprimer un peu plus encore le roulement A, et à décharger légèrement le roulement B.

Question 24 Exprimer la compression δ_A en fonction de δ et δ_A^0 ; exprimer la compression δ_B en fonction de δ et δ_B^0 ; indiquer le lien entre F_A , F_B et P_m ; en déduire l'expression de F_A en fonction de p, P_m, k_{eq} et k_{eq}/k_B puis l'expression de F_B en fonction de p, P_m, k_{eq} et k_{eq}/k_A.

Afin de garantir que le roulement le moins chargé (le roulement B) supporte une charge axiale minimale pour son bon fonctionnement, on impose $F_B = F_B^{min}$ et on cherche la précharge p qui permet d'atteindre cette valeur pour F_B.

Question 25 Exprimer l'épaisseur de la cale p à mettre en place pour obtenir $F_B = F_B^{min}$ sous charge, en fonction de F_B^{min}, P_m, k_{eq} et k_A.

Le constructeur opte pour les roulements présentés en annexe I. Il s'agit de roulements à billes à contact obliques mais à faible encombrement radial. On cherche maintenant à estimer la durée de vie de la liaison pivot ainsi construite. On considère pour cela que le système est correctement équilibré dans la très grande majorité du temps d'utilisation. Pour le dimensionnement en durée de vie, la liaison pivot ne supporte donc aucun effort radial mais uniquement l'effort axial $-P_m\vec{z}_2$ précédemment introduit. Le chargement étant purement axial sur chaque roulement, le constructeur des roulements retenus donne la formule suivante pour le calcul de la charge radiale équivalente : $P_{eq} = 0.33F_{axiale}$ où F_{axiale} désigne la charge axiale supportée par le roulement. La charge dynamique de base des roulements A et B est noté C_A et C_B respectivement.

Question 26 Dans le cas où $F_B = F_B^{min}$, donner l'expression analytique de la durée de vie L_A et L_B de chaque roulement, en millions de tours, en fonction de C_A, C_B, F_B^{min} et P_m.

On prendra pour efforts axiaux dans les roulements A et B respectivement : $F_A = 18000\ N$ et $F_B = F_B^{min} = 3000\ N$.

Question 27 Calculer la durée de vie, en millions de tours pour les deux roulements choisis en annexe I.

Question 28 En considérant que la vitesse moyenne de rotation de la centrifugeuse est de $\Omega_{moy} = 20\ rad.s^{-1}$ et que la centrifugeuse est utilisée 12 h par jour, estimer la durée de vie en jours du roulement ayant la durée de vie la plus faible ; commenter.

PARTIE III

Précision de l'accélération imposée (exigence 1.1.1)

Objectif — L'objectif de cette partie est de vérifier les exigences liées à la précision de l'accélération imposée au capteur ; pour cela, on étudie notamment les effet des déformations du bras dues aux chargements mécaniques et thermique.

III.1 — Allongement du bras sous chargement centrifuge

La longueur du bras au bout duquel sont installés les capteurs à calibrer détermine, pour une vitesse de rotation donnée, l'accélération centripète imposée au capteur. Le bras et l'équipage (étuves et chargement) ont eux-mêmes une accélération centripète. Les quantités d'accélérations associées seront interprétées dans la suite comme des forces centrifuges imposées au système alors considéré en quasi-statique. Si le bras s'allonge sous l'effet de ces actions centrifuges, alors l'éloignement des capteurs à l'axe de rotation augmente, et l'accélération centripète également. On se pose la question de la nécessité éventuelle de corriger la vitesse de rotation pour obtenir l'accélération souhaitée, tenant compte de ces déformations. Le modèle proposé est présenté sur la figure 17 de l'annexe J. Le bras (2^+) est modélisé par une poutre de longueur L, sollicitée par une charge linéique axiale $q(x)$ qui dépend linéairement de la position x sur la poutre : $q(x) = ax$. La poutre est également sollicitée par un effort ponctuel axial F en $x = L$. Dans cette étude, la pesanteur n'est pas prise en compte.

Pour une liaison en P, la forme générale du torseur des actions mécaniques transmissibles d'un solide (i) sur un solide (j) sera prise de la forme suivante, avec des composantes exprimées dans la base $\mathcal{B}_2 = (\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$:

$$\left\{\mathcal{T}^{P}_{(i)\to(j)}\right\} = \begin{Bmatrix} X_P & L_P \\ Y_P & M_P \\ Z_P & N_P \end{Bmatrix}_{P,\mathcal{B}_2}$$

Question 29 Donner la forme du torseur d'actions mécaniques $\left\{\mathcal{T}^{A}_{(1)\to(2^+)}\right\}$ au point A de la liaison entre le bras (2^+) et l'arbre (1).

Question 30 Préciser le système isolé et les théorème(s) utilisé(s) permettant d'obtenir la ou les inconnues de liaison utiles à l'étude de l'allongement du bras.

Question 31 Donner l'expression de l'action de liaison X_A en fonction de a, L, et F.

La forme du torseur des efforts de cohésion (ou torseur des efforts intérieurs) permet de définir le type de sollicitations vues par le bras pour le problème posé. On note comme suit les composantes du torseur des efforts de cohésion en $G(x)$:

$$\left\{\mathcal{T}_{(P^+)\to(P^-)}\right\} = \begin{Bmatrix} N & M_t \\ T_y & M_{fy} \\ T_z & M_{fz} \end{Bmatrix}_{G(x),\mathcal{B}_2}$$

où $G(x)$ désigne le centre d'une section droite du bras d'abscisse x.

Question 32 Donner l'expression de l'effort normal $N(x)$ en fonction de a, L, x, et F.

On note $u(x)$ le déplacement selon $\vec{x}_2$ d'un point d'abscisse x du bras sous l'effet du chargement en traction.

Question 33 Donner la relation liant l'effort normal $N(x)$, la dérivée $u'(x)$ du déplacement $u(x)$, le module de Young E, et la section résistante S_b du bras.

L'exploitation de la précédente expression permet de trouver le déplacement $u(x)$ sous la forme suivante :

$$u(x) = A_0 + A_1 x + A_3 x^3.$$

Question 34 Après avoir précisé quelle est la valeur du déplacement $u(0)$, donner les expressions des trois coefficients A_0, A_1 et A_3 en fonction de a, L, F, E et S_b.

Question 35 En déduire l'expression de l'allongement du bras $\Delta L = u(L) - u(0)$ en fonction de a, L, F, E, S_b.

Le bras tourne à une vitesse angulaire Ω. Le capteur accélérométrique à calibrer est situé en bout de bras, à une distance $\widetilde{L}(\Omega) = L + \Delta L(\Omega)$ de l'axe de rotation qui change en fonction de la vitesse de rotation du bras, du fait du chargement centrifuge subi par le bras. L'accélération centripète imposée au capteur accélérométrique par la centrifugeuse est de la forme $\Gamma_c(\widetilde{L}) = \widetilde{L}\Omega^2$. On note e_Γ l'erreur relative sur cette accélération imposée associée à l'allongement du bras définie par :

$$e_\Gamma = \frac{\Gamma_c(\widetilde{L}) - \Gamma_c(L)}{\Gamma_c(L)}$$

Question 36 Donner l'expression de l'erreur relative e_Γ sur l'accélération centripète imposée en fonction de L et ΔL.

En remplaçant les quantités a et F par leurs expressions en fonction de la masse volumique du bras ρ, de la section du bras S_b, de la vitesse angulaire du bras Ω, et de la masse $(m_e^+ + m_c^+)$ de l'équipage placé en bout de bras (étuve et chargement), l'allongement du bras est de la forme suivante :

$$\Delta L = \frac{L^2\Omega^2}{3ES_b}(\rho S_b L + 3(m_e^+ + m_c^+))$$

Question 37 Dans le cas idéal où la masse de l'équipage placé en bout de bras est négligeable $(m_e^+ + m_c^+) \approx 0$, donner l'expression de l'erreur relative e_Γ^0 en fonction de Ω, L, ρ, et E ; effectuer l'application numérique à la vitesse de rotation $\Omega = 30\ rad.s^{-1}$, et pour les valeurs de L, E et ρ données dans l'annexe N ; la valeur obtenue est-elle en accord avec le cahier des charges ?

Dans le cas plus réaliste où la masse $(m_e^+ + m_c^+)$ n'est pas négligeable, l'erreur sera nécessairement plus grande que celle calculée à la question précédente.

III.2 — Allongement du bras sous chargement thermique

La présence des étuves en bout de bras peut causer une variation de la température de la zone dans laquelle évolue le bras. De ce fait, le bras peut se dilater, ou se rétracter par rapport à son état initial à température ambiante. Dans cette sous-partie, on cherche à évaluer l'ordre de grandeur de cette variation de longueur du bras, et son influence sur la qualité de la calibration d'un capteur accélérométrique.

On fait l'hypothèse que le champ de température est homogène dans le bras. La déformation longitudinale du bras, d'origine thermique est alors homogène pour tout $x \in [0, L]$ et vaut $\varepsilon^{th} = \alpha^{th}\Delta T$ où α^{th} est le coefficient de dilatation du bras et ΔT est la variation de température par rapport à l'état initial à température ambiante.

On définit l'erreur relative sur l'accélération vue par le capteur d'origine thermique par :

$$e_\Gamma^{th} = \frac{\Delta L^{th}}{L}$$

Question 38 Donner l'expression de l'erreur e_{Γ}^{th} sous chargement thermique en fonction de α^{th} et ΔT, puis effectuer l'application numérique dans le cas extrême d'une élévation de température de $\Delta T = 10^{o}C$.

III.3 — Conclusion et préconisations

Question 39 Du fait des chargements mécaniques et thermique, l'exigence 1.1.1 peut-elle être respectée ? Justifier.

Question 40 Quelle proposition peut-on faire pour améliorer la précision ?

PARTIE IV — Proposition d'une évolution technique

Objectif — Le constructeur souhaite limiter l'impact de la flexion du bras sur la précision de l'accélération imposée au capteur accélérométrique. Pour cela un dispositif mécanique motorisé est proposé. L'objectif de cette partie est de pré-dimensionner ce dispositif.

Au niveau de l'exigence 1.1.1.0, le cahier des charges impose une précision relative de l'ordre de 10 *ppm* (ppm : partie par million) sur l'accélération imposée au capteur. Pour une accélération imposée de $100g$, cela autorise une erreur de $10^{-3}g$.

Lors du fonctionnement du système, le bras fléchit d'une part sous l'effet de la pesanteur. D'autre part, dans le cas où le centre de gravité du chargement placé en bout de bras n'est pas sur l'axe $(A, \vec{x}_2)$ mais décalé sur l'axe $\vec{z}_2$, les efforts centrifuges vont également faire fléchir le bras. Ces deux effets combinés font que le plateau supportant les capteurs en cours de calibration subit une rotation, principalement autour de l'axe $\vec{y}_2$. De ce fait, l'axe de mesure du capteur accélérométrique noté $\vec{n} = \vec{x}_2$ dans l'état initial, ou $\vec{n'}$ dans la configuration déformée, est incliné d'un angle ψ par rapport à l'axe $\vec{x}_2$. Ainsi l'accélération perçue n'est pas l'accélération imposée par la centrifugeuse. La qualité de la calibration s'en trouve affectée bien que l'angle ψ soit très faible. Ce problème est illustré sur la figure 20 en annexe L.

On souhaite dans un premier temps estimer l'angle $\overline{\psi}$ à ne pas dépasser pour maintenir le niveau de précision souhaité. On rappelle pour la suite que les développements limités en $x = 0$ des fonctions $\alpha \to \cos(\alpha)$ et $\alpha \to \sin(\alpha)$ sont :

$$\cos(\alpha) = 1 - \frac{\alpha^2}{2!} + \frac{\alpha^4}{4!} + \ldots + (-1)^n \frac{\alpha^{2n}}{(2n)!} + o\left(\alpha^{2n+1}\right)$$

$$\sin(\alpha) = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} + \ldots + (-1)^n \frac{\alpha^{2n+1}}{(2n+1)!} + o\left(\alpha^{2n+2}\right)$$

Question 41 Considérant que l'accélération centripète imposée en bout de bras est $\Gamma\vec{x}_2$, donner l'expression de l'accélération centripète réellement mesurée $\widetilde{\Gamma}$ par le capteur en fonction de Γ et ψ. En effectuant un développement limité de $\widetilde{\Gamma}$ à l'ordre 2 en ψ, donner une expression polynomiale de $\widetilde{\Gamma}$ en fonction de ψ et Γ.

Question 42 En déduire l'expression de l'erreur relative $\left|(\widetilde{\Gamma} - \Gamma)/\Gamma\right|$ en fonction de ψ seulement ; indiquer l'angle $\overline{\psi}$ à ne pas dépasser pour rester dans la précision souhaitée de 10 *ppm*.

Afin de limiter la flexion du bras, deux solutions peuvent être envisagées :

— rigidifier le bras ;

— développer un système mécanique permettant de créer un effort centrifuge complémentaire en un point décalé de l'axe du bras et permettant d'annuler la rotation.

C'est la seconde solution qui est retenue. Le système mécanique à développer est présenté schématiquement sur la figure 18 du document annexe K. Le problème étant identique sur chaque bras, on ne considère qu'un seul côté du bras. Pour simplifier, on limite l'étude au cas où les centres de gravité du plateau, de l'étuve, et du chargement sont placés sur l'axe $(H, \vec{z})$. En schématisant le problème dans le plan $(H, \vec{x}_2, \vec{z})$, on arrive au modèle présenté en figure 21 de l'annexe L.

Pour simplifier l'étude, on néglige l'action de la pesanteur sur le bras lui-même. Les actions mécaniques considérées sont donc les suivantes :

— Pesanteur sur la masse mobile en G_m : $-m_m g\vec{z}$;
— Pesanteur sur l'étuve et le plateau de chargement en G_e : $-m_e g\vec{z}$;
— Pesanteur sur l'ensemble de capteurs positionnés en bout de bras en G_c : $-m_c g\vec{z}$;
— Effort centrifuge sur la masse mobile en G_m : $m_m L\Omega^2\vec{x}_2$;
— Effort centrifuge sur l'étuve et le plateau de chargement en G_e : $m_e L\Omega^2\vec{x}_2$;
— Effort centrifuge sur l'ensemble de capteurs positionnés en bout de bras en G_c : $m_c L\Omega^2\vec{x}_2$.

On note $\left\{\mathcal{T}_{Ext\to Bras}\right\}$ le torseur résultant en H^+ de ces actions mécaniques imposées :

$$\left\{\mathcal{T}_{Ext\to Bras}\right\} = \left\{\begin{matrix} X & L_{H^+} \\ Y & M_{H^+} \\ Z & N_{H^+} \end{matrix}\right\}_{H^+,(\vec{x}_2,\vec{y}_2,\vec{z})} \tag{IV.1}$$

Question 43 Donner l'expression des composantes du torseur $\left\{\mathcal{T}_{Ext\to Bras}\right\}$ en fonction de z_m, z_e, z_c, L, m_m, m_e, m_c, Ω et g.

La rotation parasite ψ selon $\vec{y}_2$, en bout de bras, est induite par les chargements Z et M_{H^+} introduits dans la définition (IV.1) en fonction des données du problème. Le bras est modélisé par une poutre en acier de module d'élasticité E. Le problème étudié étant linéaire, on utilise le principe de superposition. On considère donc les deux problèmes génériques indépendants (P_1) et (P_2) présentés sur les figures 22 et 23 du document annexe L. Dans ces problèmes, afin de se placer dans un cadre classique, l'axe de la poutre $\vec{x}_2$ est noté $\vec{X}$, l'axe transversal $\vec{z}_2 = \vec{z}_1 = \vec{z}$ selon lequel se déforme la poutre est noté $\vec{Y}$, et l'axe $\vec{y}_2$ selon lequel le moment est imposé est noté $\vec{Z}$. Le trièdre $(\vec{X} = \vec{x}_2, \vec{Y} = \vec{z}_2, \vec{Z} = -\vec{y}_2)$ est direct. Pour le problème (P_i) $i \in \{1, 2\}$, on note $\psi_i(x)$ la rotation de la section droite selon $\vec{Z}$ et $y_i(x)$ le déplacement transversal selon $\vec{Y}$ sous le chargement imposé. On se place dans le cadre de l'hypothèse de Bernoulli, ce qui signifie que la rotation de la section droite est égale à la dérivée du déplacement transversal :

$$\psi_i(x) = \frac{dy_i(x)}{dx}$$

Dans un premier temps, on considère le problème (P_1) présenté en figure 22. Le bras est sollicité par un couple $C\vec{Z}$. La forme du torseur des efforts de cohésion (ou torseur des efforts intérieurs) permet de définir le type de sollicitations vues par la poutre. On fournit sur le document réponse un tableau présentant le torseur des efforts de cohésion que l'on note comme suit :

$$\left\{\mathcal{T}_{(P^+)\to(P^-)}\right\} = \left\{\begin{matrix} N & M_t \\ T_Y & M_{fY} \\ T_Z & M_{fZ} \end{matrix}\right\}_{G,(\vec{X},\vec{Y},\vec{Z})}$$

où G, d'abscisse $x \in [0, L]$ désigne le centre de la section droite.

Question 44 Pour le problème (P_1), donner les expressions de chacune des composantes du torseur des efforts de cohésion en fonction de C ; si une composante est nulle, indiquer clairement 0 ; indiquer par une croix dans le tableau quelles sont les sollicitations présentes dans le bras pour ce problème.

On note S l'aire de la section droite, de centre G et d'abscisse x, et I_{GZ} le moment quadratique de la section droite par rapport à l'axe $(G, \vec{Z})$.

Question 45 Pour le problème (P_1), donner le lien entre la rotation de la section droite $\psi_1(x)$, le moment fléchissant M_{fZ}, et les caractéristiques géométriques et matérielles précédemment introduites.

Question 46 Indiquer dans le tableau du document réponse la ou les équations pertinentes issues des conditions aux limites à prendre en compte ; en déduire l'expression de la rotation $\psi_1(L)$ en bout de bras pour le problème (P_1) en fonction de C, E, I_{GZ} et L.

On étudie maintenant le problème (P_2) présenté en figure 23.

Question 47 Pour le problème (P_2), donner les expressions de chacune des composantes du torseur des efforts de cohésion en fonction de F, L et x ; si une composante est nulle, indiquer clairement 0 ; indiquer par une croix dans le tableau quelles sont les sollicitations présentes dans le bras pour ce problème.

On fournit ci-dessous l'expression du déplacement transversal $y_2(x)$ solution du problème (P_2) :

$$y_2(x) = \frac{F}{6EI_{GZ}} x^2 (3L - x)$$

Question 48 Déduire de $y_2(x)$ l'expression de la rotation $\psi_2(x)$; en déduire l'expression de la rotation $\psi_2(L)$ en bout de bras pour le problème (P_2) en fonction de F, E, I_{GZ} et L.

Question 49 Par superposition donner l'expression de la rotation totale ψ en $x = L$ en fonction de C, F, E, I_{GZ} et L ; donner les expressions de F et C en fonction des chargements Z et M_{H^+} introduits dans la définition (IV.1).

La rotation totale ψ est de la forme suivante :

$$\psi = -\frac{L^2}{EI_{GZ}} \left[A + B\Omega^2\right]$$

Question 50 Donner les expressions des coefficients A et B en fonction de m_c, m_e, m_m, g, z_c, z_e, z_m.

Question 51 Pour une masse mobile installée m_m, donner sa position z_m permettant d'annuler la rotation en bout de bras en fonction de m_c, m_e, m_m, g, z_c, z_e et Ω ; effectuer l'application numérique pour les valeurs particulières suivantes : $z_e = 0$, $z_c = 0.1\ m$, $m_e = 100\ kg$, $m_c = 20\ kg$, $m_m = 40\ kg$ et $\Omega = 30\ rad.s^{-1}$; cette position est-elle réalisable sur le système étudié ?

On cherche maintenant à pré-dimensionner la chaîne électromécanique proposée sur la figure 19 de l'annexe K. La poulie motrice de rayon primitif r_m est en liaison pivot avec le bras, et on note ω_m sa vitesse angulaire par rapport au bras. Cette poulie est entraînée par un moteur à courant continu associé à un réducteur. On note $k = \omega_{mot}/\omega_m$ le rapport de réduction (valeur supérieure à 1) du réducteur où ω_{mot} désigne la vitesse angulaire du moteur à courant continu. La poulie réceptrice, entraînée par la poulie motrice via une courroie crantée, est de rayon primitif r_r, et est également en liaison pivot avec le bras. On note ω_r sa vitesse angulaire. La masse additionnelle, en liaison glissière avec le bras, est en liaison hélicoïdale avec une vis solidaire de l'axe récepteur. Le pas de la liaison hélicoïdale est noté pas.

Question 52 Exprimer la vitesse de translation V de la masse additionnelle relativement au bras en fonction de r_m, r_r, pas, k et de la vitesse angulaire de l'arbre moteur ω_{mot} ; donner l'expression de la vitesse moyenne ω_{mot} permettant de parcourir la course maximale $2h_m$ souhaitée pour la masse mobile en un temps T imposé.

Du fait des frottements présents dans la chaîne de transmission mécanique proposée, on introduit le rendement mécanique de la transmission noté η.

Question 53 Donner l'expression du couple moteur c_{mot} nécessaire pour équilibrer le poids de la masse mobile, en fonction de r_m, r_r, pas, k, m_m, g et η ; donner également l'expression de la puissance $\mathcal{P}_{mot}$ devant être développée par le moteur en régime permanent en fonction de h_m, $m_m\ g$, T et η ; réaliser l'application numérique.

Les expressions de ω_{mot} et c_{mot} peuvent se mettre sous la forme :

$$\omega_{mot} = X_\omega \frac{K}{pas} \quad \text{et} \quad c_{mot} = X_c \frac{pas}{K}$$

où $K = k\dfrac{r_r}{r_m}$.

Question 54 Donner les valeurs numériques de X_ω et X_c afin que, avec le *pas* donné en $mm.tr^{-1}$ et h_m donné en mm, le calcul donne ω_{mot} en $tr.min^{-1}$ et c_{mot} en $N.mm$.

On retient pour l'application l'association moteur, réducteur, et codeur présentée dans l'annexe M.

Question 55 Justifier que cette proposition est adaptée au besoin.

La précision de positionnement de la masse mobile est impactée notamment par le choix réalisé pour le codeur et par le jeu angulaire en sortie du réducteur. On définit :

— Δz_{cod} : l'incertitude de positionnement de la masse mobile due à la résolution du codeur ;

— Δz_{red} : l'incertitude de positionnement de la masse mobile due au jeu dans le réducteur.

Question 56 Donner les valeurs numériques de Δz_{cod} et Δz_{red} en mm ; si l'on souhaite améliorer la précision de positionnement de la masse, que faut-il faire ?

IMPRIMERIE NATIONALE – 26 1057 – D'après documents fournis

ANNEXE A
Détails des exigences

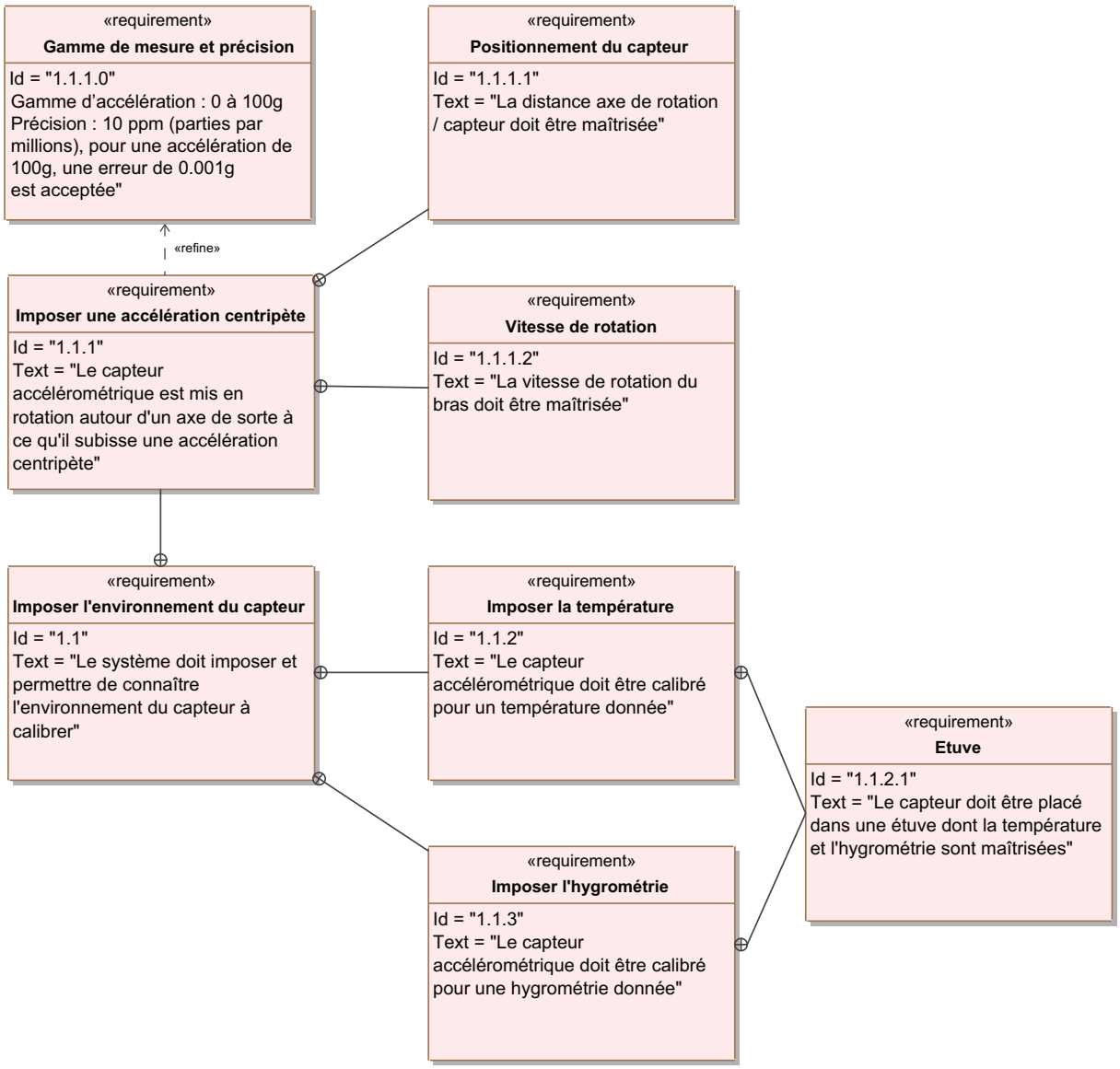


Figure 5 – Sous-exigences de l'exigence 1.1 liée à la maîtrise de l'environnement du capteur accélérométrique pendant sa calibration

B

Tournez la page S.V.P.

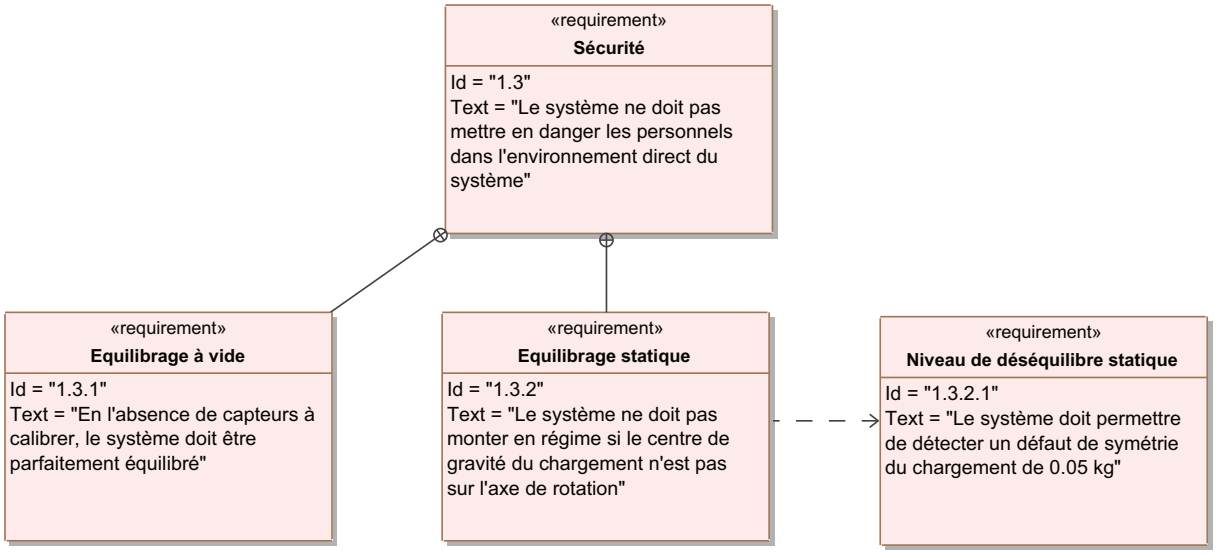


Figure 6 – Sous-exigences de l'exigence 1.3 liée à la sécurité pendant le fonctionnement du système

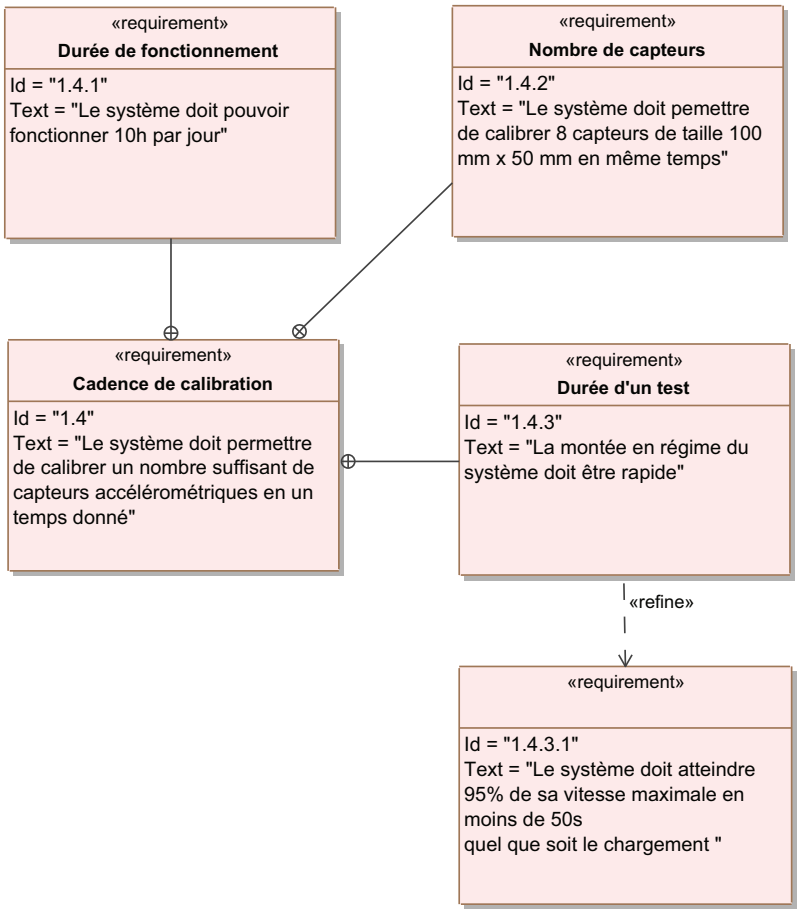


Figure 7 – Sous-exigences de l'exigence 1.4 liée à la cadence de calibration

ANNEXE B

Calcul de l'inertie équivalente

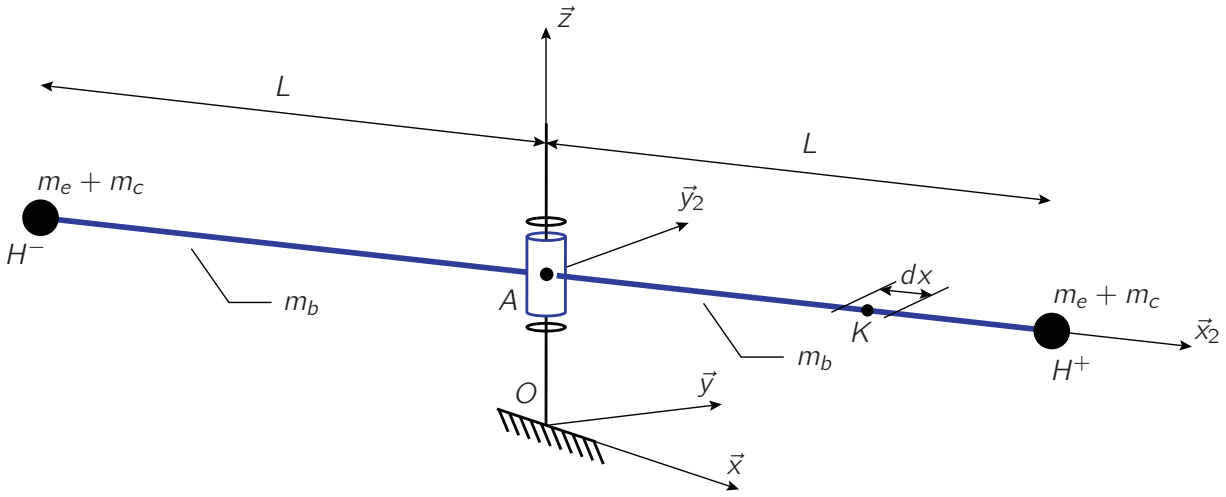


Figure 8 – Schéma permettant le calcul de l'inertie équivalente au bras et aux étuves ramenées à l'axe moteur

ANNEXE C Schéma de la centrifugeuse

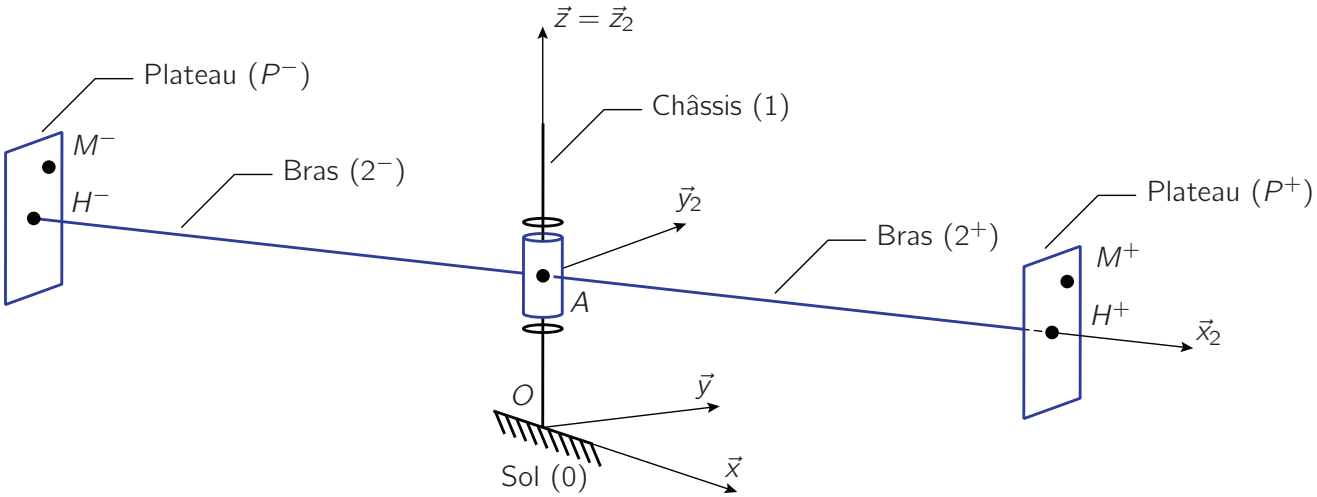


Figure 9 – Schématisation et paramétrage de la centrifugeuse ; le châssis (1) de la centrifugeuse est supposé encastré avec le sol (0) ; $H^+\vec{M}^+ = y_c^+\vec{y}_2 + z_c^+\vec{z}_2$; $H^-\vec{M}^- = y_c^-\vec{y}_2 + z_c^-\vec{z}_2$; $\vec{OA} = H\vec{z}$

La centrifugeuse repose en fait sur trois pieds distribués comme suit :

$$\vec{OP_1} = R_P\vec{x} - h\vec{z}$$

$$\vec{OP_2} = -\frac{1}{2}R_P\vec{x} + \frac{\sqrt{3}}{2}R_P\vec{y} - h\vec{z}$$

$$\vec{OP_3} = -\frac{1}{2}R_P\vec{x} - \frac{\sqrt{3}}{2}R_P\vec{y} - h\vec{z}$$

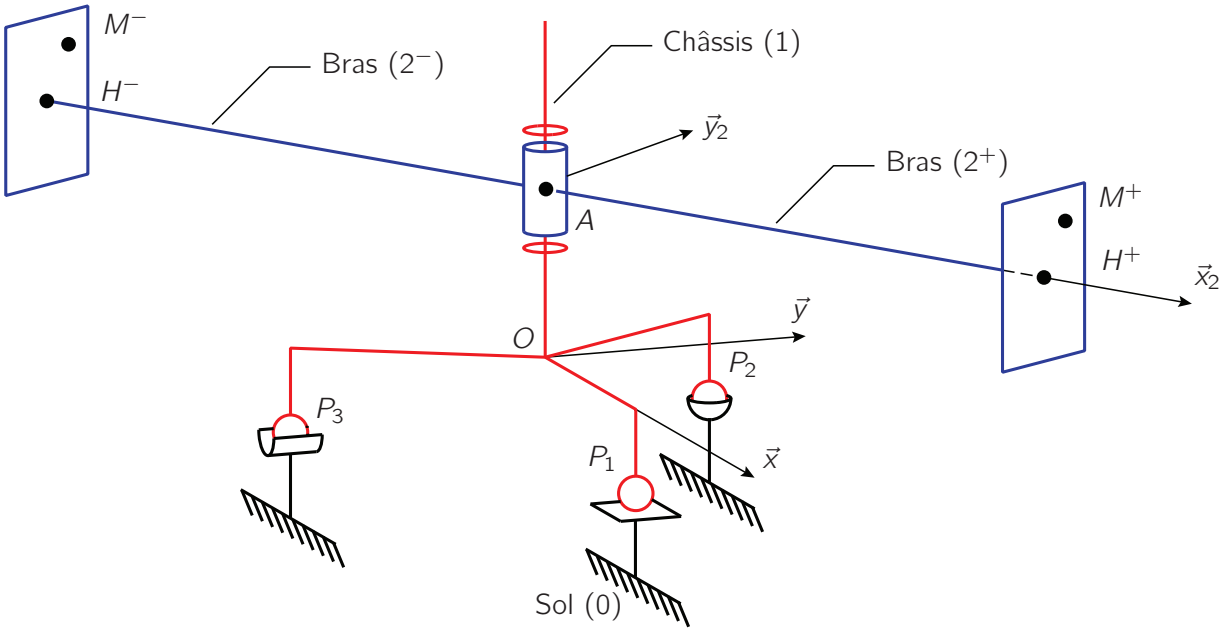


Figure 10 – Schématisation de la liaison entre le châssis de la centrifugeuse (1) et le sol (0)

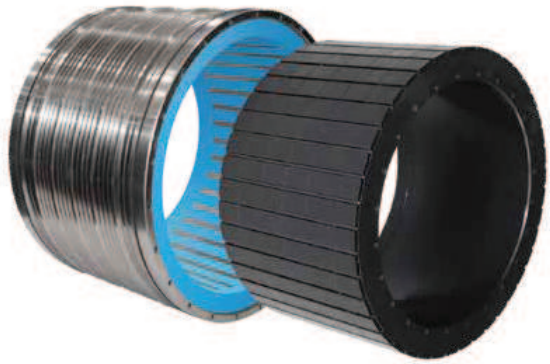
ANNEXE **D**

Résultats de simulation

Couple C_m en $N.m$	Ω_∞ en $rad.s^{-1}$	$t_{90\%}$ en s	$t_{95\%}$ en s	$t_{99\%}$ en s
25	7.59	173.69	216.11	312.25
50	10.74	122.82	152.82	220.8
75	13.15	100.28	124.77	180.28
100	15.19	86.85	108.06	156.13
125	16.98	77.68	96.65	139.64
150	18.6	70.91	88.23	127.48
175	20.09	65.65	81.68	118.02
200	21.48	61.41	76.41	110.4
225	22.78	57.9	72.04	104.08
250	24.02	54.93	68.34	98.74
275	25.19	52.37	65.16	94.15
300	26.31	50.14	62.39	90.14
325	27.38	48.17	59.94	86.6
350	28.42	46.42	57.76	83.45
375	29.41	44.85	55.8	80.62
400	30.38	43.42	54.03	78.06
425	31.31	42.13	52.42	75.73
450	32.22	40.94	50.94	73.6
475	33.1	39.85	49.58	71.64
500	33.96	38.84	48.32	69.82
525	34.8	37.9	47.16	68.14
550	35.62	37.03	46.08	66.57
575	36.42	36.22	45.06	65.11
600	37.21	35.45	44.11	63.74
625	37.97	34.74	43.22	62.45

Tableau 1 – Résultats de simulation donnant, pour différents couples moteur constants dans le temps, la vitesse angulaire maximale Ω_∞ atteinte par le bras de la centrifugeuse, et les temps $t_{x\%}$ nécessaires pour atteindre $x\%$ de Ω_∞

Catalogue des moteurs couple



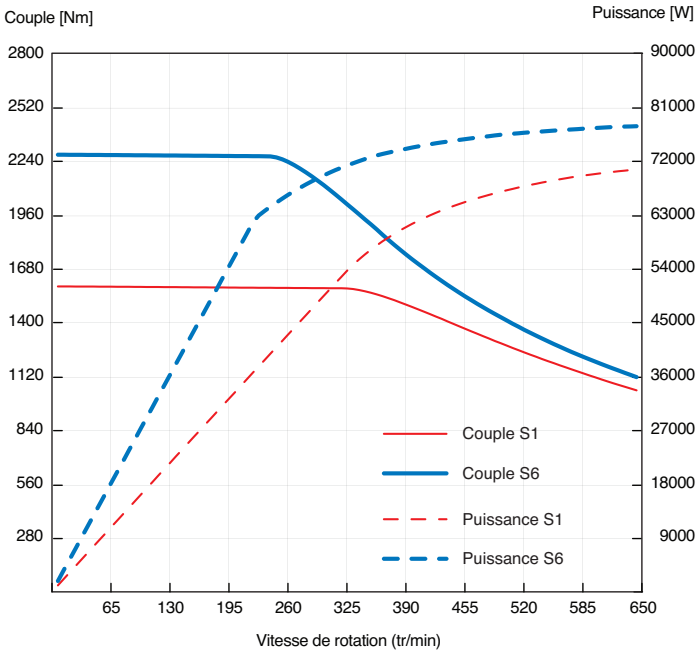


Figure 11 – Exemple de courbes caractéristiques des moteurs TKH (Phase Motion Control)

Sur la figure 11, on repère 2 courbes de couples, et deux courbes de puissance. Le couple S1 (C_{S1}) désigne le couple que peut délivrer le moteur en continu, sans surchauffe. Le couple S6 (C_{S6}) désigne le couple que peut délivrer le moteur de façon intermittente : sur un cycle de 60 s, le moteur est en charge pendant 40% du temps (24 s), et sans charge pendant 60% du temps (36 s). Sur les deux courbes de couple, on remarque la présence d'une zone à couple constant, puis une zone où le couple chute. On note $N_{lim,S1}$ et $N_{lim,S6}$ les vitesses de rotation limite à partir desquelles les couples C_{S1} et C_{S6} chutent respectivement.

	C_{S1}	C_{S6}	$N_{lim,S1}$	$N_{lim,S6}$
Référence	$N.m$	$N.m$	$tr.min^{-1}$	$tr.min^{-1}$
TKH 295-100-26	510	748	186	130
TKH 295-150-13	790	1140	405	345
TKH 295-150-26	790	1140	178	138
TKH 365-100-10	1000	1460	510	390
TKH 365-100-20	1000	1470	240	195
TKH 365-150-15	1570	2275	330	255
TKH 445-100-12	1550	2270	405	315
TKH 445-100-25	1550	2270	190	145
TKH 445-150-19	2400	3516	260	200

Tableau 1 – Données techniques de quelques moteurs de la gamme TKH (Phase Motion Control)

ANNEXE F

Catalogue des capteurs d'efforts



Figure 12 – Capteur d'effort de la gamme LCF-450 commercialisés par la société FUTEK

Référence	Charge maximale (N)	Fixation	Flèche sous charge (mm)	Fréquence propre (Hz)
FSH04169	2235	M16x2	2.5e-2	3000
FSH04171	4450	M16x2	5.0e-2	3000
FSH04173	8900	M16x2	2.5e-2	6300
FSH04175	22250	M16x2	5.0e-2	7000
FSH04177	44500	M16x2	1.0e-1	7000

Tableau 1 – Résumé des données techniques des capteurs d'effort de la gamme LCF-450 commercialisés par la société FUTEK

ANNEXE G — Architecture de la liaison pivot

La figure 13 présente un schéma d'architecture de la solution technique envisagée pour le guidage en rotation du bras par rapport au bâti de la centrifugeuse. Les roulements A et B employés sont des roulements à billes à contact obliques. Volontairement, le choix de montage de ces roulements en O ou en X, ainsi que les arrêts axiaux nécessaires entre les roulements, le rotor, et le bâti, ne sont pas représentés. Ces éléments font l'objet de questions dans la partie II.

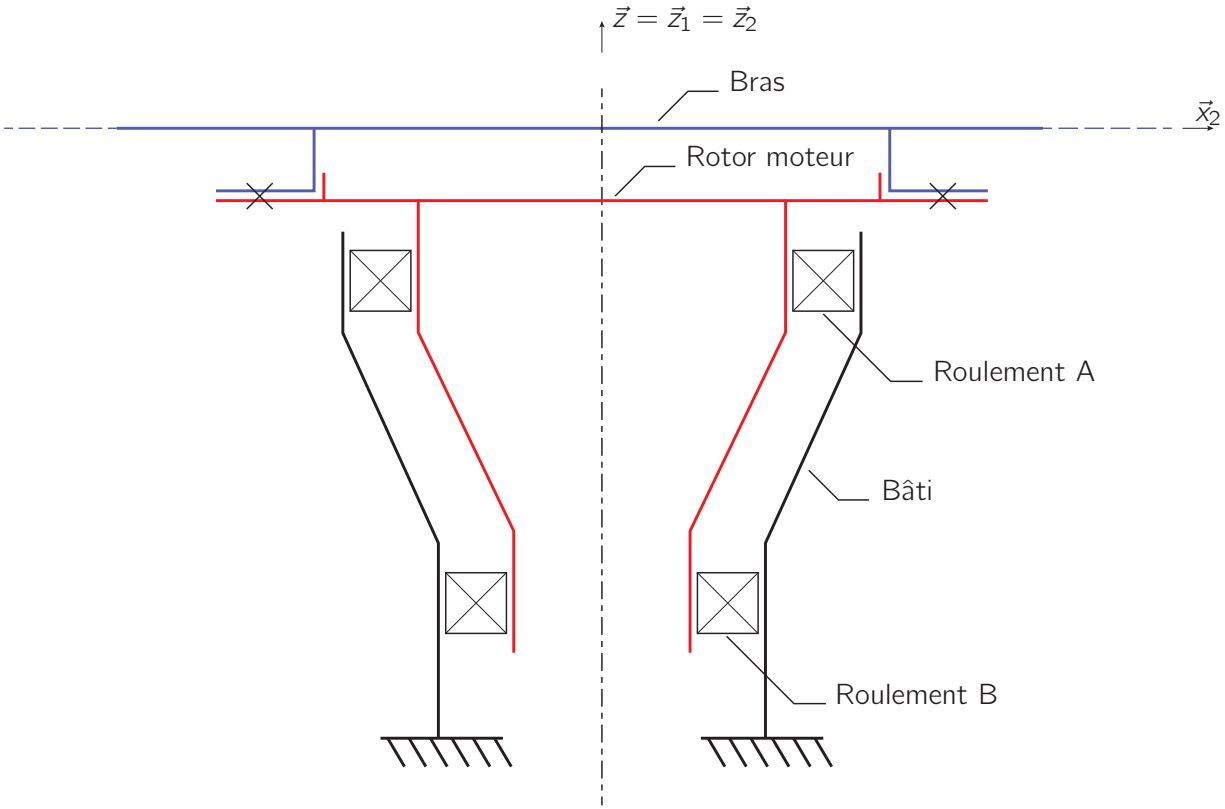


Figure 13 – Schéma d'architecture de la solution technique envisagée pour le guidage en rotation du bras par rapport au bâti de la centrifugeuse

ANNEXE H

Modélisation du montage de roulements préchargé

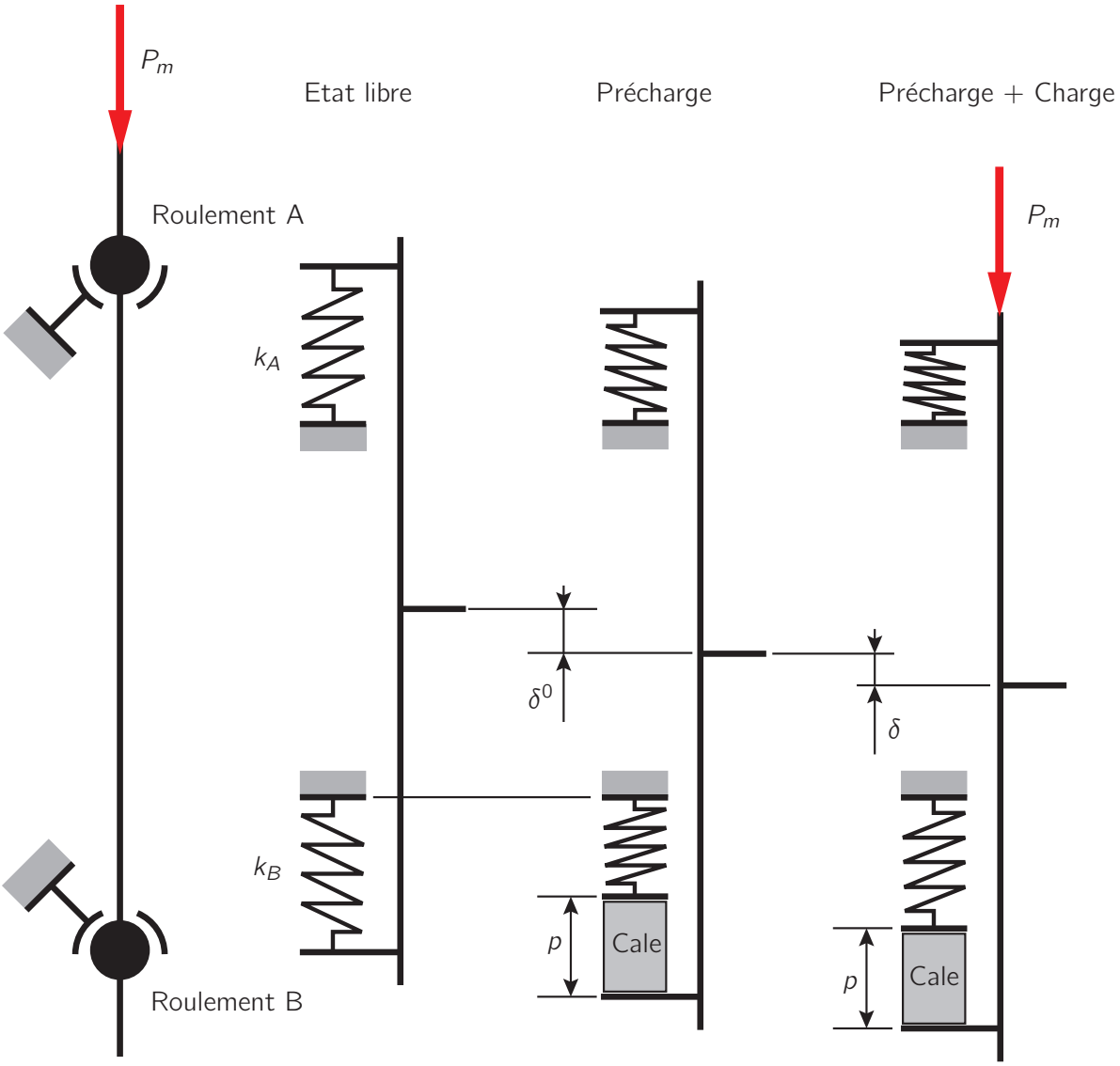


Figure 14 – Modélisation du montage de roulements sous l'action d'une précharge et d'une charge axiale extérieure

ANNEXE

Fiche technique des roulements



Figure 15 – Vue d'un roulement mince de la gamme SKF-Kaydon

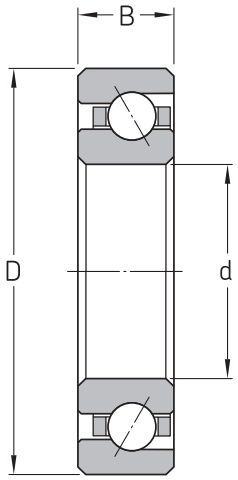


Figure 16 – Représentation en coupe d'un roulement et des notations utilisées dans le tableau 1

Notation	Détail	Roulement A	Roulement B
d	Diamètre intérieur	360 mm	200 mm
D	Diamètre extérieur	400 mm	240 mm
B	Largeur	20 mm	20 mm
C	Charge dynamique de base	36.1 kN	26.5 kN
C_0	Charge statique de base	103.0 kN	59.3 kN

Tableau 1 – Données géométriques (voir figure 16) et techniques des roulements utilisés

ANNEXE J

Etude mécanique du bras

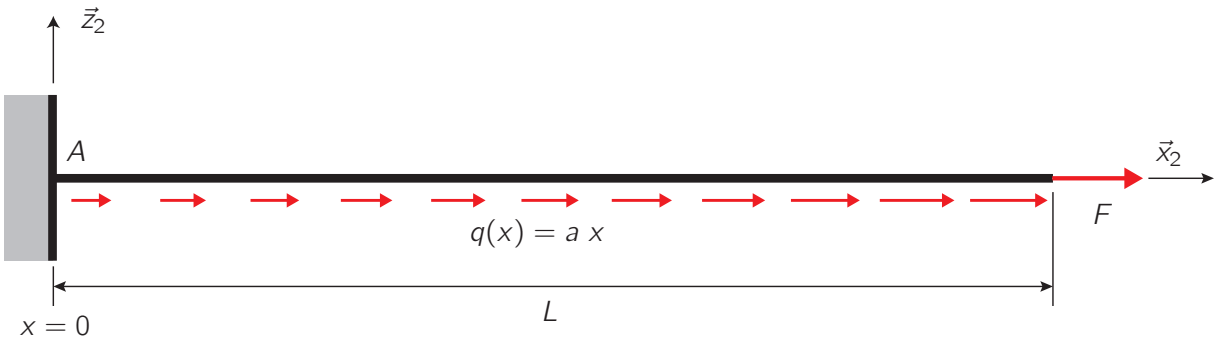


Figure 17 – Modélisation du bras (2^+) sollicité par les efforts centrifuges

Le bras est modélisé comme une poutre de section résistante S_b et chargé par un effort ponctuel $F\vec{x}$ à l'extrémité $x = L$, et par une force linéique $\vec{q}(x) = q(x)\vec{x}_2 = a\ x\ \vec{x}_2$ en tout point d'abscisse $x \in [0, L]$.

ANNEXE K — Schéma d'un système de correction

La figure 18 présente schématiquement le dispositif mécanique envisagé pour limiter la rotation à l'extrémité du bras. Une masse mobile dans la direction de l'axe de rotation est placée à chaque extrémité du bras.

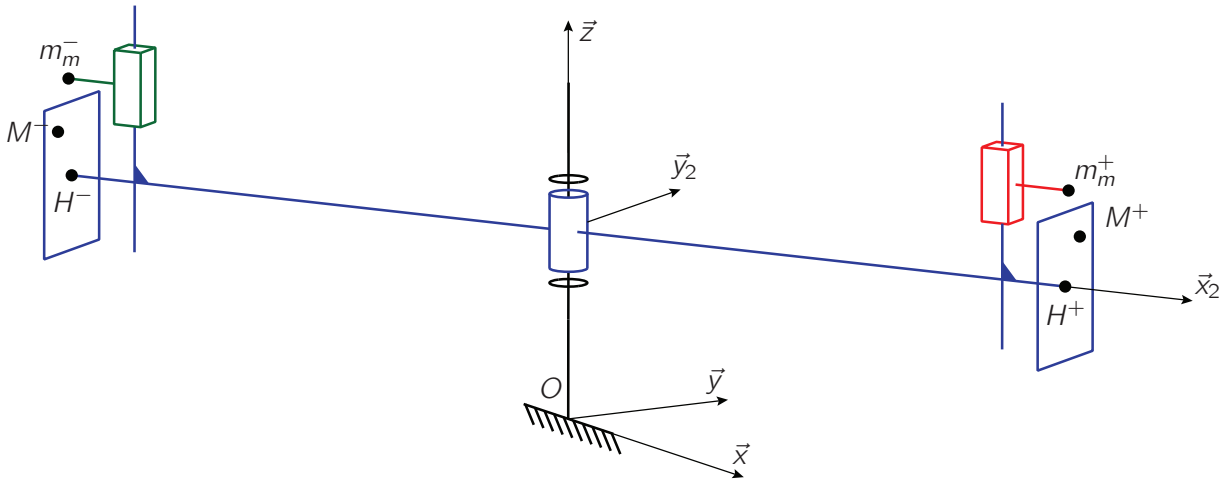


Figure 18 – Schématisation de la centrifugeuse incluant un dispositif de correction

La position de chaque masse est pilotée de façon indépendante par un système électromécanique comprenant un moteur à courant continu, un système de réduction et de transformation du mouvement de rotation en un mouvement de translation. Le schéma de cette transmission est proposé sur la figure 19.

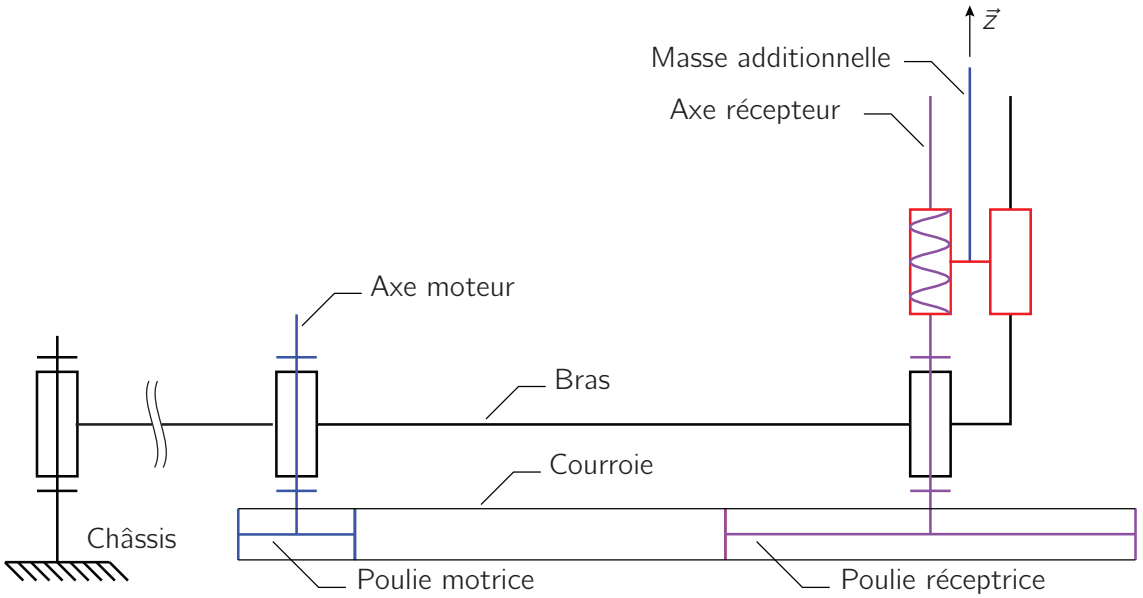


Figure 19 – Schématisation de la transmission mécanique permettant de déplacer la masse en bout de bras afin de corriger la rotation du bras

ANNEXE L

Sollicitation du bras en flexion

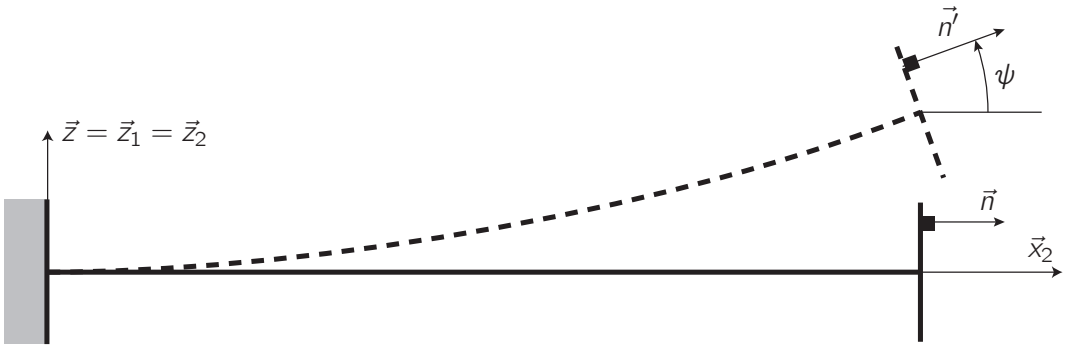


Figure 20 – Défaut d'orientation de l'axe de mesure du capteur accélérométrique en flexion

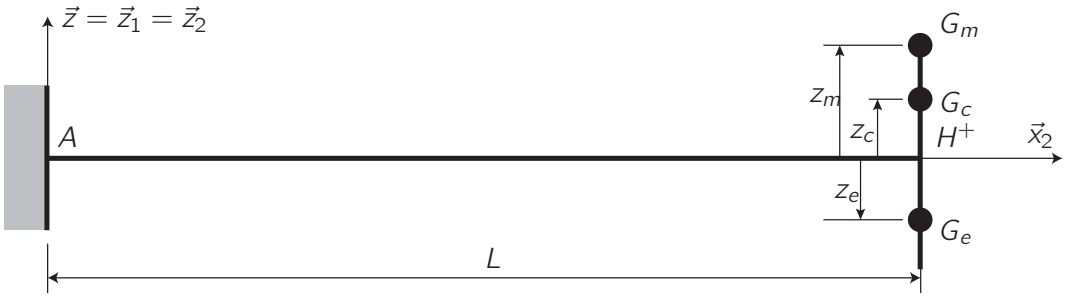


Figure 21 – Paramétrage de la position des centres de gravité du plateau de chargement et de son étuve, noté G_e, du chargement noté G_c, et de la masse mobile noté G_m (ici $z_e < 0$)

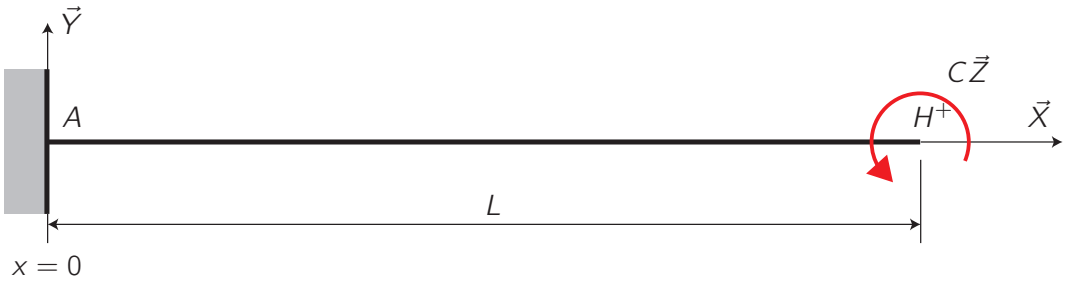


Figure 22 – Problème (P_1) : modèle du bras sollicité par un moment pur porté par l'axe $\vec{Z}$

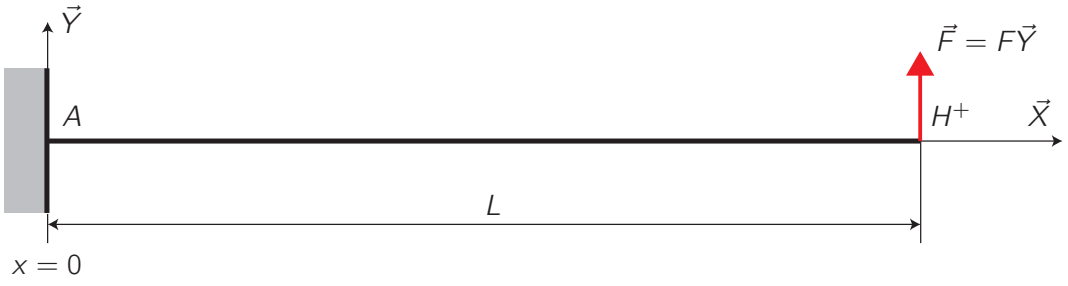


Figure 23 – Problème (P_2) : modèle du bras sollicité par un effort transverse porté par l'axe $\vec{Y}$

ANNEXE **M**

Détails de la chaîne électromécanique proposée

La chaîne électromécanique proposée est composée :
— d'un moteur Maxon (figure M.24(b)) à courant continu dont les spécifications techniques sont fournies dans le tableau 1 ;
— d'un codeur maxon (figure M.24(a)) monté sur le moteur dont le nombre d'impulsions par tour est $N_{imp} = 1024$;
— d'un réducteur à train épicycloïdal Maxon (figure M.24(c)) à courant continu dont les spécifications techniques sont fournies dans le tableau 2 ;
— d'un système poulies-courroie composé de deux poulies identiques : $r_m = r_r$;
— d'un système vis-écrou avec $pas = 4\ mm.tr^{-1}$.



(a) Codeur (b) Moteur (c) Réducteur

Figure 24 – Moteur, réducteur et codeur proposés à partir du catalogue Maxon

Tension	Vitesse à vide	Vitesse nominale	Couple nominal	Couple de démarrage	Puissance
12 V	4980 $tr.min{-}1$	4000 $tr.min{-}1$	29.5 $N.mm$	150 $N.mm$	10 W

Tableau 1 – Données techniques du moteur Maxon DCX 22 L

Réduction k	Etages	Couple permanent max.	Jeu angulaire	Rendement max.
15.6	2	700 $N.mm$	1 deg	81 %

Tableau 2 – Données techniques du réducteur planétaire Maxon GPX 22 à deux étages

ANNEXE **N**

Récapitulatif des notations

Notation	Valeur/Unité	Commentaires
L	$1\ m$	Longueur d'un bras (2^+) ou (2^-)
Γ_{max}	$1000\ m.s^{-2}$	Accélération maximale imposée au capteur
$\Omega(t)$	$rad.s^{-1}$	Vitesse angulaire du bras
y_c^+	mm	Position selon $\vec{y}_2$ du centre de gravité du chargement dans l'étuve (e^+)
z_c^+	mm	Position selon $\vec{z}_2$ du centre de gravité du chargement dans l'étuve (e^+)
y_c^-	mm	Position selon $\vec{y}_2$ du centre de gravité du chargement dans l'étuve (e^-)
z_c^-	mm	Position selon $\vec{z}_2$ du centre de gravité du chargement dans l'étuve (e^-)
m_b	kg	Masse du bras (2^+) ou du bras (2^-)
m_e	kg	Masse de l'étuve et plateau de chargement (e^+) ou (e^-)
m_c^+	kg	Masse du chargement dans l'étuve (e^+)
m_c^-	kg	Masse du chargement dans l'étuve (e^+)
M_{tot}	$1500\ kg$	Masse totale de la centrifugeuse (hors chargement) supportée par les pieds
R_p	$0.5\ m$	Rayon d'implantation des pieds de la centrifugeuse
Δm	$0.05\ kg$	Défaut dans la symétrie du chargement des étuves (e^+) et (e^-)
J_r	$kg.m^2$	Inertie du rotor moteur
J_b	$kg.m^2$	Inertie du double-bras ramenée sur l'axe moteur
J_{eq}	$kg.m^2$	Inertie équivalente de l'ensemble mobile ramenée sur l'axe moteur
ρ_a	$1.2\ kg.m^{-3}$	Masse volumique de l'air
S_e	m^2	Surface latérale d'une étuve (e^+) ou (e^-)
$C_{x,e}$		Coefficient de trainée lié à une étuve (e^+) ou (e^-)
H_b	m	Hauteur d'un bras
$C_{x,b}$		Coefficient de trainée lié à une tranche élémentaire du double-bras
C_{aero}	$N.m$	Couple résistant sur l'axe moteur associé aux effets aérodynamiques
C_m	$N.m$	Couple moteur permettant de mettre en rotation la centrifugeuse
N	N	Effort normal dans le bras
T_Y, T_Z	N	Effort tranchant selon $\vec{Y}$ et $\vec{Z}$ dans le bras
M_t	$N.mm$	Moment de torsion dans le bras
M_{fY}, M_{fZ}	$N.mm$	Moment fléchissant selon $\vec{Y}$ et $\vec{Z}$ dans le bras
ψ	rad	Rotation du plateau de charge en bout de bras selon $\vec{y}_2$
S	mm^2	Section du bras
E	$2.0 \times 10^{11}\ N.m^{-2}$	Module d'élasticité de l'acier constituant le bras (2^+) ou (2^-)
ρ	$8000\ kg.m^{-3}$	Masse volumique de l'acier constituant le bras (2^+) ou (2^-)
α^{th}	$10 \times 10^{-6}\ K^{-1}$	Coefficient de dilatation de l'acier constituant le bras (2^+) ou (2^-)
I_{GZ}	mm^4	Moment quadratique de la section du bras par rapport à $(G, \vec{Z})$
ω_{mot}	$rad.s^{-1}$	Vitesse angulaire du moteur animant le système d'équilibrage
h_m	$100\ mm$	Demi-course de la masse d'équilibrage
c_{mot}	$N.mm$	Couple du moteur animant le système d'équilibrage
m_m	$40\ kg$	Masse mobile du système d'équilibrage
r_m	mm	Rayon de la poulie motrice du système d'équilibrage
r_r	mm	Rayon de la poulie réceptrice du système d'équilibrage
pas	$4\ mm.tr^{-1}$	Pas de la liaison vis-écrou du système d'équilibrage
k	15.6	Rapport de réduction du réducteur associé au système d'équilibrage
η	0.75	Rendement de la transmission du système d'équilibrage
T	$20\ s$	Temps maximal pour que la masse mobile parcoure la course totale $2h_m$

Cahier réponse
Épreuve de Sciences Industrielles B

AVERTISSEMENT

Toutes les calculatrices sont interdites, quel qu'en soit le type, ainsi que les agendas électroniques, les règles à calculs, les téléphones portables…

INSTRUCTIONS

- Remplir sur chaque copie A3 en MAJUSCULES toutes vos informations d'identification : nom, prénom, numéro inscription, date de naissance, le libellé du concours, le libellé de l'épreuve et la session.
- **Une feuille, dont l'entête n'a pas été intégralement renseigné, ne sera pas prise en compte.**
- **Vérifiez que votre cahier réponse comporte le nombre de pages indiqué et qu'il est correctement imprimé.**
- Composer lisiblement sur les copies avec un stylo à encre foncé : bleue ou noire. Le crayon-mine et autres couleurs peuvent être utilisés uniquement dans les schémas.
- L'usage de stylo à friction, stylo plume, stylo feutre, liquide de correction et dérouleur de ruban correcteur est strictement interdit. Les surveillants et surveillantes se réservent le droit de les confisquer.
- **À la fin de l'épreuve, rendre toutes les pages dans l'ordre mêmes celles non renseignées. Toute réclamation ultérieure ne pourra pas être prise en compte.**
- Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance. La présence d'une information d'identification en dehors du cartouche donnera lieu à un point de pénalité et la page concernée pourra être soustraite de la correction.

Tournez la page S.V.P

Modèle CMEN-DR v2 ©EXATECH

Nom de famille :
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

Prénom(s) :

Numéro Inscription :

Né(e) le : / /

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen : ..... Section/Spécialité/Série : .....

Epreuve : ..... Matière : ..... Session : .....

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuille officielle, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Numéroter chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.

057

Question 1

$\vec{V}_{M^+,2/0} =$

Question 2

$\vec{\Gamma}_{M^+,2/0}.\vec{x}_2 =$

$\vec{\Gamma}_{M^+,2/0}.\vec{y}_2 =$

$\vec{\Gamma}_{M^+,2/0}.\vec{z}_2 =$

Question 3

$\Gamma_{M^+} =$

Question 4

$\Omega_{max} =$

A.N. : $\Omega_{max} =$ $rad.s^{-1}$ $\Omega_{max} =$ $tour.min^{-1}$

Ca

Tournez la page S.V.P.

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Question 5

$J_b =$ $J_e =$

$J_{eq} =$

Question 6 Valeur du coefficient ε_e : $\square\ \varepsilon_e = +1$ $\square\ \varepsilon_e = -1$

Justification :

Question 7

$\vec{V}_{K,2/0} =$

Question 8

$\vec{M}_{A,a\to e^+} =$

Question 9

$d\vec{M}_{A,a\to 2^+} =$

$\vec{M}_{A,a\to 2^+} =$

Question 10

$C_{aero} =$

Question 11

$A =$ $B =$

Propriété de l'équation différentielle : ☐ Linéaire ☐ Non linéaire

Question 12

$\alpha =$ $\beta =$

$\lim_{t\to+\infty} \Omega(t) =$

Tournez la page S.V.P.

Question 13 Critères :

Références moteurs adaptées :

Question 14

$x_G =$

$y_G =$

$z_G =$

Question 15

$$\left\{\mathcal{T}^{P_1}_{(0)\to(1)}\right\} = \left\{\quad\right\}_{P_1,\mathcal{B}} \qquad \left\{\mathcal{T}^{P_2}_{(0)\to(1)}\right\} = \left\{\quad\right\}_{P_2,\mathcal{B}} \qquad \left\{\mathcal{T}^{P_3}_{(0)\to(1)}\right\} = \left\{\quad\right\}_{P_3,\mathcal{B}}$$

Question 16 Isolement réalisé :

Théorème(s) utilisé(s) :

Modèle CMEN-DR v2 ©EXATECH

Nom de famille :
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

Prénom(s) :

Numéro Inscription :

Né(e) le : / /

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen : ..... Section/Spécialité/Série : .....

Epreuve : ..... Matière : ..... Session : .....

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuille officielle, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Numéroter chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.

Question 17

$\Delta F =$

A.N : $\Delta F =$

Question 18

$F^{max} =$

A.N : $F^{max} =$

Question 19 Référence(s) adaptée(s) :

Justification :

Question 20 Justification de la taille retenue pour les roulements A et B :

Tournez la page S.V.P.

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Question 21

Montage	Bagues serrées	Rapprocher bagues int.	Rapprocher bagues ext.	Eloigner bagues int.	Eloigner bagues ext.
O	Intérieures				
O	Extérieures				
X	Intérieures				
X	Extérieures				

Question 22 Choix du montage : ☐ Montage en O ☐ Montage en X

Justification :

Question 23

Relation entre p, δ_A^0 et δ_B^0 :

Relation entre F_A^0 et F_B^0 :

$F_A^0 =$ $F_B^0 =$

Question 24

Relation entre δ, δ_A^0 et δ_A : $\delta_A =$

Relation entre δ, δ_B^0 et δ_B : $\delta_B =$

Relation entre P_m, F_A et F_B : $P_m =$

$F_A =$ $F_B =$

Question 25 Précharge à installer :

$p =$

Question 26

$L_A =$ $L_B =$

Question 27

$L_A =$

$L_B =$

Question 28

$L_h =$

Commentaire :

Question 29 $\left\{\mathcal{T}^{A}_{(1)\to(2^+)}\right\} = \left\{\quad\right\}_{A,\mathcal{B}_2}$

Tournez la page S.V.P.

Question 30 Isolement réalisé :

Théorème utilisé :

Question 31

$X_A =$

Question 32

$N(x) =$

Question 33 Relation entre $N(x)$ et $u'(x)$:

Question 34 Condition en $x = 0$: $u(0) =$

$A_0 =$ $A_1 =$

$A_3 =$

Question 35

$\Delta L =$

Modèle CMEN-DR v2 ©EXATECH

Nom de famille :
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

Prénom(s) :

Numéro Inscription :

Né(e) le : / /

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen : ..... Section/Spécialité/Série : .....

Epreuve : ..... Matière : ..... Session : .....

CONSIGNES

- *Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuille officielle, la zone d'identification en MAJUSCULES.*
- *Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.*
- *Numéroter chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.*
- *Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.*
- *N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.*

Question 36

$e_\Gamma =$

Question 37

$e_\Gamma^0 =$ A.N : $e_\Gamma^0 =$

Commentaire :

Question 38

$e_\Gamma^{th} =$

A.N : $e_\Gamma^{th} =$

Question 39 Respect de l'exigence 1.1.1 :

Justification :

Cc

Tournez la page S.V.P.

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Question 40 Proposition :

Question 41

$\widetilde{\Gamma} =$ $\widetilde{\Gamma} \approx$

Question 42

$\left|\frac{\widetilde{\Gamma} - \Gamma}{\Gamma}\right| =$ $\overline{\psi} =$

Question 43

$X =$ $L_{H^+} =$

$Y =$ $M_{H^+} =$

$Z =$ $N_{H^+} =$

Question 44 Composantes du torseur des efforts de cohésion sur le bras (problème (P_1)) :

$N(x) =$ $T_Y(x) =$ $T_Z(x) =$

$M_t(x) =$ $M_{fY}(x) =$ $M_{fZ}(x) =$

Sollicitations présentes :

☐ Traction/Compression ☐ Flexion
☐ Cisaillement ☐ Torsion

Question 45 Relation entre $\psi_1(x)$ et $M_{fZ}(x)$:

Question 46 Condition(s) aux limites pertinentes à prendre en compte :

☐ $\psi_1(0) = 0$ ☐ $\psi_1(L) = 0$
☐ $\psi_1'(0) = 0$ ☐ $\psi_1'(L) = 0$

$\psi_1(L) =$

Question 47 Composantes du torseur des efforts de cohésion sur le bras (problème (P_2)) :

$N(x) =$ $T_Y(x) =$ $T_Z(x) =$

$M_t(x) =$ $M_{fY}(x) =$ $M_{fZ}(x) =$

Sollicitations présentes :

☐ Traction/Compression ☐ Flexion
☐ Cisaillement ☐ Torsion

Tournez la page S.V.P.

Question 48

$\psi_2(x) =$

$\psi_2(L) =$

Question 49

$\psi =$

$F =$ $C =$

Question 50 Expression des termes A et B

$A =$

$B =$

Question 51

$z_m =$

A.N. : $z_m =$

Commentaire :

Modèle CMEN-DR v2 ©EXATECH

Nom de famille :
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

Prénom(s) :

Numéro Inscription :

Né(e) le : / /

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen : ..... Section/Spécialité/Série : .....

Epreuve : ..... Matière : ..... Session : .....

CONSIGNES

- *Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuille officielle, la zone d'identification en MAJUSCULES.*
- *Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.*
- *Numéroter chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.*
- *Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.*
- *N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.*

Question 52

$V =$

$\omega_{mot} =$

Question 53

$c_{mot} =$

$\mathcal{P}_{mot} =$

A.N : $\mathcal{P}_{mot} =$

Question 54

$X_\omega =$

$X_c =$

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Question 55 Justification :

Question 56

$\Delta z_{cod} =$ $\Delta z_{red} =$

Préconisation :

Cet espace peut être utilisé en cas d'extrême nécessité pour remplacer entièrement une question qui aurait été raturée dans l'espace prévu.

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de PT chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Ingénierie système : besoin, exigences et diagrammes SysML
- Cinématique du solide : paramétrage, vitesse, taux de rotation et torseur cinématique
- Géométrie des masses : centre d'inertie, matrice d'inertie, théorème de Huygens
- Cinétique : torseurs cinétique et dynamique, énergie cinétique, inertie équivalente
- Dynamique des systèmes de solides : principe fondamental, stratégie d'isolement, équilibrage
- Équations différentielles linéaires du premier ordre
- Transmetteurs de puissance et trains d'engrenages

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière : **écrire sur WhatsApp**

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/banque-pt/pt