

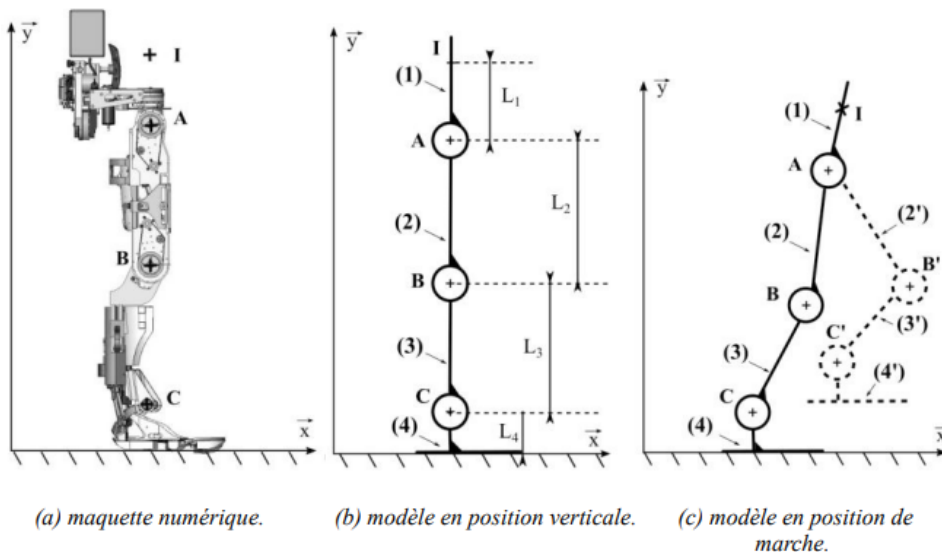
## Partie 1: présentation du sujet

L'utilisation d'un exosquelette motorisé a pour objectif de permettre à des personnes à mobilité réduite de se déplacer, en revanche beaucoup d'exosquelette existants ne permettent pas de stabiliser correctement les utilisateurs sans l'usage de béquilles. Ainsi les utilisateurs récupèrent l'usage de leurs jambes, mais perdent en partie celui de leurs mains. Celui que nous allons étudier ne nécessite pas l'usage des mains.

L'exosquelette est conçu pour être utilisé quotidiennement pendant plusieurs heures d'affilée par une personne paraplégique qui ne ressent, par définition, pas la douleur au niveau des membres inférieurs. Ainsi, en cours de fonctionnement, les jambes de l'utilisateur pourraient être endommagées sans que ce dernier ne s'en rende compte à temps, si les articulations de l'exosquelette se trouvent décalées par rapport aux articulations de l'utilisateur.

Pour réaliser cette étude, nous prendrons un modèle cinématique simplifié de l'exosquelette.

## Partie 2: confort usagers



La compatibilité de l'exosquelette avec l'utilisateur se vérifie par le fait que les articulations du premier doivent à chaque instant être coaxiales aux articulations du second. Cela implique une mise en position initiale de l'exosquelette par rapport à l'utilisateur.

On suppose dans cette partie que l'exosquelette s'adapte à toute personne mesurant entre 1,50m et 1,90 m, il s'adapte à tous types d'utilisateurs grâce aux

réglages se faisant via des liaisons glissières intégrées au fémur et au tibia de chaque jambe de l'exosquelette.

Dans cette partie, on doit s'assurer que l'utilisateur puisse régler les dimensions de l'exosquelette en fournissant une force inférieure à 150 N.

On donne l'action mécanique extérieure exercée sur la partie inférieure du fémur pour effectuer le réglage:

$$\{T_{ext \rightarrow 1}\} = {}_B\{F\bar{x}; \bar{0}\}$$

Par bilan des actions mécaniques extérieures on obtient:

$$\{T_{1 \rightarrow 2}\}_B = -\{T_{poids \rightarrow 2}\}_B = {}_B\{m_{32} \cdot g\bar{y}; \bar{0}\}_b$$

On va pouvoir considérer le contact entre la pièce (1) et la pièce (2) comme ponctuel à cause du jeu qu'il y a au niveau de la liaison notés P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>.

Pour déterminer la force F, on se place à la limite du glissement et on applique le bilan des actions mécaniques extérieures, puis le théorème des résultantes statiques et le théorème des moments statiques.

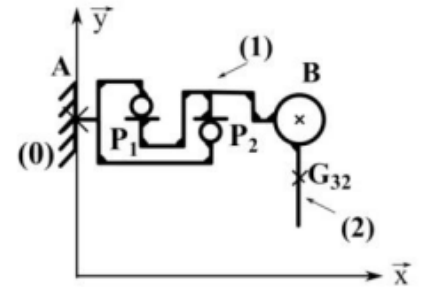
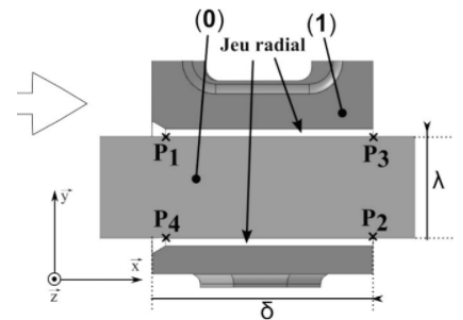


Figure 10 : nouveau modèle cinématique de l'exosquelette lors du réglage de la longueur du fémur.



On isole le solide 1, bilan des actions mécaniques extérieures : ( ou on isole 2+1)

$$\{\tau_{2 \rightarrow 1}\} = {}_B\begin{pmatrix} 0 & - \\ -m_{32}g & 0 \end{pmatrix}_b \{\tau_{ext \rightarrow 1}\} = {}_B\begin{pmatrix} F & - \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_b \{\tau_{pes \rightarrow 1}\} = {}_B\begin{pmatrix} 0 & - \\ -m_{21}g & 0 \end{pmatrix}_b$$

$$\{\tau_{0P1 \rightarrow 1}\} = \begin{pmatrix} X_{01}^{P1} & - \\ Y_{01}^{P1} & - \\ - & 0 \end{pmatrix}_{P1} \{\tau_{0P2 \rightarrow 1}\} = \begin{pmatrix} X_{01}^{P2} & - \\ Y_{01}^{P2} & - \\ - & 0 \end{pmatrix}_{P2}$$

On applique le TRS projeté sur  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  :

$$F + X_{021}^{P1} + X_{021}^{P2} = 0 \quad (I)$$

$$(-m_{32} - m_{21})g + Y_{021}^{P1} + Y_{021}^{P2} = 0 \quad (II)$$

On applique le TMS projeté sur  $\bar{z}$  en B :

$$-(\mu + \delta)Y_{021}^{P1} - \mu Y_{021}^{P2} = 0 \quad (III)$$

Ce qui nous donne après résolution des 3 équations ainsi obtenue:

$$F = \frac{2\mu + \delta}{\delta} \cdot (m_{32} + m_{21}) \cdot g \cdot f.$$

Avec:  $\overline{BP_2} = -\mu\bar{x}$  ( $\mu=150$  mm);  $\overline{P_1P_2} = \delta\bar{x}$ ;  $f$  le coefficient de frottement entre le bâti et le fémur ( $f=0,33$ );  $m_{32}$  et  $m_{21}$  les masses respectives des pièces 2 et 1 ( $m_{21}=6,4$  kg  $m_{32}=4,2$  kg).

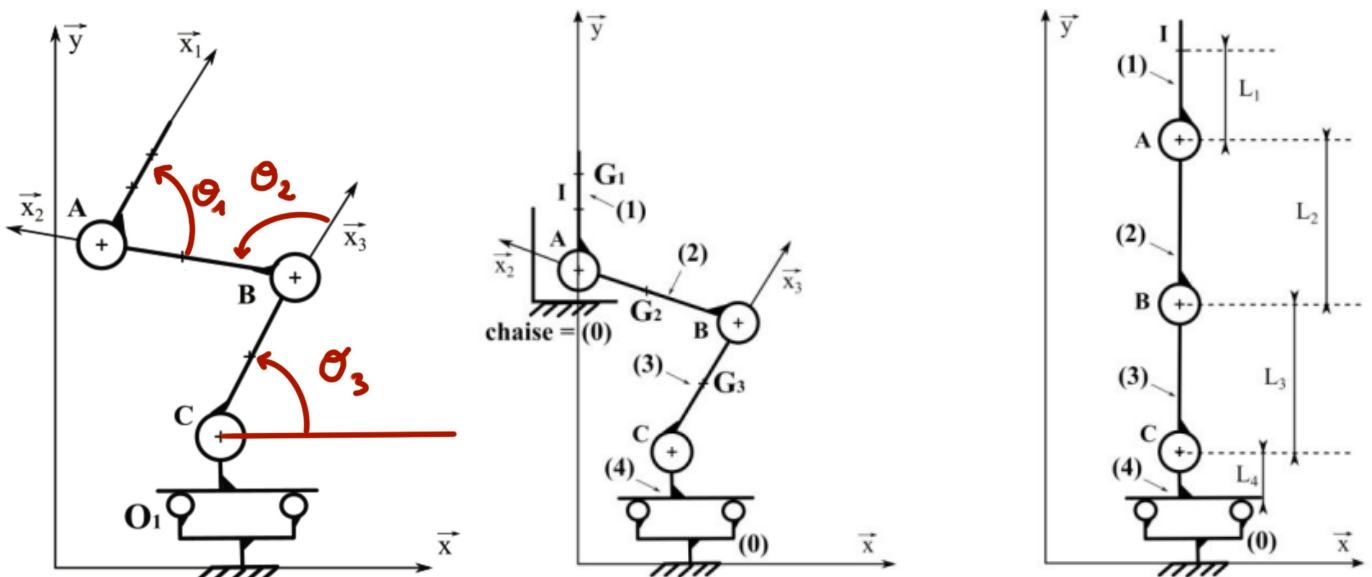
On peut finalement déterminer l'expression de  $\delta$ , la longueur du contact cylindre-cylindre qui permet de respecter le cahier des charges (soit  $F=150$ N):

$$\delta_{\min} = \frac{2\mu}{F - (m_{32} + m_{21}) \cdot g \cdot f} (m_{32} + m_{21}) \cdot g \cdot f = 89 \text{ mm}$$

Nous avons déterminé la longueur  $\delta$  nécessaire pour de respecter le cahier des charges, afin qu'un utilisateur entre 1,50m et 1,90m puisse avoir un exosquelette réglé à sa taille.

### Parties 3. passage de la position assise à la position debout:

Ce passage peut se représenter par le modèle suivant:



Liaisons	Définition	Figures changement de bases
Sol (0) / Pied (4)	Sphère plan de normale $(O_1, \vec{y})$ Sphère plan de normale $(O_2, \vec{y})$	
Pied (4) / Tibia (3)	Pivot d'axe $(C, \vec{z})$	
Tibia (3) / Fémur (2)	Pivot d'axe $(B, \vec{z})$	
Fémur (2) / Bassin (1)	Pivot d'axe $(A, \vec{z})$	

#### Paramètres géométriques

Solide	Repères ou Bases associés	Paramètres géométriques	Masses
Sol (0)	$B_0(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$		
Bassin (1)	$R_1(A, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z})$	$\overrightarrow{AI} = L_1 \cdot \vec{x}_1$ $\overrightarrow{AG_1} = L_{G1} \cdot \vec{x}_1$ $\theta_1 = (\vec{x}_2, \vec{x}_1) = (\vec{y}_2, \vec{y}_1)$	Masse du bassin + Personne s'appliquant sur une jambe : $m1 = 32 \text{ kg}$
Fémur (2)	$R_2(B, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z})$	$\overrightarrow{BA} = L_2 \cdot \vec{x}_2$ $\overrightarrow{BG_2} = \frac{L_2}{2} \cdot \vec{x}_2$ $\theta_2 = (\vec{x}_3, \vec{x}_2) = (\vec{y}_3, \vec{y}_2)$	Masse Fémur + Personne : $m2 = 14 \text{ kg}$
Tibia (3)	$R_3(C, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z})$	$\overrightarrow{CB} = L_3 \cdot \vec{x}_3$ $\overrightarrow{CG_3} = \frac{L_3}{2} \cdot \vec{x}_3$ $\theta_3 = (\vec{x}, \vec{x}_3) = (\vec{y}, \vec{y}_3)$	Masse tibia + Personne : $m3 = 9 \text{ kg}$
Pied (4)	$R_4(C, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$	$\overrightarrow{CA} = x(t) \cdot \vec{x} + y(t) \cdot \vec{y}$ $\overrightarrow{O_1C} = a \cdot \vec{x} + L_4 \cdot \vec{y}$ $\overrightarrow{O_2C} = -b \cdot \vec{x} + L_4 \cdot \vec{y}$	

Nous allons déterminer la loi de mouvement de l'exosquelette:

Par fermeture de chaîne et par projection, selon  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$  on obtient les équations de mouvement directes suivantes:

$$x(t) = L_3 \cdot \cos(\theta_3(t)) + L_2 \cdot \cos(\theta_2(t) + \theta_3(t)) = f(\theta_2(t), \theta_3(t))$$

$$y(t) = L_3 \cdot \sin(\theta_3(t)) + L_2 \cdot \sin(\theta_2(t) + \theta_3(t)) = g(\theta_2(t), \theta_3(t))$$

Ce qui permet d'obtenir les équations de mouvement inverses donnés:

$$F(\theta_3(t), x(t), y(t)) = (L_3 \cdot \cos(\theta_3(t)) - x(t))^2 + (L_3 \cdot \sin(\theta_3(t)) - y(t))^2 - L_2^2 = 0$$

$$G((\theta_2(t) + \theta_3(t)), x(t), y(t)) = (L_2 \cdot \cos(\theta_2(t) + \theta_3(t)) - x(t))^2 + (L_2 \cdot \sin(\theta_2(t) + \theta_3(t)) - y(t))^2 - L_3^2 = 0$$

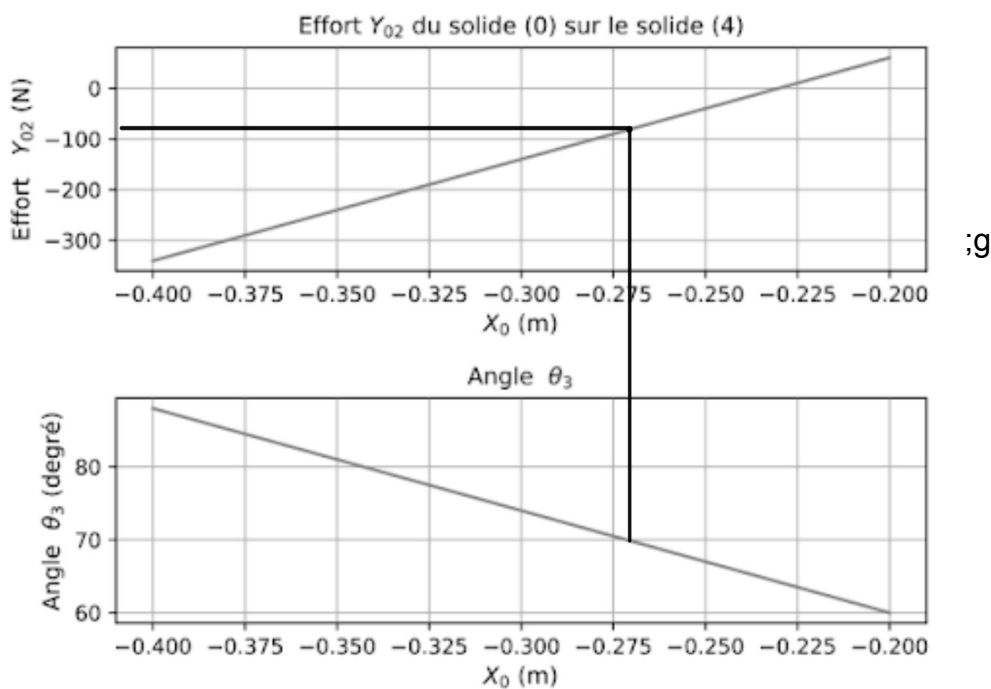
$$F(\theta_3(t), x(t), y(t)) = (L_3 \cdot \cos(\theta_3(t)) - x(t))^2 + (L_3 \cdot \sin(\theta_3(t)) - y(t))^2 - L_2^2 = 0$$

$$G((\theta_2(t) + \theta_3(t)), x(t), y(t)) = (L_2 \cdot \cos(\theta_2(t) + \theta_3(t)) - x(t))^2 + (L_2 \cdot \sin(\theta_2(t) + \theta_3(t)) - y(t))^2 - L_3^2 = 0$$

Nous avons ensuite déterminé la position du pied afin d'éviter le basculement en début de mise en position debout, et privilégier le basculement du tronc afin de s'assurer d'un bon équilibre de l'utilisateur lorsqu'il se relève.

La position limite des pieds nous permettra également de déterminer la position générale de l'exosquelette en début de phase de redressement.

En prenant en compte le fait que la personne dans l'exosquelette peut basculer vers l'arrière lorsque le contact est rompu avec la chaise, la condition de non basculement sur l'effort  $Y_{02}$  est alors  $Y_{02} \geq 0$ .



Pour des raisons pratiques au niveau de la mise en position debout, l'angle  $\theta_3$  doit être au minimum égal à  $70^\circ$  en début de mouvement. Hors en prenant ce critère en compte il y a risque de basculement car on aurait  $Y_{02} = -100\text{N} < 0$ . Pour éviter ce problème, le corps de la personne solidaire du bassin de l'exosquelette est penché vers l'avant en position initiale de redressement.

On nous donne finalement la position initiale, définie par :  $X_0 = -273$  mm,  $Y_0 = 400$  mm,  $\theta_3 = 70^\circ$ ,  $\theta_2 = 108.5^\circ$  et  $\theta_1 = -106.5^\circ$ .

Nous cherchons ensuite les lois de mouvement permettant la transition de l'utilisateur, de la position assise à debout tout en respectant le cahier des charges:

- passage position assis/debout en 5 secondes,
- variation relative de vitesse du point A, sur les axes  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$ , inférieure à 10% .

Les articulations sont commandé à vitesse constante tel que  $\dot{\theta}_2(t) = \omega_2$  et  $\dot{\theta}_3(t) = \omega_3$ .

A partir des données géométriques déterminé précédemment, on va calculer les valeurs numériques de  $\omega_2$  et  $\omega_3$  pour que le déplacement position assise/debout se fasse en 5 secondes comme demandé dans le cahier des charges.

$$\omega_2 = \frac{\theta_{2final} - \theta_{2initial}}{\text{temps de déplacement}} \Rightarrow \omega_2 = \frac{0 - 108,5}{5} = -21,7^\circ/s = -0,38 \text{ rad/s}$$

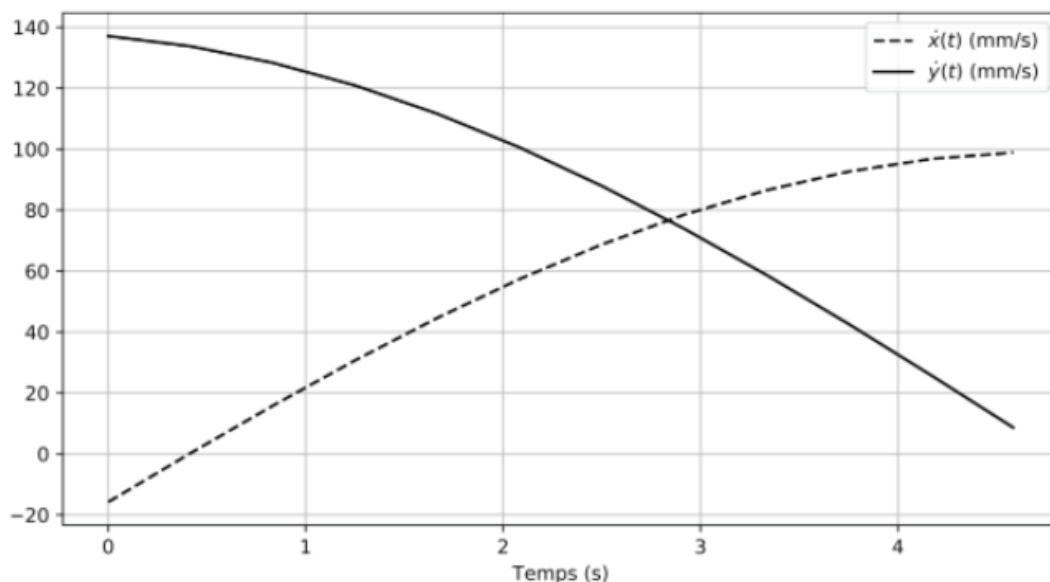


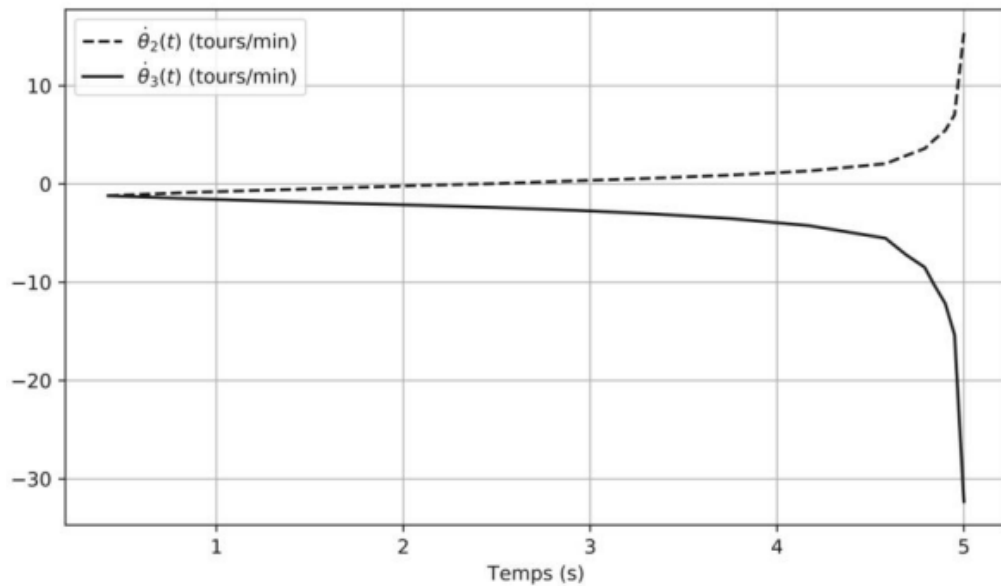
Figure 14 : évolution de  $\dot{x}(t)$  et de  $\dot{y}(t)$  en fonction du temps.

$$\omega_3 = \frac{\theta_{3final} - \theta_{3initial}}{\text{temps de déplacement}} \Rightarrow \omega_3 = \frac{90 - 70}{5} = 4^\circ/s = 0,07 \text{ rad/s}$$

Ce graphique donne  $x'(t) = \bar{v}_{A \in 2/0} \cdot \bar{x}$  et  $y'(t) = \bar{v}_{A \in 2/0} \cdot \bar{y}$  en fonction du temps. Nous remarquons que la variation de la vitesse au point A est supérieure à 10% ce qui ne respecte pas le cahier des charges.

Donc nous fixons  $x'(t)$  et  $y'(t)$  constants et grâce à un programme en dichotomie, nous déterminons  $\theta_3(t) = 90^\circ$  et  $\theta_2(t) = 0^\circ$

A partir de la résolution des équations, on peut calculer les vitesses  $\dot{\theta}_2(t)$  et de  $\dot{\theta}_3(t)$ . Elles sont calculées pour un déplacement de la position assise à debout en 5 secondes, et données dans le graphique suivant.



Graphiquement à  $t=5s$  on a :

$$|\dot{\theta}_2^{max}| = 17 \text{ tours/min et } |\dot{\theta}_3^{max}| = 32 \text{ tours/min.}$$

Ces valeurs sont toutes les deux compatibles avec les valeurs maximales de vitesse de rotation des moteurs. Ainsi ce modèle respecte toutes les conditions du cahier des charges fixé et est réalisable physiquement.