

Assistance pour le maniement de charges dans l'industrie

I Présentation du système

I.A – Contexte

L'exosquelette est un appareil qui apporte à un être humain des capacités qu'il ne possède pas ou qu'il a perdues à cause d'un accident. Ce type d'appareil peut permettre à une personne de soulever des charges lourdes et diminuer considérablement les efforts à fournir sans la moindre fatigue (figure 1). Après avoir revêtu un exosquelette adapté à sa morphologie et à sa taille, l'utilisateur peut faire ses mouvements en bénéficiant d'une grande fluidité.



Figure 1 Maniement de charges

I.B – Mise en situation

L'exosquelette (figure 2) est constitué :

- d'un support de charge transportée **4** ;
- de deux moteurs de l'articulation de la hanche ;
- de deux cuisses **2** et **2'** ;
- de deux moteurs de genou ;
- de deux jambes **1** et **1'** ;
- de deux articulations de cheville, non motorisées ;
- de deux pieds **3** et **3'**.

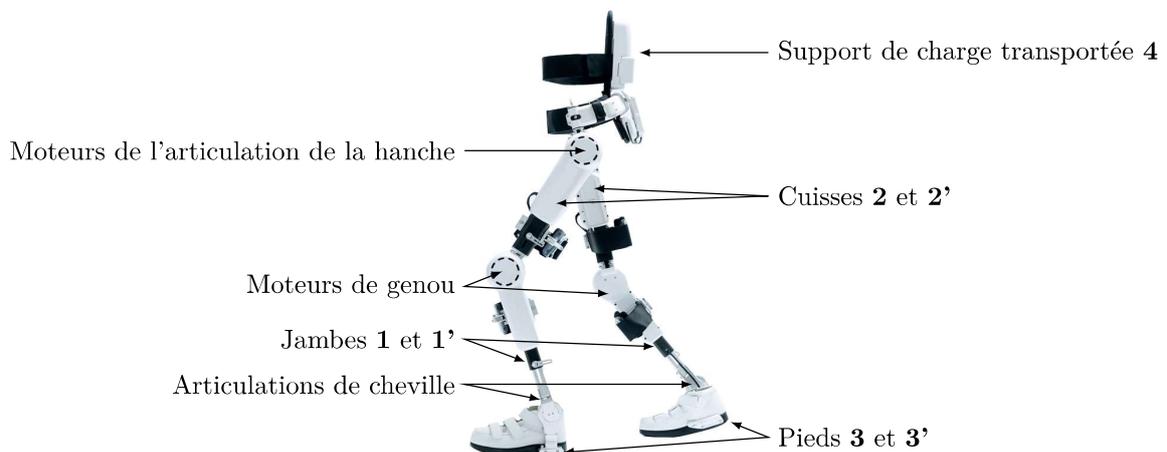


Figure 2 Constituants de l'exosquelette

Les actionneurs équipant chaque axe (genoux et hanches) de l'exosquelette sont des moteurs synchrones de type « brushless » couplés à des réducteurs de vitesse de type « Harmonic Drive ». Chaque moteur est alimenté par une carte de positionnement incluant un onduleur triphasé, la source d'énergie étant un pack de batteries de tension nominale égale à 36 V. La carte de positionnement exploite les signaux des capteurs à effet Hall intégrés dans le moteur ainsi que ceux d'un codeur incrémental monté sur l'axe moteur, elle comprend trois asservissements :

- un asservissement de courant qui correspond à un asservissement de couple ;
- un asservissement de vitesse avec un correcteur proportionnel et intégral ;
- un asservissement de position offrant des fonctions d'anticipation de vitesse.

Les moteurs au niveau de l'articulation de la hanche permettent de modifier l'inclinaison de la charge afin d'éviter un basculement autour de son axe de tangage. Une centrale inertielle est utilisée à cet effet. Un modèle multiphysique de l'exosquelette est représenté figure 3.

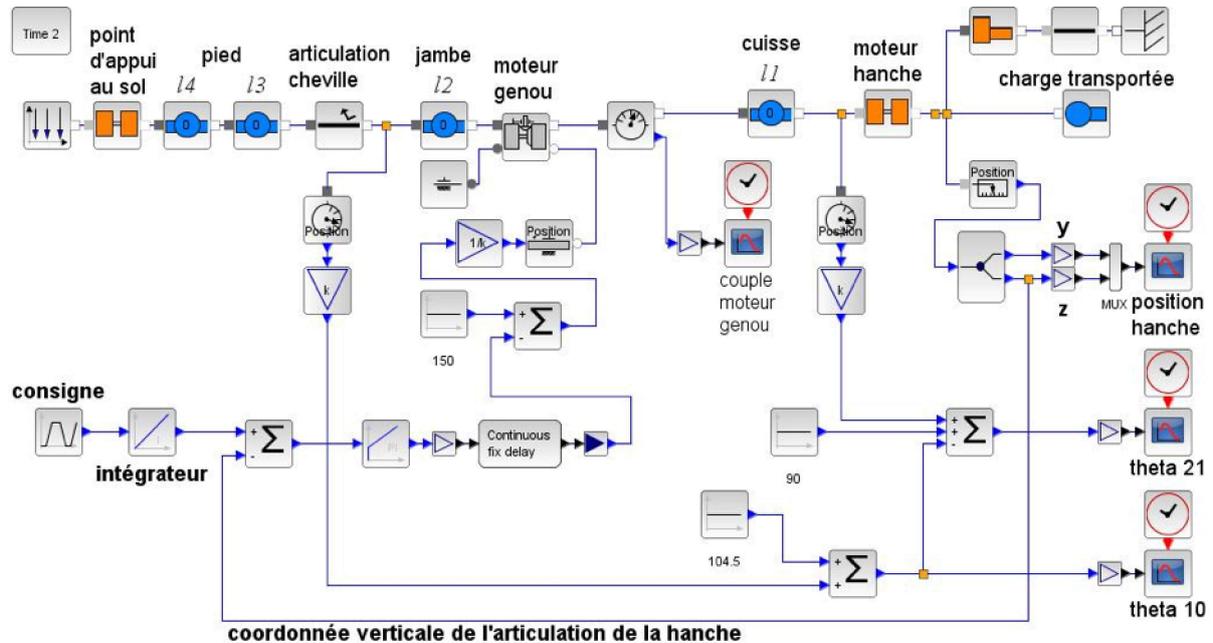


Figure 3 Modèle multiphysique de l'exosquelette

Ce sujet se concentre essentiellement sur le dimensionnement et le pilotage des moteurs des genoux.

I.C – Étude proposée

La fluidité de marche et la gestion en temps réel des mouvements (marcher à plat ou sur des pentes jusqu'à 10°, monter des marches, se mettre en position accroupie ou assise) sont des éléments fondamentaux qui conditionnent la conception et la réalisation d'un exosquelette. Les solutions technologiques retenues répondent à cet objectif. Elles ne sont pas toutes abordées dans ce sujet. Quelques-unes de celles retenues pour l'exosquelette sont étudiées pour valider les solutions choisies par les concepteurs vis-à-vis des performances attendues listées par le cahier des charges.

Dans cette optique, il est proposé les quatre études suivantes :

- modélisation et validation des constituants associés à l'exigence fonctionnelle « assurer le mouvement vertical » ;
- validation de l'architecture de la chaîne fonctionnelle réalisant l'exigence fonctionnelle « gérer le mouvement vertical » ;
- conception de la chaîne d'information réalisant l'exigence fonctionnelle « acquérir l'intention de la mise en mouvement » ;
- évolution du produit.

II Exigence fonctionnelle « assurer le mouvement vertical »

— Objectif —

Proposer un modèle de connaissance des éléments réalisant l'exigence fonctionnelle « assurer le mouvement vertical » puis valider les performances attendues listées par le cahier des charges (figure 4).

Exigences	Critères d'appréciation	Niveau
Assurer le mouvement vertical	Durée du mouvement de la hanche	$t = 2$ s
	Masse de la charge à soulever par les deux jambes	$m_4 = 60$ kg

Figure 4 Extrait du cahier des charges associé à l'exigence « Assurer le mouvement vertical »

II.A – Élaboration du modèle géométrique direct et du modèle articulaire inverse

— Objectif —

Élaborer la commande du moteur pilotant le genou à partir d'un mouvement défini dans l'espace opérationnel puis converti dans l'espace articulaire.

L'étude se limite au passage de la position accroupie à la position relevée de l'exosquelette. Lors de ce passage, le point O_2 est en mouvement de translation verticale suivant la direction (O_0, \vec{z}_0) et sa vitesse de déplacement évolue selon une loi trapézoïdale. Un modèle plan de la chaîne cinématique ouverte représente la partie inférieure de l'exosquelette en position debout et fléchie (figure 5).

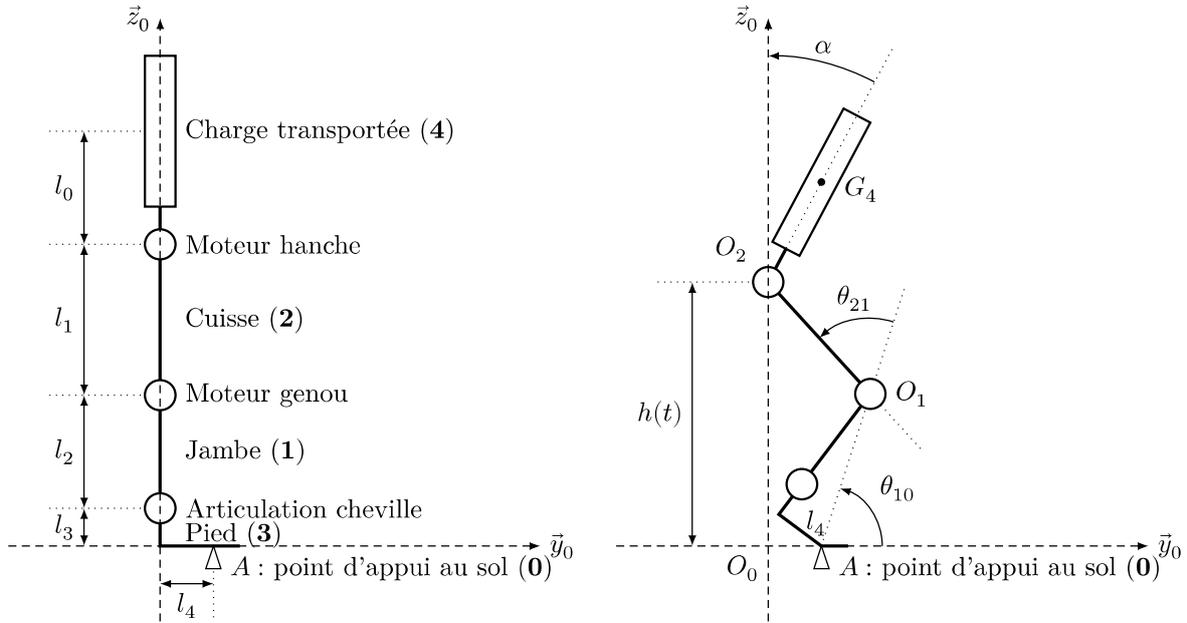


Figure 5 Modèle d'étude plan position debout et fléchi

Un modèle d'étude simplifié plan ainsi que l'orientation des repères et le paramétrage angulaire sont proposés figure 6.

Hypothèses

- Le référentiel lié au repère $R_0(A, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ est galiléen et est fixe par rapport à la terre.
- Le point O_2 représentant la hanche se déplace verticalement selon la direction (O_0, \vec{z}_0) .
- L'angle α entre la charge transportée et la verticale \vec{z}_0 reste constant.
- Le point d'appui A du pied sur le sol est considéré fixe par rapport à la terre.
- Lors du mouvement étudié la jambe (1) reste perpendiculaire au pied (3).

Données

- $\theta_{10} = (\vec{y}_0, \vec{y}_1) = (\vec{z}_0, \vec{z}_1)$
- $\theta_{21} = (\vec{y}_1, \vec{y}_2) = (\vec{z}_1, \vec{z}_2)$
- $\alpha = \text{constante}$
- $L = \sqrt{(l_2 + l_3)^2 + l_4^2}$

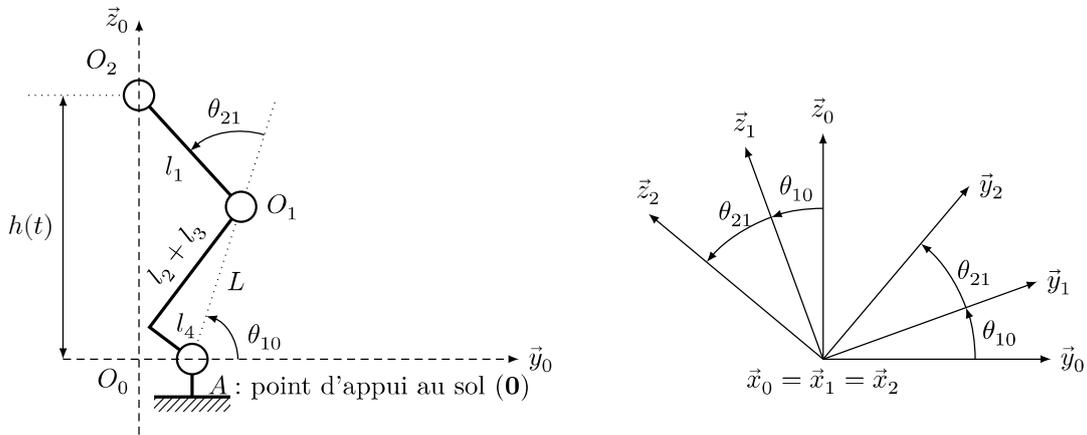


Figure 6 Modèle simplifié plan et paramétrage angulaire

Q 1. Déterminer littéralement les coordonnées opérationnelles l_4 et $h(t)$ en fonction des coordonnées articulaires θ_{10} , θ_{21} et des paramètres dimensionnels L et l_1 .

Q 2. Déterminer le modèle articulaire inverse θ_{21} et θ_{10} en fonction de l_1 , l_4 , L et $h(t)$.

Indications

- Dans un premier temps, il est conseillé de déterminer l’expression de θ_{21} à partir des deux relations trouvées à la question 1, provenant du modèle géométrique direct, élevées au carré. (On rappelle que $\cos(a - b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b$.)
- Dans un deuxième temps, pour déterminer l’expression de θ_{10} , utiliser le modèle géométrique direct exprimé préalablement sous la forme

$$\begin{cases} l_1 \cos(\theta_{10} + \theta_{21}) = -L \cos \theta_{10} - l_4 \\ l_1 \sin(\theta_{10} + \theta_{21}) = h(t) - L \sin \theta_{10} \end{cases}$$

- En éliminant $\sin(\theta_{10} + \theta_{21})$ et $\cos(\theta_{10} + \theta_{21})$, obtenir une équation de la forme $A \cos \theta_{10} + B \sin \theta_{10} = C$.
- En normant A et B l’équation devient

$$\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cos \theta_{10} + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \sin \theta_{10} = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

- En posant $\cos \varphi = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}$ et $\sin \varphi = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}$, l’équation devient $\cos \varphi \cos \theta_{10} + \sin \varphi \sin \theta_{10} = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}}$ et se ramène à l’écriture

$$\cos(\theta_{10} - \varphi) = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

- Déterminer l’expression de θ_{10} en fonction de l_1 , l_4 , L et $h(t)$.

II.B – Élaboration du modèle cinématique

Objectif

En vue de dimensionner le moteur du genou, déterminer la vitesse articulaire en fonction de la vitesse opérationnelle.

Q 3. Déterminer à partir du modèle articulaire inverse la vitesse angulaire $\dot{\theta}_{21}$ en fonction de $h(t)$, $\dot{h}(t)$, l_1 , L et $\sin \theta_{21}$.

Le modèle multiphysique a permis de déterminer les conditions suivantes correspondant à la vitesse maximale : $t = 1,5$ s, $h(t = 1,5) = 0,829$ m, $\dot{h}(t = 1,5) = 0,422$ m·s⁻¹ et $\theta_{21} = 55,9^\circ$. Les longueurs l_1 et L valent respectivement 43,1 cm et 51,8 cm. Le réducteur de vitesse utilisé a un rapport de réduction égal à $r = 1/120$.

Q 4. Déterminer la valeur maximale de la vitesse angulaire $\dot{\theta}_{21}$ en rad·s⁻¹ puis celle de la fréquence de rotation d’un moteur de genou en tr·min⁻¹.

II.C – Élaboration du modèle dynamique

Objectif

Dimensionner le moteur situé au niveau d'un genou permettant à l'exosquelette de soulever une masse de 60 kg de la position accroupie à la position debout.

Ces calculs visent à déterminer l'équation dynamique qui permet d'obtenir le couple moteur (minimal) en fonction des caractéristiques géométriques et massique de la charge à soulever ainsi que des conditions d'utilisation. Le modèle d'étude est celui représenté à la figure 5 correspondant au modèle d'étude plan position fléchie.

Hypothèses

- L'étude est modélisable dans le plan.
- Toutes les liaisons sont supposées parfaites.
- Les inerties des pièces sont négligées sauf la masse de la charge à soulever.
- L'angle α entre la charge transportée et la verticale \vec{z}_0 reste constant.
- G_4 , centre de gravité de la charge transportée (4), reste en permanence à la verticale du point A d'appui au sol.

Données

- $\overrightarrow{O_1G_4} = \lambda(t)\vec{z}_0 - L \cos \theta_{10}\vec{y}_0$
- Accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.
- Longueur de la cuisse $l_1 = 43,1 \text{ cm}$.
- Longueur de la jambe $l_2 = 43,3 \text{ cm}$.
- Longueur de l'articulation de la cheville à la plante arrière du pied $l_3 = 6,9 \text{ cm}$.
- Longueur de la plante arrière du pied au point d'appui sur le sol $l_4 = 13 \text{ cm}$.
- Longueur $L = 51,8 \text{ cm}$.
- Rapport de réduction $r = 1/120$.

Q 5. Déterminer $\vec{\sigma}_{E/0}^{O_1} \cdot \vec{x}_0$, la projection sur l'axe \vec{x}_0 du moment cinétique en O_1 de l'ensemble $E = \{\text{cuisse (2)} + \text{charge transportée (4)}\}$ dans son mouvement par rapport à R_0 en fonction de m_4 , $\dot{h}(t)$, L et $\cos \theta_{10}$.

Q 6. Déduire $\vec{\delta}_{E/0}^{O_1} \cdot \vec{x}_0$, la projection sur l'axe \vec{x}_0 du moment dynamique en O_1 de l'ensemble E dans son mouvement par rapport à R_0 en fonction de m_4 , $\ddot{h}(t)$, L et $\cos \theta_{10}$.

La loi d'évolution de la vitesse de la hanche est donnée figure 7.

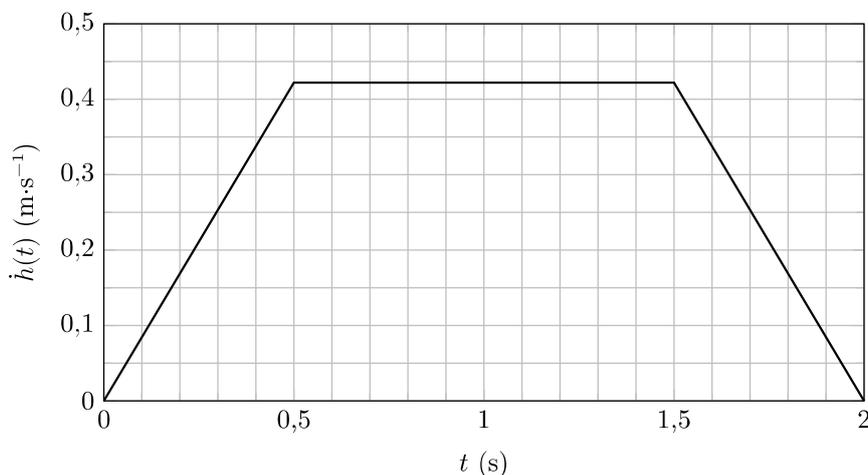


Figure 7 Loi d'évolution de la vitesse de la hanche

Q 7. Déterminer l'expression littérale du couple C_r exercé par l'arbre de sortie du réducteur sur le genou imposé par la loi d'évolution de la hanche et calculer numériquement ce couple pour une valeur de θ_{10} égale à $54,5^\circ$ correspondant à la valeur maximale du couple.

Q 8. Calculer le couple C_m au niveau de l'arbre moteur du genou en prenant un facteur de perte $\eta = 0,75$ (estimé à l'aide du modèle multiphysique).