

- Répondre directement (et uniquement) sur la feuille, ne pas dégrafer.
- Vous pouvez compléter vos réponses sur une feuille libre si nécessaire.

Classe :
 Nom :
 Prénom :

Exercice 1 - Robot Roméo
adapté E3A MP 2014

Corrigé page 19

A. Présentation générale

Roméo est un projet labellisé par le pôle de compétitivité Cap Digital et financé par la Région Île-de-France, la Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services (DGCIS) et la Ville de Paris.

Il vise à développer un robot humanoïde destiné à devenir un véritable assistant des personnes en perte d'autonomie. Pour cela, il doit être capable d'intervenir sur les objets du quotidien (ouvrir et fermer une porte, manipuler un verre, une bouteille, un trousseau de clés?). Mais il devra également aider une personne à se déplacer à domicile, et même, lui porter secours en cas de chute.

Au-delà de ses capacités physiques, Roméo doit offrir une interface homme-machine accessible au plus grand nombre : la voix et les gestes doivent être les principaux moyens de communication avec le robot qui devra être capable de comprendre ce qu'on lui dit, d'entretenir un court dialogue et même de percevoir les intentions et les émotions de son interlocuteur pour en déduire les actions qu'il doit mettre en œuvre. Un premier prototype de ce robot humanoïde a été développé en mars 2011. La seconde version devrait être opérationnelle courant 2014. A l'issue du projet, Roméo sera évalué auprès de patients de l'Institut de la vision.

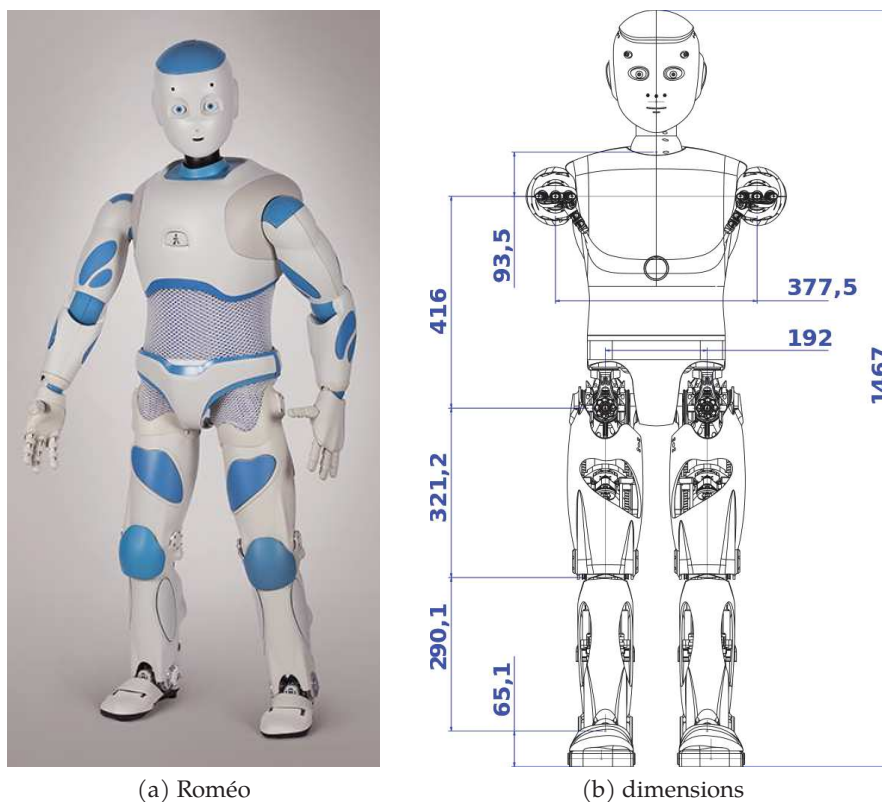


FIGURE 1 – Robot Roméo

A.1. Roméo, un robot d'assistance à la personne.

Le challenge est de faire de Roméo, un assistant pour une personne âgée, malvoyante et/ou en perte d'autonomie. Le robot peut aider tout au long de la journée dans les tâches quotidiennes lorsque la personne est seule. Il peut aller chercher des objets qui se trouvent dans une autre pièce et ranger ceux qui ne sont pas à leur place, et rendre ainsi l'environnement d'une personne mal voyante, par exemple, moins accidentogènes. Roméo peut également être un assistant de mobilité en aidant la personne à marcher ou à se relever de son fauteuil.

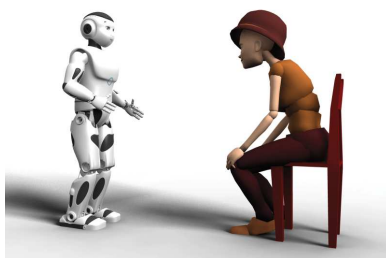
Pour être accessible au plus grand nombre, Roméo offre une interface homme-machine très intuitive : il se commande à la voix. Il est capable de dialoguer avec son interlocuteur pour demander des précisions sur ce qu'on attend de lui. Il est également capable d'interpréter les gestes qu'on lui fait pour illustrer certains ordres.

A.2. Description structurelle

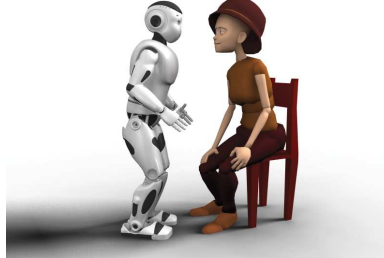
Le prototype en cours de finalisation (figure 1), mesure 1,43m. Cette petite taille lui permet de limiter son poids à environ 40kg (batteries incluses) et donc d'être moins dangereux pour ses propres articulations et pour les personnes qui l'entourent. Ses proportions sont similaires à un individu de corpulence moyenne. Concernant sa motricité, il est doté de : 4 actionneurs au niveau du cou 6 actionneurs dans chaque jambe 7 actionneurs dans chaque bras 1 articulation élastique passive sur chaque pied Au total, Roméo est composé de 32 moteurs à courant continu, répartis dans 4 catégories de puissances différentes (11W, 20W, 60W, 150W).

Ses yeux sont aussi motorisés afin de modifier leurs orientations et ainsi augmenter leur champ visuel. Un projet de colonne vertébrale est à l'étude pour améliorer la flexibilité posturale de Roméo.

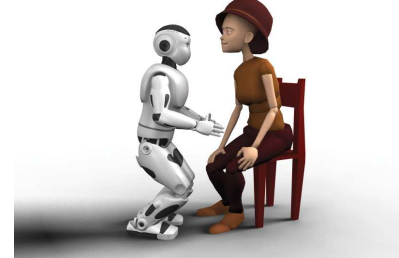
A.3. Scénario proposé



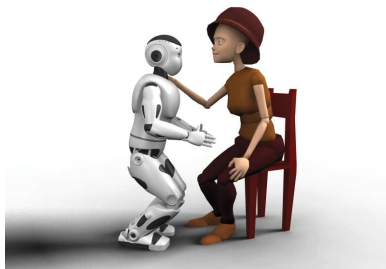
(a) Appel vocal ou électronique du robot



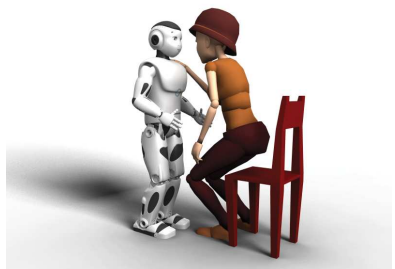
(b) Roméo se rapproche et se positionne correctement pour aider la personne



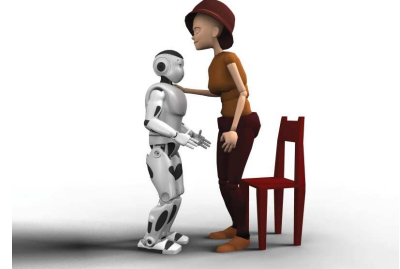
(c) Roméo adapte la hauteur de son épaule grâce à une genuflexion



(d) La personne pose une main sur l'épaule de Roméo pour s'aider de cet appui



(e) Roméo contrôle ses articulations pour assurer son équilibre



(f) tout en soutenant l'effort de la personne

FIGURE 2 – Scénario de la phase d'assistance

Nous allons étudier le robot dans une phase d'assistance spécifique (figure 2) qui consistera à aider une personne à se lever de sa chaise. Le protocole est décrit sur la figure 2.

A.4. Description fonctionnelle

Les diagrammes SysML décrivent le système : diagramme des cas d'utilisation (figure 3), diagramme de contexte (figure 4), diagramme d'exigences partiel (figure 5).

B. Étude du cahier des charges fonctionnel

La personne qui désire se lever est initialement en position assise. Elle positionne sa main droite ou sa main gauche sur l'épaule du robot (0,9 à 1,1 m de haut) puis exerce un effort vertical sur celle-ci afin d'aider ses membres inférieurs.

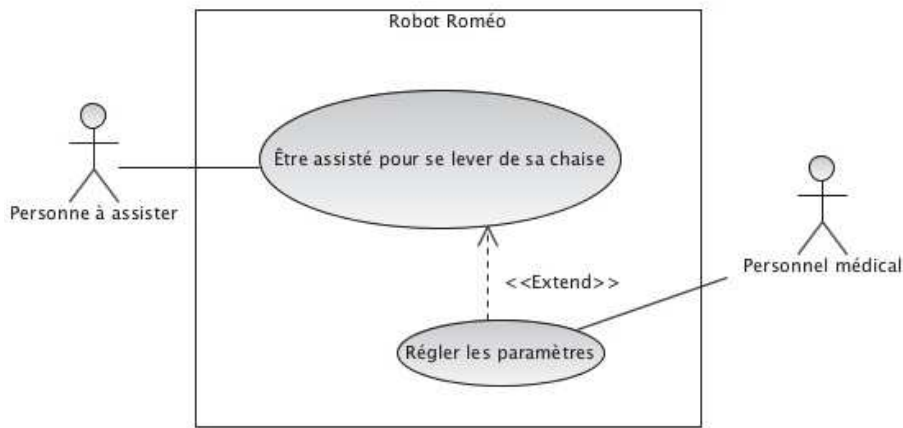


FIGURE 3 – Diagramme des cas d'utilisation

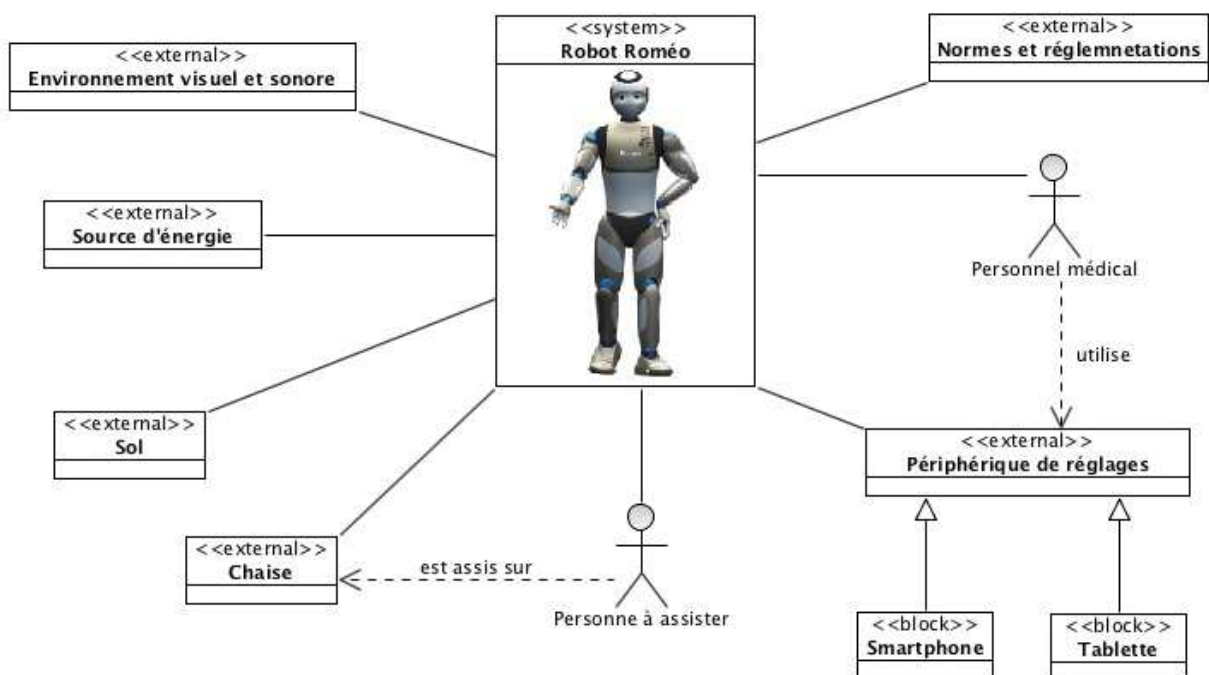


FIGURE 4 – Diagramme de contexte

Afin d'établir la valeur de l'effort que devra supporter le robot pour assister la personne qui se relève, une série d'expériences est réalisée avec des personnes âgées. Un capteur de force monoaxial enregistre au cours du temps l'effort vertical qu'exerce la personne sur un support fixe représentant l'épaule du robot. (Voir exemple d'enregistrement d'essai figure 6. Enregistrement réalisé à partir d'une expérience de simulation de relèvement d'une personne, de la position assise à la position debout, avec un appui avec la main sur un support fixe.)

Q1. Afin de choisir le capteur de force nécessaire à cette campagne de mesures, donner un ordre de grandeur de l'étendue de mesures nécessaire, ainsi qu'un ordre d'idée de la précision requise.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

L'étude qui suit porte sur la détermination des couples des moteurs installés dans les articulations des jambes du Robot.

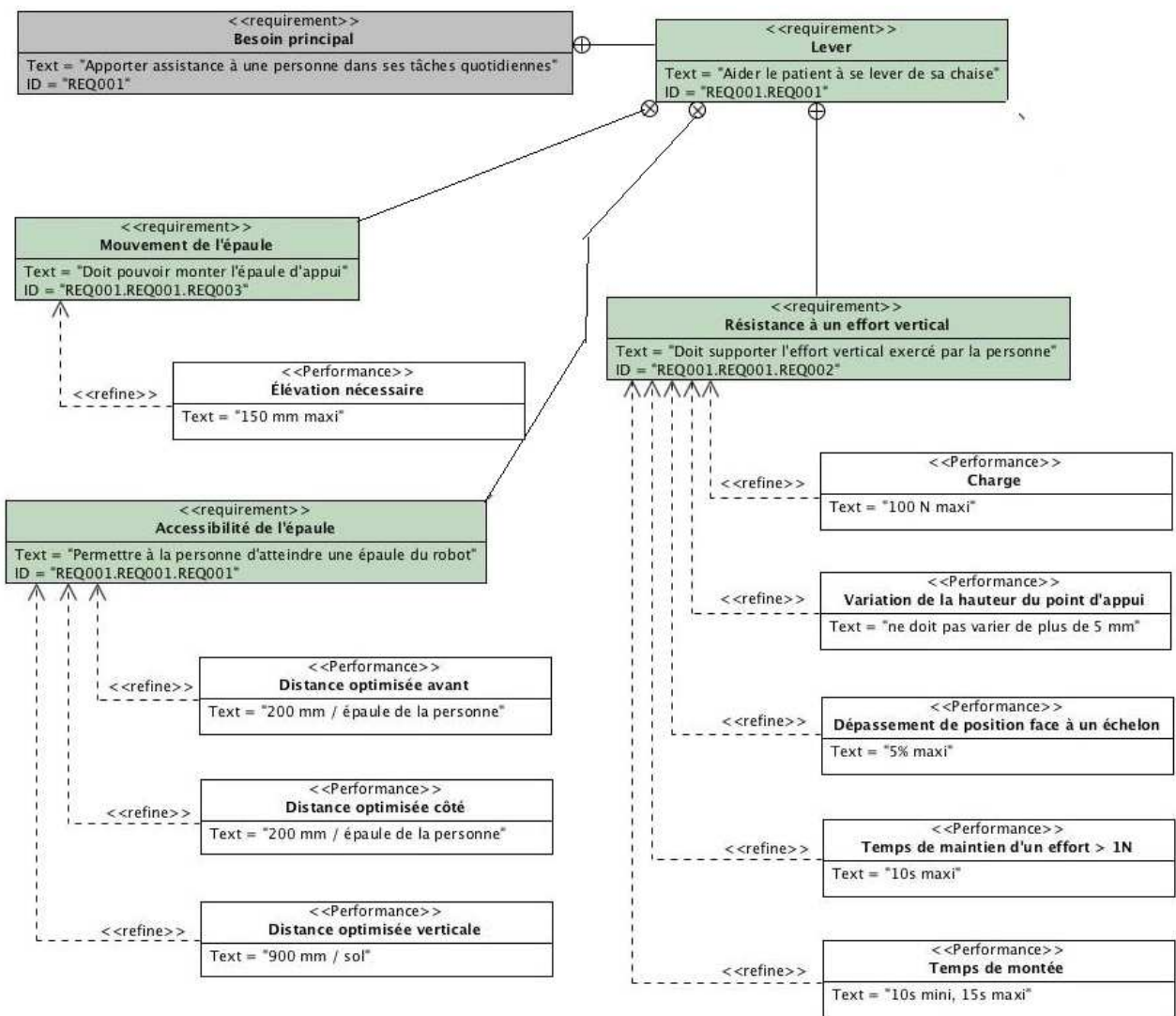


FIGURE 5 – Diagramme d'exigences limité au lever

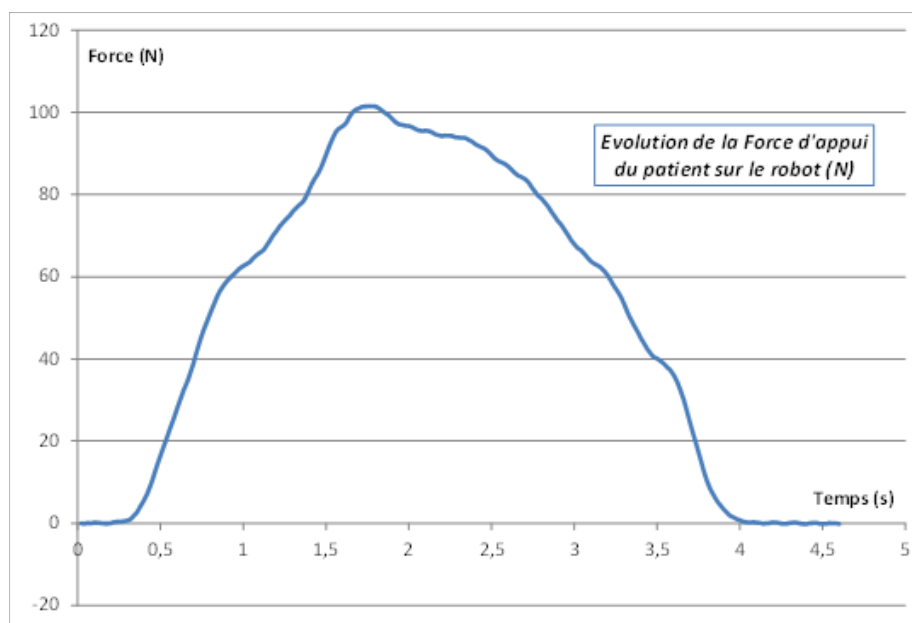


FIGURE 6 – Force verticale qu'exerce une personne sur un support fixe, pour se relever.

Un paramètre important est aussi la durée des couples d'application exercés par les moteurs : de ces temps de maintien dépendra l'échauffement des moteurs, et donc la fiabilité du robot.

Q2. À partir d'un enregistrement de l'effort de relèvement en fonction du temps (simulé lors d'une expérience), donné figure 6, déterminer graphiquement le temps de maintien d'un effort supérieur à 10 N associée à cette courbe.

.....

C. Analyse structurelle du robot - validation du modèle

L'objet de cette étude est l'analyse structurelle du Robot ROMEO et la validation du modèle proposé. Le modèle sera ensuite utilisé pour évaluer les performances attendues du Robot, relativement au cahier des charges.

Un modèle très simplifié de la partie inférieure de ROMEO (pieds, jambes, bassin) est proposé sur la figure 7 ci-contre :

Cette chaîne de solides est composée : du bassin du robot : (1) de deux cuisses (2D) et (2G) de deux tibias (3D) et (3G) de deux pieds (4D) et (4G) Les deux pieds sont en appui sur le sol (0).

- Les deux cuisses sont en liaison pivot (C_D, \vec{y}_1) et (C_G, \vec{y}_1) avec le bassin : Hanche
- Les deux cuisses sont en en liaison pivot (B_D, \vec{y}_1) et (B_G, \vec{y}_1) avec les deux tibias : Genoux.
- Les deux tibias sont en en liaison rotule (A_D) et (A_G) avec les deux pieds : Chevilles.
- Les deux pieds sont en en liaison appui plan (O_D, \vec{z}_0) et (O_G, \vec{z}_0) avec le sol : Plante des pieds.

Tous les degrés de mobilité de chaque liaison sont pilotés par des moteurs.

Remarque : dans la suite de l'étude $\vec{y}_1 = \vec{y}_0$.

On suppose une position (quelconque) du bassin du robot à atteindre.

Dans la démarche de vérification, cette position devient une contrainte de positionnement du bassin, en position et en orientation. Définir cette position revient à bloquer le bassin par rapport au sol. Le modèle suivant (figures 8a, 8a et 8a) introduit une liaison encastrement entre le bassin et le sol et permet ainsi la prise en compte de cette contrainte de position du bassin dans le modèle.

Q3. Pour la boucle gauche du graphe des liaisons (figure 8c), donner les torseurs cinématiques.

.....

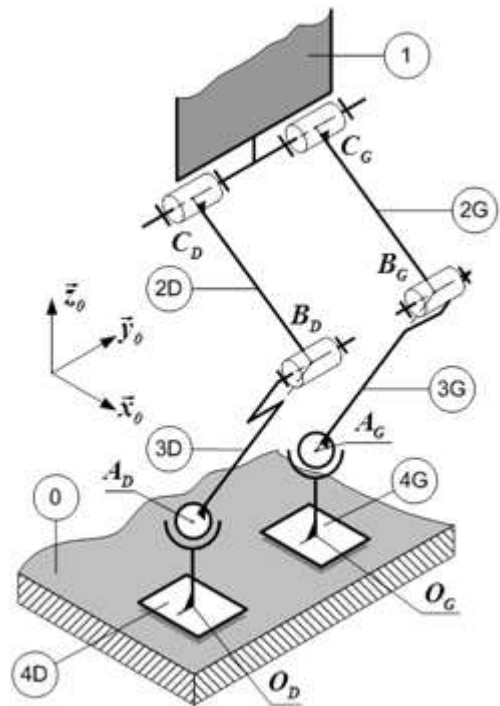
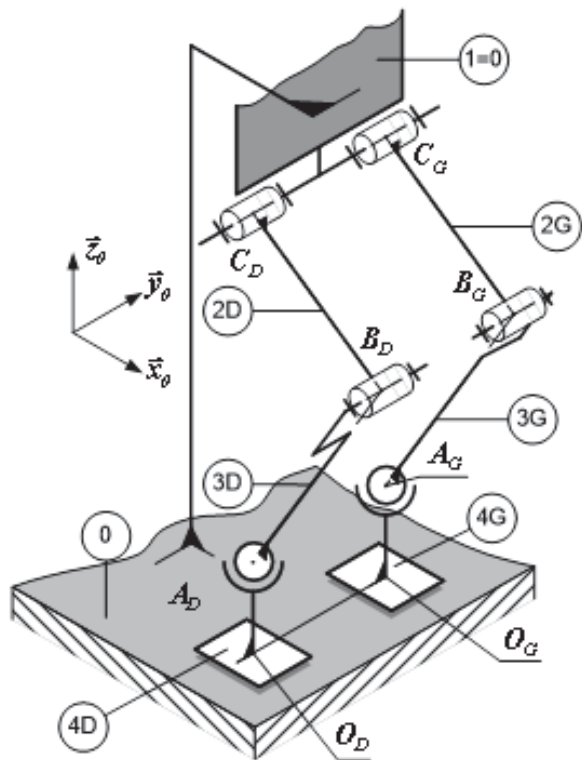
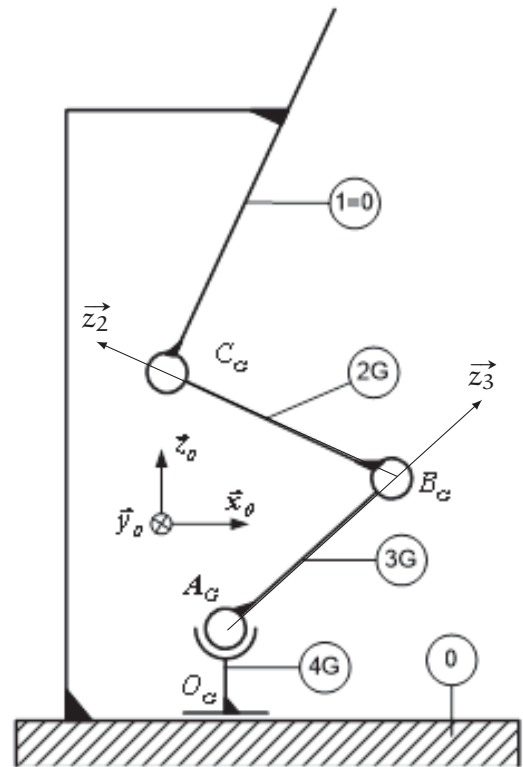


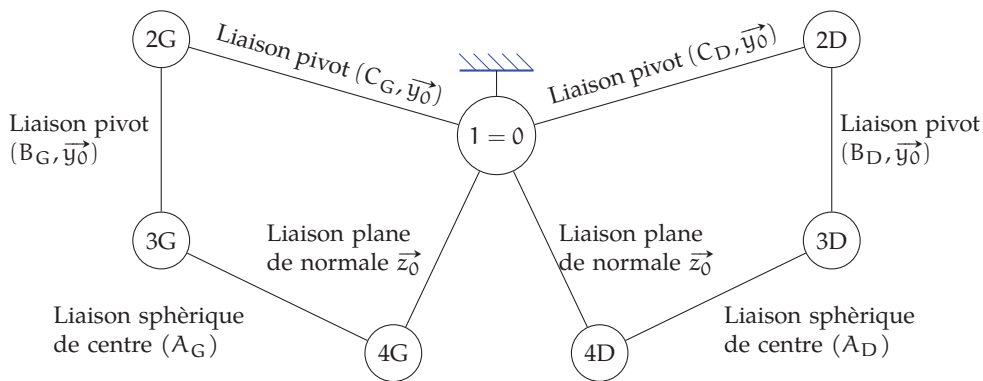
FIGURE 7 – Modèle simplifié



(a) Modèle simplifié, position du bassin fixée (Vue isométrique)



(b) Modèle simplifié, position du bassin fixée (Vue jambe gauche en projection dans le plan sagittal (\vec{z}_0, \vec{x}_0))



(c) Graphe des liaisons

FIGURE 8 – Modèle simplifié - bassin fixé

.....
Q4. Combien d'équations et d'inconnues cinématiques comporte l'étude de cette boucle (ne pas écrire les équations)? Est-il possible de tout déterminer?

.....

Q5. Mettre en évidence sur la figure 8b à l'aide de flèches, les deux mouvements possibles de la chaîne fermée de solides (01-2G-3G-4G-01). (Dans cette question, on ne prendra en compte qu'une seule des deux chaînes fermées : voir figure 8c).

.....

.....

Notation : Pour la suite de l'étude, le torseur modélisant les actions transmissibles du solide j sur le solide i par la liaison de centre A, exprimé dans le base $B_k = (\vec{x}_k, \vec{y}_k, \vec{z}_k)$ s'écrit :

$$\{\mathcal{T}_{j \rightarrow i}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{j \rightarrow i} = X_{ji} \cdot \vec{x}_k + Y_{ji} \cdot \vec{y}_k + Z_{ji} \cdot \vec{z}_k \\ \vec{M}_{A, j \rightarrow i} = L_{ji} \cdot \vec{x}_k + M_{ji} \cdot \vec{y}_k + N_{ji} \cdot \vec{z}_k \end{array} \right\}_A = \left\{ \begin{array}{ll} X_{ji} & L_{ji} \\ Y_{ji} & M_{ji} \\ Z_{ji} & N_{ji} \end{array} \right\}_{B_k}^A$$

Q6. Pour la boucle gauche du graphe des liaisons (figure 8c), donner les torseurs des actions transmissibles par les liaisons.

.....

Q7. Préciser le nombre d'inconnues de liaisons de ce modèle simplifié et le nombre d'équations que l'on peut écrire. Peut-on résoudre complètement ce mécanisme ?

.....

Cela conduit à dire que ce modèle de structure est cohérent. Le pilotage de chaque mobilité dans chacune des liaisons conduit au positionnement du bassin.

Cette chaîne de solides, bien qu'isostatique, reste néanmoins insuffisante pour approcher toutes les postures d'un humain. On remarque aisément qu'à une position définie du bassin, correspond chez l'homme, une infinité de positions possibles des deux jambes, dans des amplitudes très variables d'un sujet à l'autre. On mesure ainsi toute la complexité de la commande en position des diverses actionneurs qui régissent la position, la vitesse, l'accélération des mouvements d'un robot humanoïde.

En fait, ROMEO est, pour sa partie inférieure (Pieds, jambes, bassin), équipé de 12 axes de commandes (12 pivots motorisés).

D. Validation du critère de non-basculément

Il est important de vérifier que le robot pourra réaliser le scénario proposé en s'assurant qu'il ne basculera pas suite à l'appui de la personne sur l'épaule.

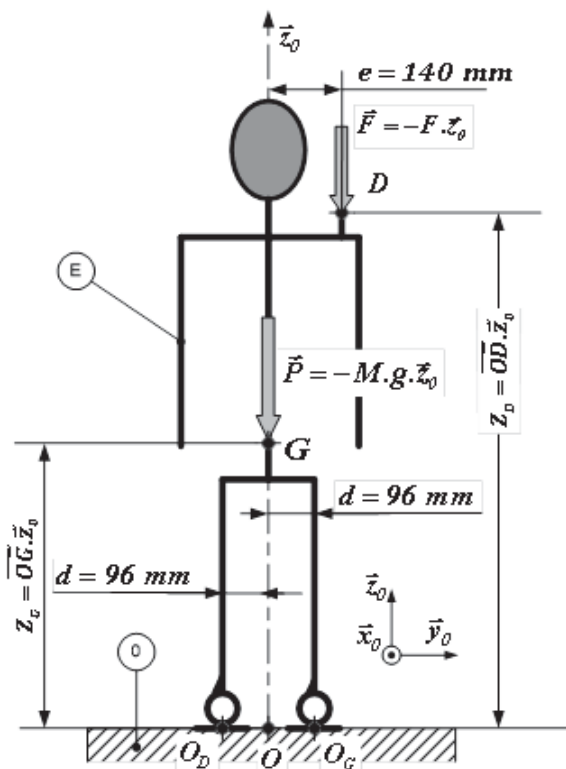


FIGURE 9 – Robot en genuflexion. Modèle plan (projection dans le plan frontal)

Q11. Énoncer le P.F.S.

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Q12. Déterminer les expressions des composantes des deux torseurs des actions mécaniques du sol (0) sur chacun des pieds en fonction F , M , g , d et e , lorsqu'ils sont exprimés respectivement aux points O_G et O_D .

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Pour vérifier le respect du critère de non-basculement du robot, il faut que les contacts en O_G et O_D respectent toujours la contrainte d'unilatéralité : le sol ne peut exercer qu'un effort de réaction vertical ascendant sous chacun des pieds.

Q13. Écrire les deux inégalités qui découlent du respect de ce critère.

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

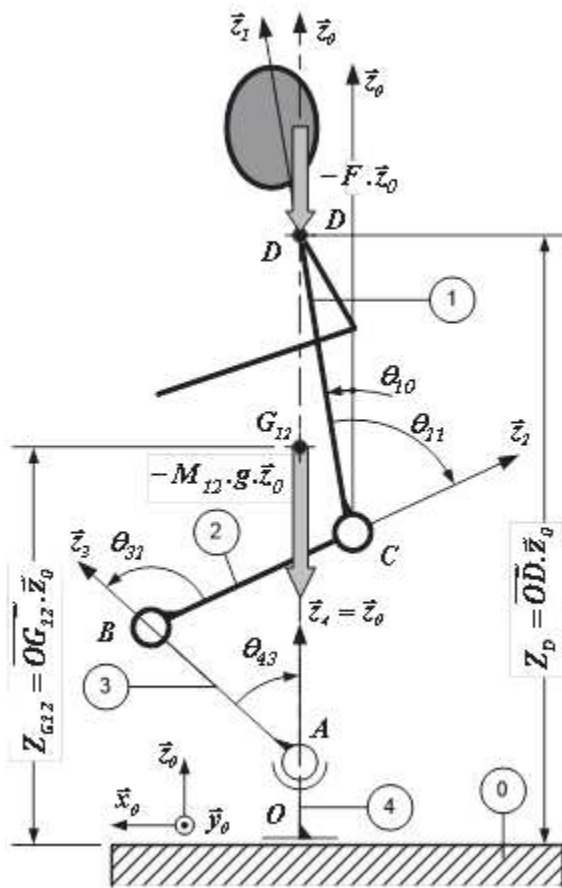
Données : masse du Robot Roméo : $M = 40,5 \text{ kg}$, accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $d = 96 \text{ mm}$, $e = 140 \text{ mm}$.

Q14. Quel est l'effort maximum qui peut être exercé sur le robot au point D, tout en assurant la condition de non-basculement. Conclure quant au respect du cahier des charges ?

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

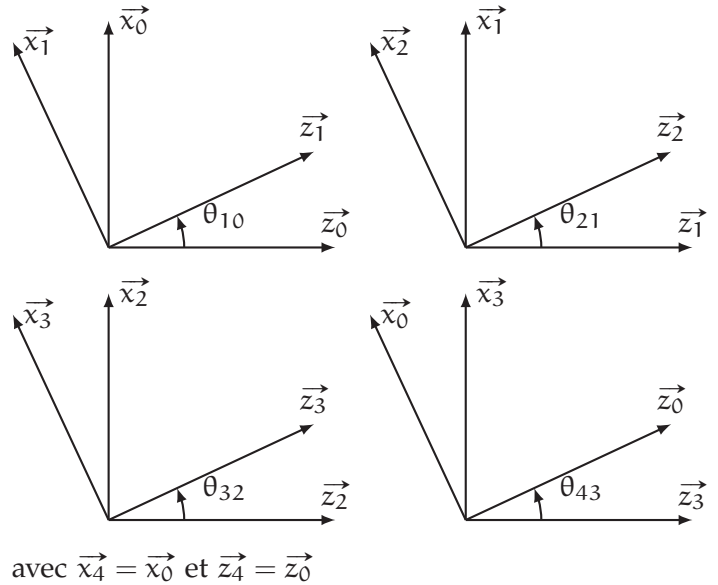
E. Aide au patient

On considère la modélisation simplifiée de la figure 10.



Données géométriques :

- $\overrightarrow{OA} = l_4 \cdot \vec{z}_0$; $\overrightarrow{AB} = l_3 \cdot \vec{z}_3$; $\overrightarrow{BC} = l_2 \cdot \vec{z}_2$;
 $\overrightarrow{CD} = l_1 \cdot \vec{z}_1$;
- $l_1 = 485 \text{ mm}$; $l_2 = 320 \text{ mm}$; $l_3 = 290 \text{ mm}$;
 $l_4 = 67 \text{ mm}$;
- $\overrightarrow{OD} = Z_D \cdot \vec{z}_0$ avec $Z_D = 900 \text{ mm}$



(a) Modèle cinématique plan dans le plan sagittal (\vec{x}_0, \vec{z}_0) (b) Orientations relatives des différents repères et paramétrages angulaires

FIGURE 10 – Modélisation du robot

Paramétrage

On note G_{12} le centre de masse du sous ensemble $E_{12} = \{1, 2\}$ et sa masse $M_{12} = 32 \text{ kg}$.

On suppose que le robot est en position limite d'équilibre : Seule la jambe gauche est sollicitée et le pied droit du robot est à la limite du décollement.

L'action mécanique exercée par le patient, sur le robot est modélisable par un glisseur au point D de résultante : $\vec{F} = -F \cdot \vec{z}_0$.

- Solide (1) : tronc + bras + tête ;
- Solide (2) : Cuisses ;
- Solide (3) : Tibias ;
- Solide (4) : Pieds.

Sur la figure 10a, les solides (1) et (2) en gras, les autres solides voisins en traits fins..

- $B_0 = (\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ lié au sol (0) ;
- $B_1 = (\vec{x}_1, \vec{y}_0, \vec{z}_1)$: lié au solide (1) avec $\theta_{10} = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{z}_0, \vec{z}_1)$;
- $B_2 = (\vec{x}_2, \vec{y}_0, \vec{z}_2)$: lié au solide (2) avec $\theta_{21} = (\vec{x}_1, \vec{x}_2) = (\vec{z}_1, \vec{z}_2)$;
- $B_3 = (\vec{x}_3, \vec{y}_0, \vec{z}_3)$: lié au solide (3) avec $\theta_{32} = (\vec{x}_2, \vec{x}_3) = (\vec{z}_2, \vec{z}_3)$;
- $B_4 = B_0$: lié au solide (4) avec $\theta_{43} = (\vec{x}_3, \vec{x}_4) = (\vec{z}_3, \vec{z}_4) = (\vec{x}_3, \vec{x}_0) = (\vec{z}_3, \vec{z}_0)$;

E.1. Étude géométrique et cinématique

Le patient posant sa main en D pour être aidé à se lever, le déplacement du point D doit toujours se faire selon la verticale : $\overrightarrow{OD} = Z_D \cdot \vec{z}_0$.

Q15. Déterminer \overrightarrow{OD}

.....
.....
.....
.....

On pose $\theta_{20} = \theta_{21} + \theta_{10}$.

Q16. Écrire les deux projections dans le plan sagittal de \overrightarrow{OD} en fonction de $\theta_{43}, \theta_{20}, \theta_{10}$ et des dimensions.

.....
.....
.....
.....

On suppose pour la suite on considère que $\theta_{10} = 10^\circ$ (constant).

On étudie de petites variations des angles θ_{ij} autour de la position du schéma (figure 10). On pose $\theta_{ij} = \theta_{ij_0} + \delta_{ij}$ et $Z_D = Z_{D0} + \delta_Z$.

Q17. Reprendre les deux équations de la précédente et les simplifier en considérant que les δ_{ij} sont petits.

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Q18. Dédurre des résultats précédents le système linéaire donnant δ_Z en fonction de δ_{ij} (ne pas le résoudre). Conclure.

Il suffit de soustraire les équations deux à deux :

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

E.2. Validation statique du critère de maintien en position de genuflexion

L'articulation du genou est particulièrement sollicitée lorsque le robot a les genoux fléchis. La personne qui s'appuie sur l'épaule augmente le couple nécessaire au niveau des genoux pour maintenir une posture stable du robot.

Il est nécessaire d'estimer ce couple dans la position la plus défavorable et de vérifier si le robot et ses moteurs pourront supporter une telle charge.

On pourrait montrer que c'est l'articulation du genou qui est la plus sollicitée.

Pour établir une estimation de ce couple, on isole le sous ensemble $E_{12} = \{1, 2\}$, pour mener une étude statique : voir modèle plan proposé, figure 10.

Paramétrage et données complémentaires

L'application numérique donne pour C_{32} une valeur proche de $80 \text{ N} \cdot \text{m}$, que l'on adoptera pour la suite de l'étude : $C_{32} = 85 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Ce couple C_{32} est créé par le motoréducteur implanté dans l'articulation du genou.

— moteurs de référence Maxon RE40 148877 (Voir documentation technique figure 11)

— rapport de réduction du réducteur : $r_{32} = \left| \frac{\dot{\theta}_{\text{moteur}}}{\dot{\theta}_{32}} \right| = 95,91$. On admettra que $\frac{C_{32}}{C_{\text{moteur}}} = r_{32}$

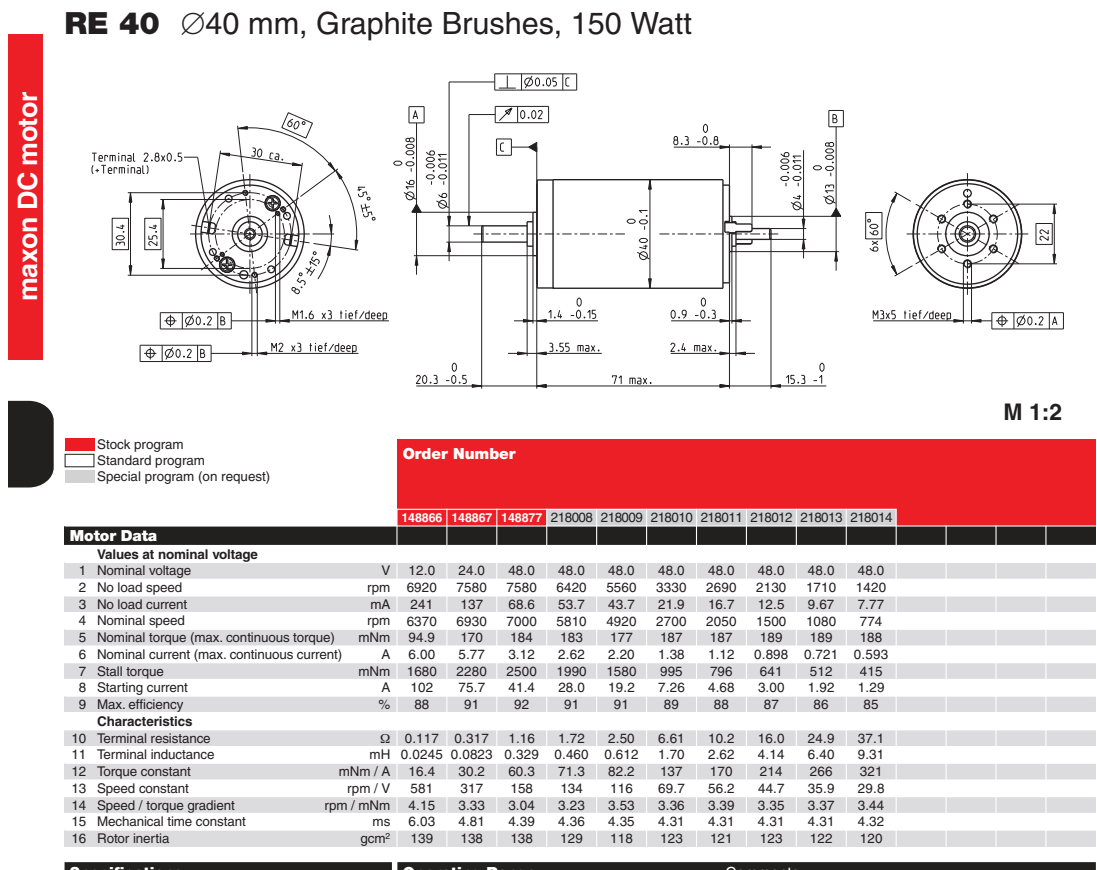


FIGURE 11 – Moteur Maxon RE40

Q21. Application numérique : En prenant en compte le rapport de réduction du motoréducteur, calculer le couple délivré par le moteur et comparer le au couple de calage (stall torque en anglais dans la documentation), indiqué dans la documentation. Conclure quant à la capacité du robot à rester en position de genuflexion, face au patient qui est en appui sur son épaule.

.....

.....

.....

.....

.....

Que le moteur soit capable de supporter le couple est une chose, encore faut-il que la commande du moteur soit suffisamment robuste face aux sollicitations extérieures et notamment à l'appui du patient sur l'épaule de Roméo.

F. Validation dynamique du critère de maintien en position de genuflexion

On veut étudier la rigidité du robot face au couple résistant dû à l'appui du patient sur son épaule : Lorsque le patient sollicite le robot pour se relever, le robot ne doit pas s'affaisser.

Dans le cahier des charges, cela se traduit par :

Maintien de la position sous charge (Variation de hauteur du point d'appui)	<5 mm	Flexibilité : 2
Dépassement de position face à un échelon de sollicitation :	<5%	Flexibilité : 2

On supposera que la variation de hauteur du point d'appui est sensiblement la variation de hauteur d'un point de la hanche (point C sur la figure 10a)

F.1. Description de la commande du moteur

Pour que le robot puisse prendre une posture conforme à celle demandée par le cahier des charges, il faut un positionnement suffisamment précis des diverses articulations, et en particulier, celle du genou. Cette position doit pouvoir être maintenue sous l'action de charges extérieures, comme l'appui du patient sur l'épaule de Roméo dans le cas du scénario proposé à l'étude. Il faut donc que la commande du moteur du genou soit suffisamment précise et robuste, ce qui impose un asservissement de position angulaire.

Lors de la phase de relevée du patient, le mouvement ascensionnel découle des mouvements articulaires Hanche, Genou et Cheville. Les mouvements doivent donc être synchronisés en position mais aussi en vitesse pour limiter les erreurs de traînage, ce qui impose un asservissement en vitesse.

Enfin, l'équilibre dynamique demande à ce que, les accélérations des diverses articulations, les efforts et les intensités électriques dans les moteurs soient bien maîtrisées ce qui impose un asservissement en intensité.

La figure 12, montre le schéma bloc représentant un modèle simplifié de la commande de mouvement du genou.

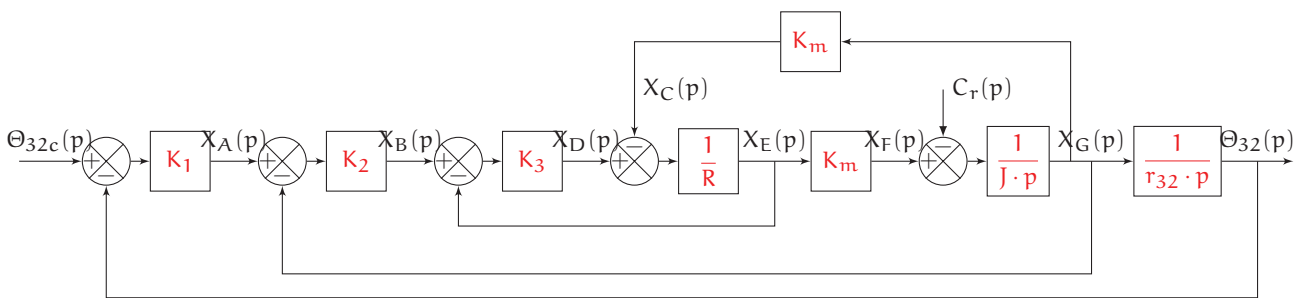


FIGURE 12 – Modèle de commande du genou

- Entrée : consigne de variation de position angulaire du genou : θ_{32c} (variation par rapport à une position de référence θ_{32_0})
- Sortie : variation de position angulaire du genou : θ_{32} , relativement à θ_{32_0}
- Perturbation : Couple résistant C_r (en $N \cdot m$, dû aux actions de la pesanteur, aux actions du patient sur le robot, ...)
- Inertie équivalente, supposée constante, ramenée à l'arbre moteur : J
- Résistance de l'induit du moteur : R
- Constante de couple du moteur : K_m
- Rapport de réduction de la chaîne cinématique : $r_{32} = \frac{\dot{\theta}_{\text{moteur}}}{\dot{\theta}_{32}} = 95,91$

Comme tous les axes commandés du robot, le moteur du genou est contrôlé en position, en vitesse et en intensité par trois capteurs : position, vitesse et courant, associés à trois correcteurs proportionnels dont les gains sont notés respectivement K_1 , K_2 et K_3 .

On considère les différentes variables du système.

- $\Omega_m(p)$: la transformée de Laplace de la vitesse de rotation du moteur $\omega_m(t)$.
- $E(p)$: la transformée de la force contre électromotrice $e(t)$.

Q28. À partir de la question précédente, déterminer α_θ .

.....
.....
.....
.....
.....

Q29. Montrer que le dénominateur peut s'écrire $D(p) = (1 + T_1 \cdot p) \cdot (1 + T_2 \cdot p)$, Déterminer T_1 et T_2 (on pose $T_1 > T_2$). Proposer alors un modèle simplifié.

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Q30. Tracer et justifier l'allure de la fonction de la réponse temporelle pour une entrée en échelon $\Theta_0 = 10^\circ$. Justifier que le temps de réponse à 5% est $T_{5\%} \approx 3$ s pour une entrée en échelon.

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Q31. Déterminer $H_2(p)$ en fonction de K_1 , a , b , c , d et r_{32} .

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

F.3. Influence de l'action du patient

On suppose que le robot est en genuflexion, face au patient (position angulaire de référence du genou : θ_{32_0}), prêt à recevoir l'action du patient.

On considère la forme approchée de $T_{32}(p)$:

$$\Theta_{32}(p) = \frac{1}{1 + 0,960 \cdot p + 2,25 \times 10^{-6} \cdot p^2} \cdot \Theta_{32c}(p) + \frac{-1,7 \times 10^{-3}}{1 + 0,960 \cdot p + 2,25 \times 10^{-6} \cdot p^2} \cdot C_r(p)$$

Le couple résistant sur l'arbre moteur est alors dû à l'action du patient sur l'épaule du Robot est noté $C_{rp}(p)$ et dans le domaine temporel $c_{rp}(t)$.

On ne cherche à déterminer que l'effet de l'action du patient sur l'épaule du Robot. On pose donc $c_r(t) = c_{rp}(t)$

On modélise cette action par un échelon de couple $c_r(t) = c_{rp}(t) = C_{r0} \cdot \mathcal{H}(t)$ où la fonction $\mathcal{H}(t)$ est la fonction Heaviside.

Q32. Déterminer la valeur finale de $\theta_{32}(t)$ en fonction de θ_{32_0} , C_{r0} et les différents coefficients de $H_1(p)$ et $H_2(p)$

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Application numérique :

- la personne pose sa main et exerce un effort de 100 N ce qui induit un couple C_{rp} estimé à $C_{rp} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ (valeur surestimée, proche de celle déterminée lors de la vérification du couple de calage).
- Cette sollicitation induit alors une rotation de l'articulation du genou : $\delta\theta_{32}$. C'est la variation angulaire de l'articulation du genou due seulement à l'appui du patient sur le robot.

Q33. Calculer la variation angulaire au niveau du genou $\delta\theta_{32}$ induite par cette perturbation. On donnera le résultat en degré.

.....
.....
.....
.....
.....

La variation angulaire en infime. On suppose que la position initiale avant appui du patient est celle décrite par la figure 10 et par les données géométrique suivantes :

- $l_2 = 320 \text{ mm}$
- $\theta_{21} = -73^\circ$; $\theta_{10} = 10^\circ$: soit une inclinaison de la cuisse par rapport à la verticale de 63° , $\theta_{43} = -44^\circ$, $\theta_{32} = +110^\circ$;

Le cahier des charges précise que le maintien de la position sous charge (Variation de hauteur du point d'appui qui est sensiblement la variation de hauteur de la hanche) doit être inférieur à 5 mm.

Q34. Est-ce que l'influence de cette perturbation est compatible avec les exigences du cahier des charges ? Quelles sont les éventuelles solutions pour limiter l'influence de cette perturbation ?

.....
.....
.....
.....
.....