Concours Commun INP (CCINP), France

Session 2023, filière TSI

Sciences industrielles de l'ingénieur

Durée : 6 heures

Ce que traite le sujet

- Partie I : limiter l'amplitude articulaire
- Partie II : assurer le positionnement de la hanche
- Partie III : assurer le déchargement corporel

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années : prepahelp.com/annales/ccinp/tsi/2023/si

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

ÉPREUVE SPÉCIFIQUE - FILIÈRE TSI

SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Durée : 6 heures

N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

RAPPEL DES CONSIGNES

- *Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé non effaçable pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs, excepté le vert, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.*
- *Ne pas utiliser de correcteur.*
- *Écrire le mot FIN à la fin de votre composition.*

Les calculatrices sont autorisées.

Le sujet est composé de trois parties, toutes indépendantes.

Le sujet comporte :
- le texte du sujet : 27 pages ;
- les Annexes : 10 pages ;
- le Document Réponse (**DR**) : 4 pages.

Le Document Réponse doit être rendu dans son intégralité avec la copie.

Système robotisé d'entraînement à la marche Lokomat®

Présentation générale

Ces dernières années, l'intérêt pour les dispositifs robotiques automatisés pour l'entraînement à la marche pour les patients atteints de troubles locomoteurs d'origines diverses s'est développé.
Le Lokomat® fait partie des premiers outils associant une rééducation sur tapis roulant avec allègement corporel à une orthèse robotisée pour les membres inférieurs. Cet outil a été principalement développé afin de pallier l'insuffisance motrice des membres inférieurs chez des patients présentant des troubles de la marche. L'orthèse permet de positionner et de soutenir le patient dans sa verticalité, ce qui présente une utilité avérée pour les sujets se déplaçant majoritairement en fauteuil roulant à cause, par exemple, de leur insuffisance musculaire. Le but principal de cet outil est de travailler sur le schéma de marche dans sa totalité afin d'en améliorer la qualité, la performance et l'efficience et ainsi de permettre une meilleure autonomie du patient lors de ses déplacements quotidiens. Cette méthode de rééducation se fonde principalement sur un processus d'automatisation du mouvement cyclique, permettant ainsi un (ré)apprentissage sensori-moteur actif et progressif pour le patient. Ce processus se caractérise par des programmes adaptés de (ré)apprentissage des différentes phases de marche et des différents paramètres locomoteurs (vitesse de marche, cadence, longueur et symétrie des pas, etc.). Le travail par répétition intensive du cycle locomoteur permet également, outre la récupération d'une marche autonome, un renforcement musculaire, cardiovasculaire et respiratoire important. En effet, la rééducation intensive et répétitive consiste à réaliser une activité ciblée avec un nombre élevé de répétitions modulables dans des conditions qui en augmentent la charge comparativement à l'intensité habituellement proposée.



Figure 1 - Lokomat®

Description de l'outil

Le Lokomat® se compose **(figures 1** et **2)** :

- d'un exosquelette motorisé et programmable à 2 articulations (hanches et genoux). L'exosquelette est composé de capteurs intégrés au moteur au niveau des articulations, mesurant ainsi en permanence le degré d'amplitude articulaire, le degré de participation ou de résistance du patient au cours des cycles de marche. Les mouvements locomoteurs sont donc guidés par l'exosquelette. La programmation de l'orthèse se fait selon la vitesse du tapis roulant et selon le temps des phases de marche correspondant progressivement au schéma de marche normalisée ;

- d'un harnais de suspension assurant un allègement réglable du poids du corps du patient. Cet allègement corporel, de 40 % du poids du corps au maximum, permet de pallier le déficit musculaire du patient tout en gardant une stimulation sensitive suffisante. Au fil des séances et selon les capacités fonctionnelles du patient, l'allègement est progressivement diminué ;

- d'un tapis roulant de marche motorisé proposant une vitesse de déplacement de 0,5 à 5 km/h. Le tapis roulant est synchronisé avec les mouvements articulaires de l'exosquelette. Sa vitesse peut être ajustée au cours de la séance et/ou variée de façon aléatoire proposant ainsi, lors des exercices, une fréquence de marche adaptable ;

- de deux écrans :
  - l'un permettant au rééducateur de visualiser et de contrôler chaque articulation (feedback visuel) gauche et droite de l'exosquelette, et d'intervenir sur les différents exercices à proposer au patient en fonction de ses capacités ;
  - l'autre proposant une interface entre le patient et les mouvements de l'exosquelette via des exercices spécifiques sous forme de jeux interactifs.

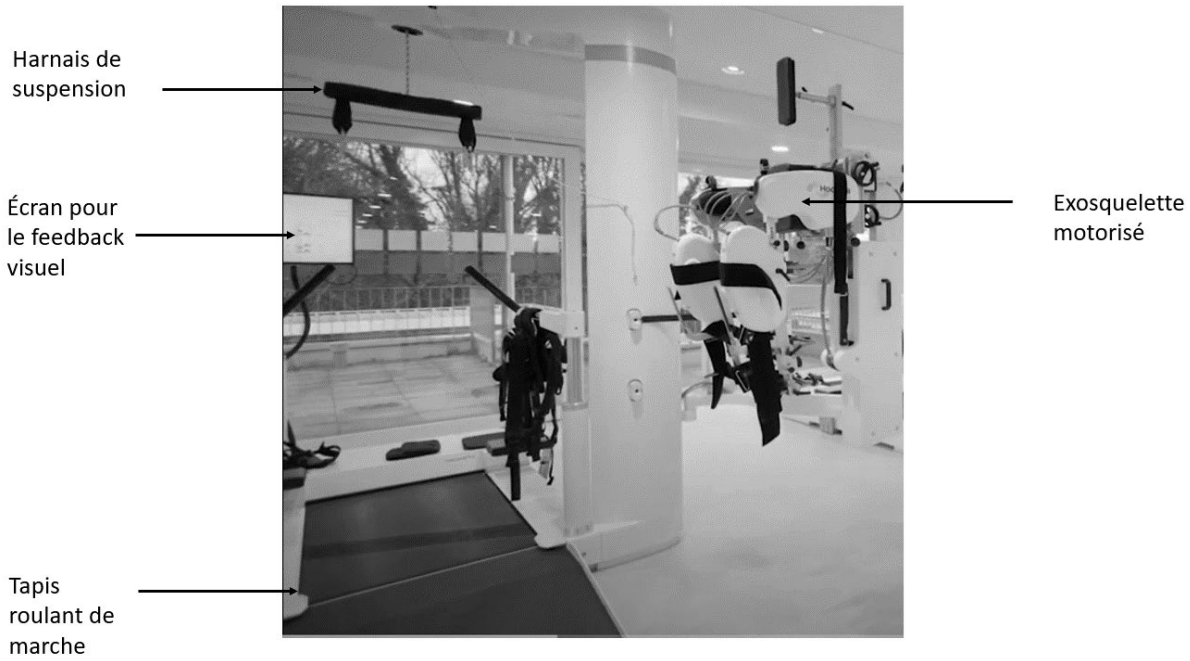


Figure 2 - Sous-ensembles constitutifs du Lokomat®

L'objectif principal du système est de reproduire un geste le plus naturellement possible, de manière répétitive et identique. Le thérapeute est en mesure de créer une séance sur mesure pour le patient en adaptant l'exosquelette en termes de vitesse de marche, de poids supporté par le patient et ainsi du poids compensé par la machine.

L'objectif final est de permettre au patient de retrouver une capacité de marche autonome. Enfin, la prise en charge complète par la machine permet au thérapeute de se focaliser entièrement sur le patient et sa progression plutôt que sur son maintien en position debout.
Une séance de rééducation type dure environ une heure au cours de laquelle le thérapeute reste aux côtés du patient pour l'encourager et le guider. L'exosquelette permet une marche très verticale, robotisée et donc répétitive, c'est cette répétition qui lui donne tout son intérêt par rapport à une technique traditionnelle. Au fur et à mesure des séances, la diminution contrôlée de l'assistance passive encourage le patient à participer davantage.
Dans ce sujet, on s'attachera à valider certaines performances qui caractérisent la capacité de l'exosquelette du Lokomat® à permettre au patient d'effectuer certains mouvements de manière répétitive.

Partie I - Exigence fonctionnelle " Limiter l'amplitude articulaire "

Objectif global : vérifier la capacité de l'exosquelette à reproduire un comportement similaire du point de vue de l'amplitude articulaire des hanches lors de la marche normale.

Exigence	Critères d'appréciation	Niveau
Limiter l'amplitude articulaire de la hanche	Plage angulaire flexion	$\theta_{flex} \in [0°, 15°]$
	Plage angulaire extension	$\theta_{ext} \in [-15°, 0°]$

Figure 3 - Extrait du cahier des charges associé à l'exigence
" Limiter l'amplitude articulaire de la hanche "

I.1 - Étude préliminaire

Objectif : analyser et valider une modélisation de l'exosquelette.

L'**annexe 1** donne l'architecture générale de l'exosquelette. Les deux articulations sont identiques et constituées des éléments principaux suivants :

- un moteur à courant continu équipé d'un réducteur permet de piloter le reste du mécanisme ;
- à chaque articulation, un capteur de position angulaire est placé dans l'axe articulaire et un capteur de force axiale, traction et compression, se situe à l'extrémité de la vis ;
- des butées mécaniques amovibles limitent la plage articulaire en fonction des recommandations médicales relatives aux restrictions articulaires du patient. Sans restriction, elles limitent la course angulaire physiologique totale admissible ;
- des systèmes coulissants permettent d'ajuster les longueurs des segments de la cuisse, de la jambe et du pied. Ces réglages sont manuels et maintenus par des vis de fixation. Le système de réglage des longueurs de la cuisse et de la jambe est compatible avec l'encombrement linéaire et pendulaire des vis de mouvement. L'exosquelette permet ainsi de s'adapter à des personnes de taille comprise entre 150 et 190 cm.

Q1. Compléter sur le **Document Réponse** (**DR**), la chaîne fonctionnelle qui détaille l'organisation structurelle de la motorisation de la hanche.

Q2. À l'aide de l'**annexe 2** et des **figures 4** et **5**, désigner et justifier le plan dans lequel est proposé le modèle des membres inférieurs équipés de l'exosquelette.

Justifier également le modèle d'étude proposé.



Figure 4 - Modèle numérique

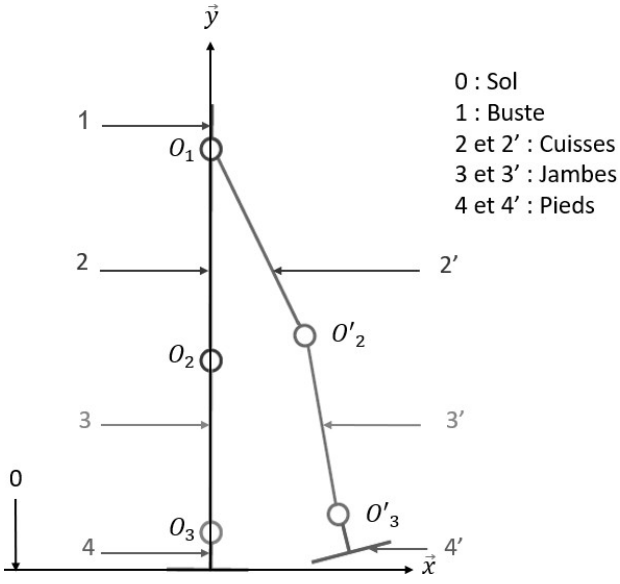


Figure 5 - Modèle d'étude

I.2 - Caractérisation géométrique de la marche

La locomotion est régie par une alternance d'appuis réalisés par les jambes sur le sol. Cette alternance est appelée cycle de marche. Le cycle de marche illustré en **figure 6** se définit par des phases qui s'enchaînent et se répètent. Un cycle correspond à une succession de doubles appuis également appelés " doubles contacts " et d'appuis unilatéraux ou " unipodes ", il se décompose en deux phases principales, l'une d'appui et l'autre d'oscillation du membre étudié.

Par convention, le cycle de marche débute par l'attaque du talon droit et se termine par l'attaque suivante du même talon. Afin de comparer et d'examiner la marche de plusieurs patients, celui-ci est normalisé en pourcentage de la durée du cycle.

Une illustration de la décomposition du cycle est proposée.

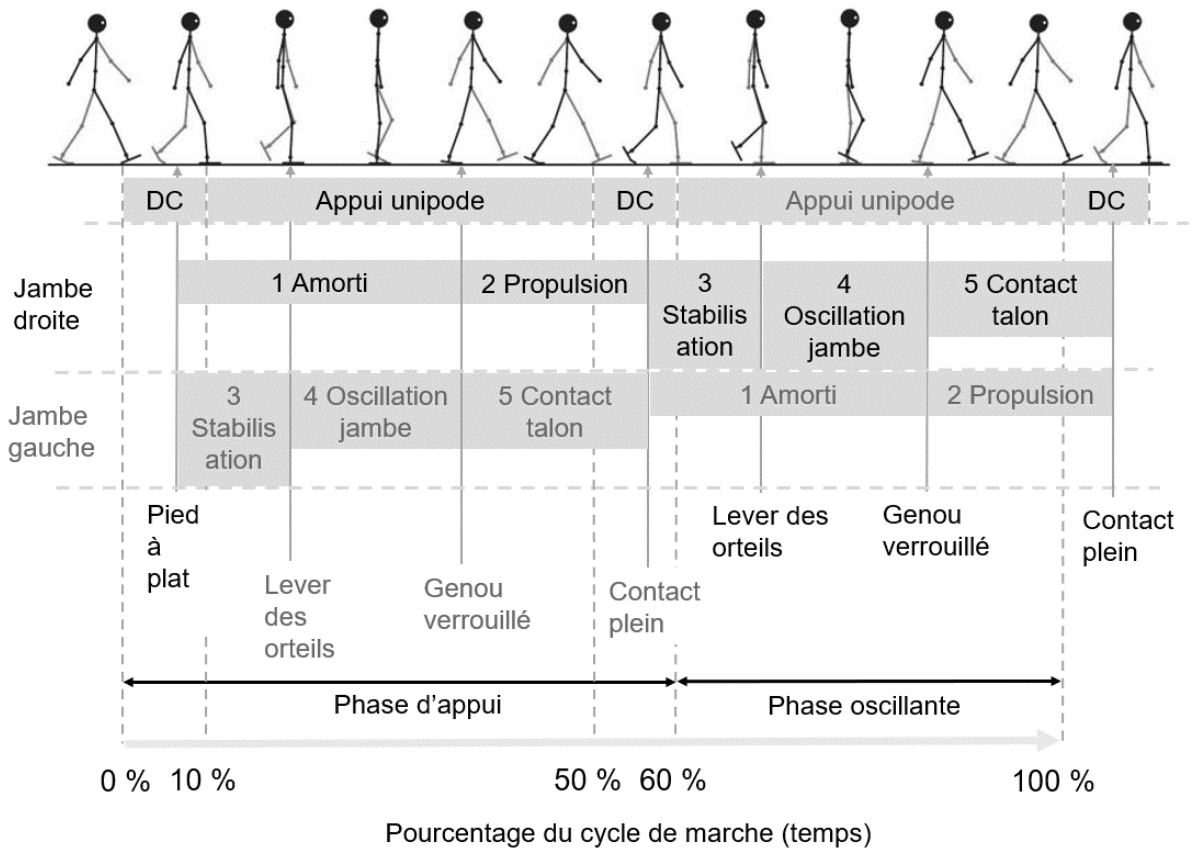


Figure 6 - Cycle de marche

Le cycle de marche peut être décomposé, en première approximation, comme une succession de phases d'appui (60 %) où les deux pieds sont en contact avec le sol, notées **DC pour double contact** sur la **figure 6**, et de phases oscillantes (40 %) où un des deux pieds n'est plus en contact avec le sol (**appui unipode**). L'évolution de la position angulaire des articulations de la jambe droite, lors du cycle de marche, peut être décrite de façon plus précise à l'aide des quatre phases présentées ci-dessous :

- phase 1, dite phase de mise en charge de la jambe droite. Elle débute lorsque le talon du pied droit entre en contact avec le sol alors que les orteils du pied gauche sont toujours en contact avec le sol. Cela correspond au premier double appui (double contact, DC) ou appui bipodal. Cette phase est dédiée au transfert du poids entre les deux jambes, à l'absorption des chocs et à la conservation de la vitesse de marche tout en maintenant l'équilibre ;

- phase 2, dite phase d'appui sur la jambe droite. Elle débute lors du décollement des orteils du pied gauche ;

- phase 3, cette phase correspond au deuxième double appui (DC). Son rôle est le transfert du poids vers la nouvelle jambe (ici, jambe gauche) en phase d'appui et la propulsion du corps vers l'avant ;

- phase 4, phase pendulaire ou oscillante de la jambe droite. Elle débute lors du décollement des orteils du pied droit et doit permettre au membre oscillant de passer devant sans toucher le sol.

Durant ce cycle de marche, le genou joue un rôle prépondérant. Son activité met en évidence cinq phases :

- phase 1 dite d'amorti : elle commence juste après le contact complet avec le sol de la jambe qui se balance, c'est-à-dire, après le contact du talon et des orteils. Dans cette phase, la jambe antérieure supporte le poids intégral du tronc. Le genou antérieur commence à fléchir jusqu'à environ 20° et se comporte comme un ressort comprimé ;

- phase 2 dite phase de propulsion. Lorsque la compression maximale est atteinte, le genou s'étend jusqu'à son extension maximale. Le genou agit à nouveau comme un ressort de torsion avec une rigidité identique à la première phase ;

- phase 3 dite de stabilisation : elle est caractérisée par un double appui pendant laquelle la stabilisation de la posture du corps est garantie. En analysant la cinématique du genou, on constate que le genou commence à fléchir à nouveau pour préparer la jambe à l'élan ;

- phase 4 dite phase oscillante de la jambe droite. Après le décollement du pied, la phase d'élan commence en transférant la jambe devant le corps et la flexion de cette dernière se termine lorsque l'angle du genou atteint environ 60°. Elle se prolonge ensuite jusqu'à ce que le genou de la jambe d'élan soit totalement étiré. Cette phase comprend à la fois la flexion et l'extension du genou ;

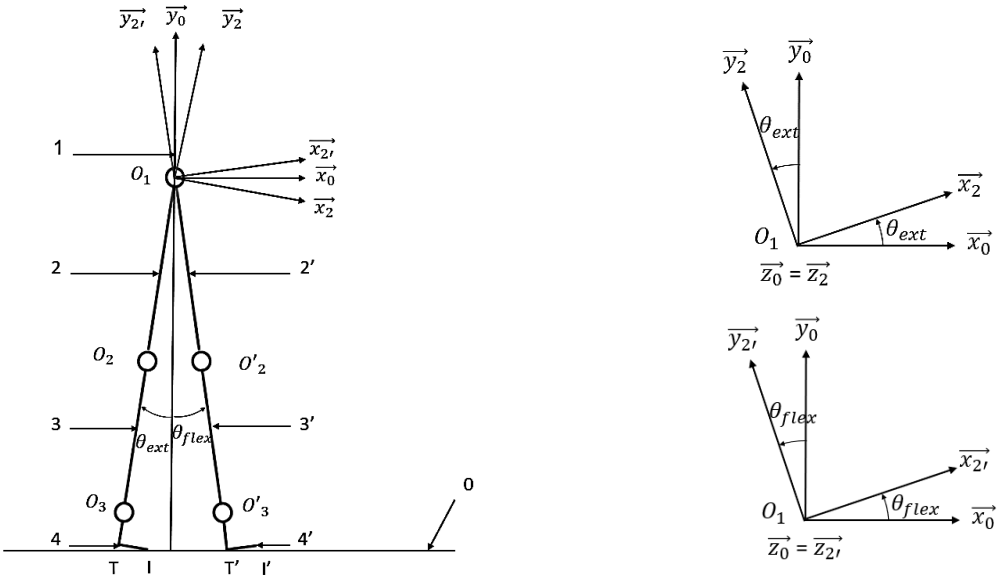
- phase 5 dite d'impact du talon. Dès que le genou de la jambe oscillante est verrouillé et que le talon entre en contact avec le sol, la dernière phase commence. Le genou gère alors l'impact du pied lors de la frappe du talon et permet de contrôler le contact complet du pied. Le genou doit être à nouveau rigide pour gérer l'impact du poids du corps.

L'exosquelette doit permettre de reproduire ce cycle de marche. Il doit permettre de couvrir l'amplitude articulaire nécessaire aux mouvements des différentes articulations.
L'étude proposée se consacre uniquement à la modélisation de l'articulation de la hanche et plus précisément, à l'amplitude articulaire de la hanche. Cette dernière est caractérisée par deux mouvements :

- la flexion qui emmène la cuisse de l'arrière vers l'avant ;
- l'extension qui est le mouvement opposé.

Les mouvements articulaires de la hanche sont illustrés sur l'**annexe 2**.

Dans cette sous-partie, on adopte un modèle segmentaire des membres inférieurs illustré **figure 7**.



(a) Modèle d'étude **(b)** Figures géométrales

Figure 7 - Modèle segmentaire des membres inférieurs

Les segments 2 et 2' représentent la partie de l'exosquelette reliée à la cuisse, les segments 3 et 3', aux jambes et les segments 4 et 4' correspondent aux pieds (**figure 7a**). On se place dans une phase où les articulations liées aux genoux en O_2 et O'_2 sont inactives et verrouillées en angle. Les jambes seront positionnées dans le prolongement des cuisses. On négligera, en première approche, les angles générés par la dorsiflexion de la cheville et la flexion plantaire : les pieds resteront également orthogonaux aux jambes. Les deux segments 4 et 4' seront considérés constamment orthogonaux aux segments 3 et 3'.
Le point O_1 représente le centre de rotation des deux membres inférieurs par rapport aux hanches considérées comme fixes. Les points I et I' représentent les points de contact entre chacun des deux pieds et le sol. Les points T et T' correspondent aux talons des pieds 4 et 4'. Les positions angulaires des deux membres sont décrites à l'aide des deux paramètres angulaires θ_{flex} et θ_{ext} définis par les figures géométrales (**figure 7b**). Ces angles correspondent à la rotation des deux membres inférieurs dans le cas où le genou et la cheville sont bloqués et n'autorisent aucune flexion.

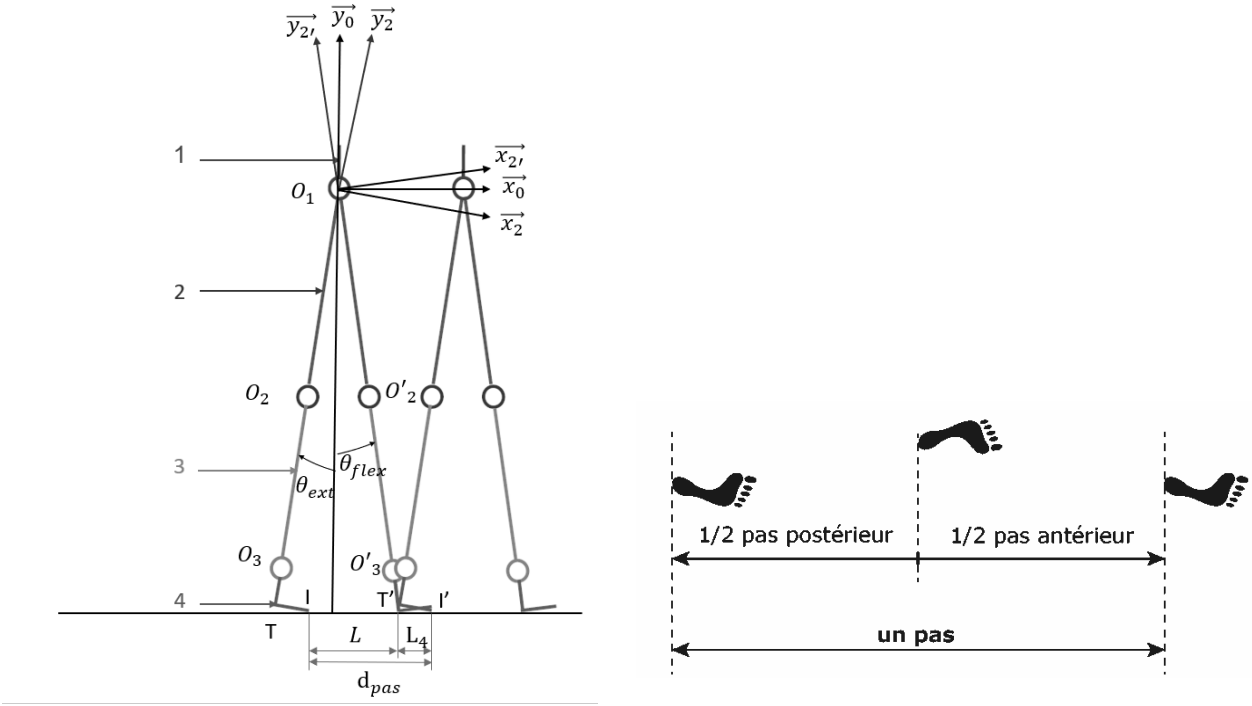
Données :

- la vitesse du tapis 0 est réglée par le praticien de telle manière à respecter la cinématique souhaitée pour l'exosquelette ;
- $(\overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{x_{2'}}) = \theta_{flex}$;
- $(\overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{x_2}) = \theta_{ext}$;
- $\overrightarrow{O_1T} = -L_1\overrightarrow{y_2}$;
- $\overrightarrow{O_1T'} = -L_2\overrightarrow{y_{2'}}$;
- $\overrightarrow{TI} = L_4\overrightarrow{x_2}$;
- $\overrightarrow{IT'} = L\overrightarrow{x_0}$;
- $\overrightarrow{T'I'} = L_4\overrightarrow{x_{2'}}$;
- le patient mesure 1,75 m et pèse 70 kg.

Q3. Donner l'expression de la longueur d'un pas L_{pas} pour une cadence cad = 85 pas·min^{-1} et une vitesse naturelle de v = 1,20 m·s^{-1}. Application numérique.

Q4. Déterminer le temps de cycle de marche T_{cycle} .

Q5. Écrire la relation vectorielle associée à la fermeture géométrique $(ITO_1T'I)$.



(a) Modèle d'étude **(b)** Définition d'un pas

Figure 8 - Schéma d'étude

Q6. À l'aide d'une projection à énoncer, préciser l'expression de L en fonction de $L_1, L_2, L_4, \theta_{flex}$ et de θ_{ext} .

En déduire l'expression du demi-pas postérieur d_{pas} , puis de la longueur d'un pas L_{pas} en fonction de $L_1, L_2, L_4, \theta_{flex}$ et de θ_{ext} .

La **figure 9** présente une série de courbes illustrant le comportement articulaire de la hanche chez un patient sain dans différentes configurations.

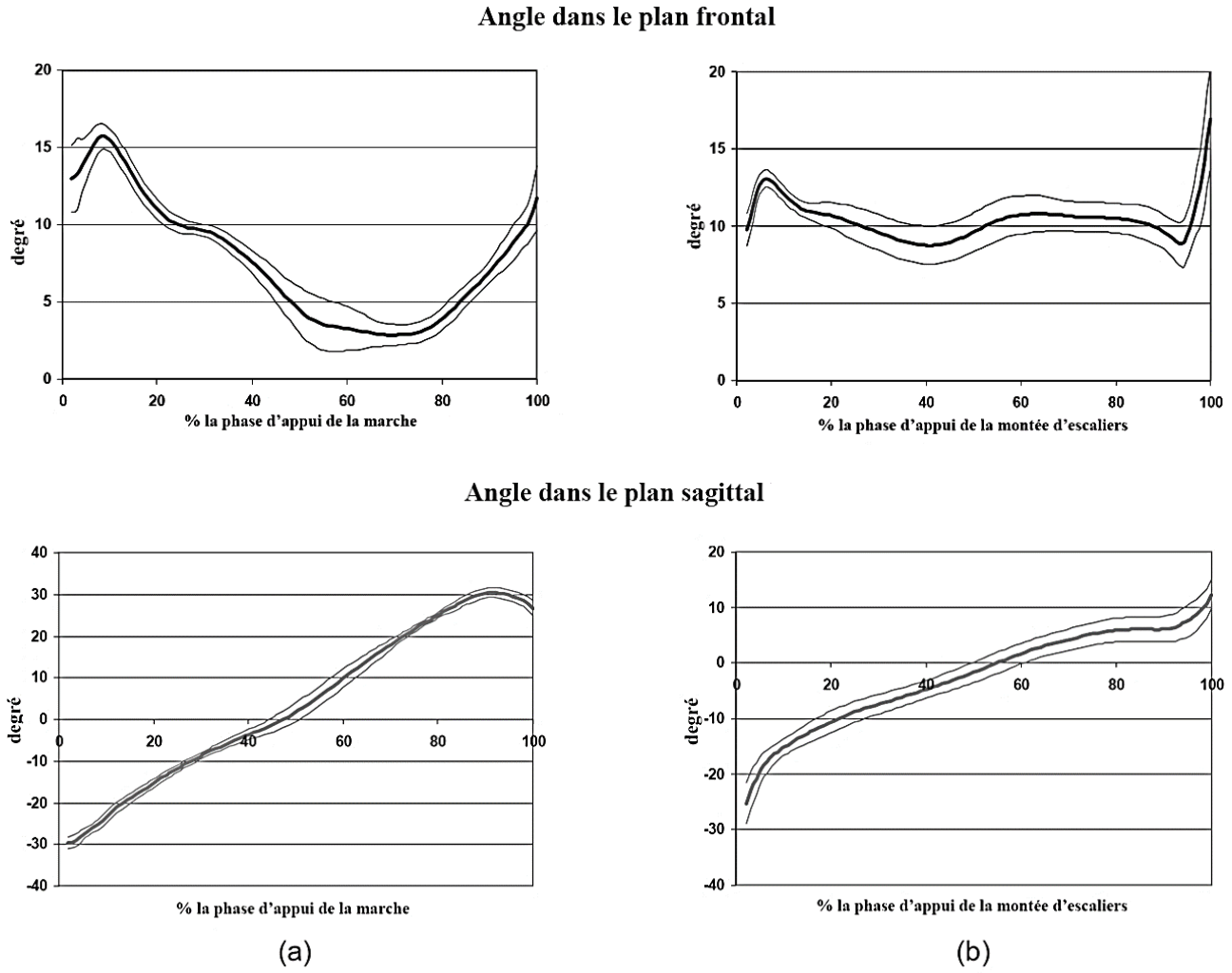


Figure 9 - Valeurs articulaires de la hanche : valeurs moyennes (trait gras) et écarts-types (trait fin). Les angles frontal et sagittal sont présentés pour le patient sain au cours de la phase d'appui de la marche **(a)** et la montée d'escaliers **(b)**

Q7. Préciser sur les figures des courbes du **DR** les phases de flexion et d'extension de la hanche.

Q8. À l'aide de la **figure 9**, proposer une relation liant les angles θ_{flex} et θ_{ext} dans le cadre de l'étude proposée.

Les résultats des **Q6** et **Q8** permettent d'exprimer θ_{flex} uniquement en fonction des paramètres géométriques L_1, L_2, L_4 et L_{pas} :

$$\theta_{flex} = arccos\left(-\frac{L_4 - \frac{1}{2}L_{pas}}{\sqrt{(L_1+L_2)^2+{L_4}^2}}\right) - arctan\left(\frac{L_1+L_2}{L_4}\right).$$

Q9. En déduire la valeur numérique de $\theta_{flex,max}$, angle maximal atteint lors de la flexion de la hanche.

Le Lokomat® est doté d'un écran de contrôle tactile permettant un retour visuel rapide au rééducateur afin d'intervenir directement sur les différents exercices à proposer et de contrôler chaque articulation, gauche et droite, de l'exosquelette en fonction des capacités du patient.
L'**annexe 3** présente l'interface logiciel assurant les différents réglages de l'exosquelette.

Q10. Analyser les réglages effectués par le praticien et entourés sur l'**annexe 3**.

Q11. Par le biais de l'interface logiciel, le praticien a la possibilité de limiter l'amplitude articulaire. Indiquer l'intérêt de la présence des butées mécaniques mises en évidence sur l'**annexe 1**.

Un modèle multiphysique de l'exosquelette est également représenté en **annexe 3**.

La **figure 10** présente la superposition des résultats obtenus par simulation à l'aide du modèle Simscape de l'**annexe 3** (courbe " Simulation ") et ceux obtenus par relevé expérimental (courbe " Capture ") de l'évolution de l'angle de la hanche dans le plan sagittal.

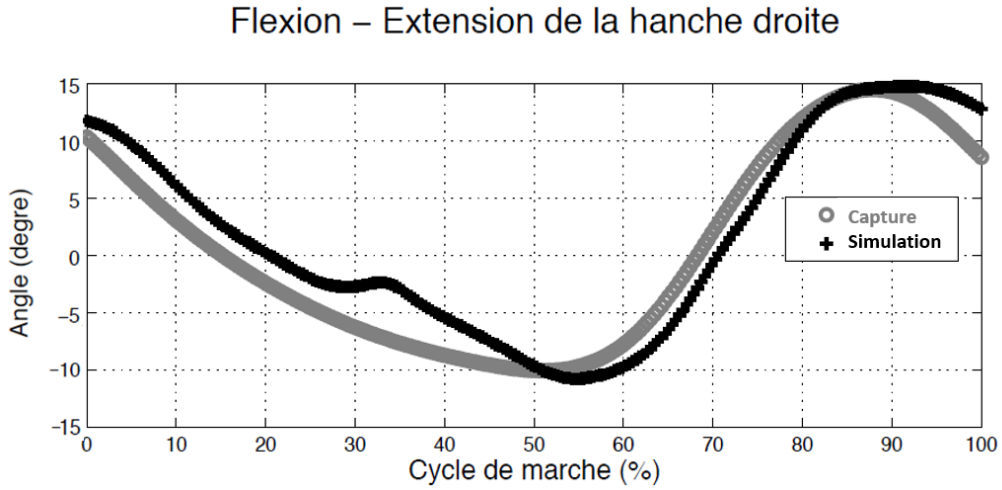


Figure 10 - Évolution de l'angle de la hanche dans le plan sagittal

Q12. Au vu des résultats précédents, critiquer le modèle utilisé pour l'exosquelette. Peut-on affirmer que l'exigence " Limiter l'amplitude articulaire " est respectée ?

Partie II - Exigence fonctionnelle
" Assurer le positionnement de la hanche "

Objectif : vérifier que le moteur choisi est en capacité de fournir le couple à la hanche.

Cette partie vise à déterminer l'équation dynamique qui permet d'obtenir le couple moteur en fonction des caractéristiques géométriques dans une phase critique du cycle de marche : la phase où le patient équipé de l'exosquelette est en appui unipode et le genou est verrouillé (phase 4 de l'activité du genou).
On suppose donc le patient en appui sur une jambe et l'autre étant tendue. On cherche à obtenir l'équation de mouvement de la jambe oscillante. Le modèle d'étude de l'exosquelette dans cette phase est celui représenté à la **figure 11**.

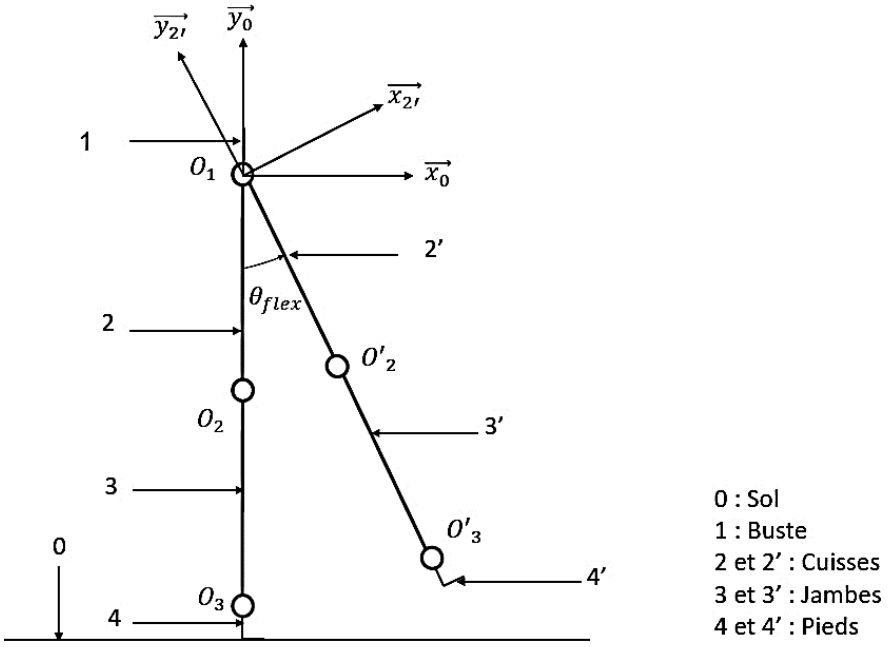


Figure 11 - Schéma cinématique de l'exosquelette lors de la phase oscillante en appui unipodal et genou verrouillé (phase 4 de l'activité du genou)

Hypothèses et données :

- les liaisons sont considérées comme parfaites ;
- la vitesse du tapis est réglée par le praticien de sorte que la cinématique souhaitée pour l'exosquelette soit respectée ;
- les solides 1, 2, 3 et 4 sont considérés comme fixes par rapport au sol 0 (tapis) ;
- le repère $R_0(O_1, \overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{y_0}, \overrightarrow{z_0})$ associé au sol 0 est supposé galiléen ;
- on associe à la cuisse 2' le repère $R_2(O_1, \overrightarrow{x_{2'}}, \overrightarrow{y_{2'}}, \overrightarrow{z_0})$ tel que $(\overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{x_{2'}}) = \theta_{flex}$;
- on note θ_m l'angle du moteur de l'articulation de la hanche et ω_m la vitesse de rotation du moteur ;
- on note θ_{flex} l'angle de l'articulation de la hanche et $\omega_{flex/0}$ la vitesse de rotation de la hanche ;
- le couple fourni par le moteur est noté $C_m(t)$ et l'inertie axiale du rotor moteur est notée J_m ;
- le rendement global du système de réduction en régime permanent est de 1 ;
- on note k le rapport de réduction global de l'articulation de la hanche tel que : $k = \frac{\omega_{flex}}{\omega_m}$;
- la masse du patient est notée M et vaut : M = 70 kg.

Solides	Caractéristiques géométriques	Caractéristiques cinétiques
Jambe 1		
Solide $\Sigma = \{2 + 3 + 4\}$	$\overrightarrow{O_1O_2} = -L_2\overrightarrow{y_0}$ $\overrightarrow{O_2O_3} = -L_3\overrightarrow{y_0}$ $\overrightarrow{O_1G_1} = -h\overrightarrow{y_0}$	Masse M_1 Centre de gravité G_1 Matrice d'inertie $I(G_1,\Sigma) = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 \end{bmatrix}_{(\overrightarrow{x_0},\overrightarrow{y_0},\overrightarrow{z_0})}$
Jambe 2		
Solide 2'	$\overrightarrow{O_1O_2'} = -L_2\overrightarrow{y_{2'}}$ $\overrightarrow{O_1G_2} = -\frac{L_2}{2}\overrightarrow{y_{2'}}$	Masse m_2 Centre de gravité G_2 Matrice d'inertie $I(G_2,2') = \begin{bmatrix} A_2 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix}_{(\overrightarrow{x_{2'}},\overrightarrow{y_{2'}},\overrightarrow{z_0})}$
Solide 3'	$\overrightarrow{O_2'O_3'} = -L_3\overrightarrow{y_{2'}}$ $\overrightarrow{O_2'G_2} = -\frac{L_3}{2}\overrightarrow{y_{2'}}$	Masse m_3 Centre de gravité G_3 Matrice d'inertie $I(G_3,3') = \begin{bmatrix} A_3 & 0 & 0 \\ 0 & B_3 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix}_{(\overrightarrow{x_{2'}},\overrightarrow{y_{2'}},\overrightarrow{z_0})}$
Solide 4'	$\overrightarrow{O_3'G_4} = -\frac{L_4}{2}\overrightarrow{y_{2'}}$	Masse m_4 Centre de gravité G_4 Matrice d'inertie $I(G_4,4') = \begin{bmatrix} A_4 & 0 & 0 \\ 0 & B_4 & 0 \\ 0 & 0 & C_4 \end{bmatrix}_{(\overrightarrow{x_{2'}},\overrightarrow{y_{2'}},\overrightarrow{z_0})}$

Figure 12 - Notations et paramètres pour la modélisation dynamique

Q13. Quelle(s) hypothèse(s) mise(s) en place justifie(nt) la forme des matrices d'inertie des solides 2', 3' et 4' ?

Q14. On considère le système $\Sigma' = \{ rotor + 2' + 3' + 4'\}$. Déterminer les énergies cinétiques de chacun des solides du système Σ' dans leur mouvement par rapport au repère R_0 .

Q15. Isoler l'ensemble Σ' et déterminer les puissances des actions mécaniques extérieures agissant sur Σ'.

Q16. Déterminer les puissances des efforts intérieurs au système Σ'.

Q17. Appliquer le théorème de l'énergie cinétique (Énergie Puissance) au système Σ'.

Q18. Mettre la relation de la **Q17** sous la forme :

$$J_{eq}\frac{d\omega_m}{dt} = \ C_m(t) - \ C_r(t)$$

où les termes J_{eq} et $C_r(t)$ seront à expliciter.

Q19. Sans faire de calculs, donner très clairement et précisément la démarche qui permet d'obtenir l'équation précédente à partir de l'application du principe fondamental de la dynamique.

Préciser quel(s) est(sont) le(s) système(s) étudié(s), quel(s) est(sont) le(s) théorème(s) ou principe(s) utilisé(s) et quels sont les termes qu'il faudrait calculer. Justifier clairement vos choix.

Q20. Le réducteur utilisé est un réducteur de type train épicycloïdal à trois étages. Un schéma cinématique est fourni en **figure 13**.

On note D_i le diamètre de la roue dentée i, $i \in [\![0,3]\!]$.
Donner les relations entre les différents diamètres des roues dentées permettant de garantir la coaxialité des planétaires, des couronnes et des porte-satellites.

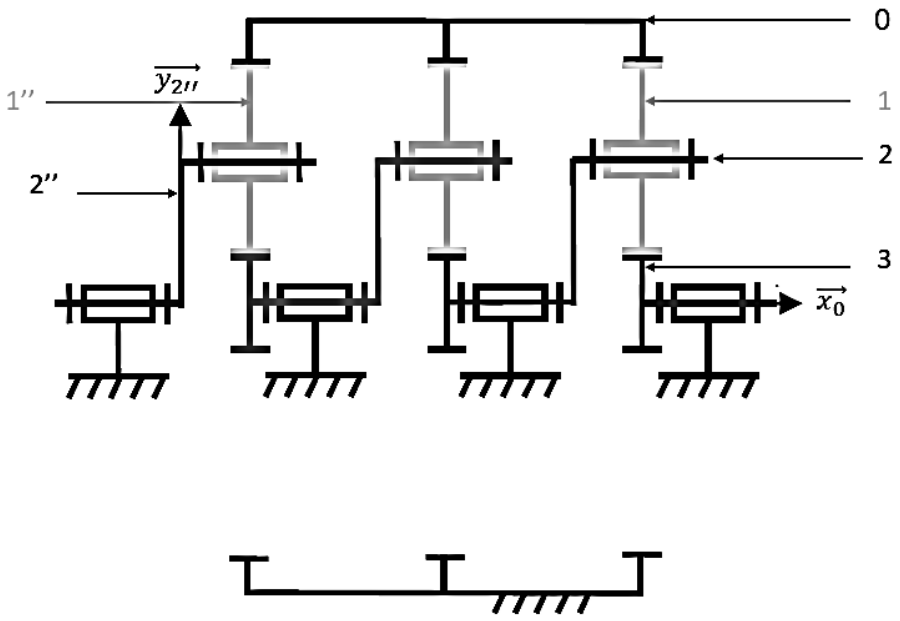


Figure 13 - Modèle du train épicycloïdal

On donne le nombre de dents Z_i des éléments constitutifs i du premier étage du train épicycloïdal :

$Z_0 = 60$ dents,
$Z_1 = 18$ dents,
$Z_2 = 45$ dents,
$Z_3 = 24$ dents.

Q21. Calculer le rapport de transmission du premier étage.

Q22. Les étages étant tous identiques, en déduire le rapport de transmission global du réducteur ainsi que la référence du réducteur choisi à l'aide de l'extrait du catalogue du constructeur Maxon fourni en **annexe 4**.

Toutes les articulations de l'exosquelette ont une structure similaire à celle de la hanche dont on rappelle qu'un modèle volumique partiel est donné en **annexe 1**. Le schéma cinématique de l'articulation de la hanche est représenté **figure 14**.

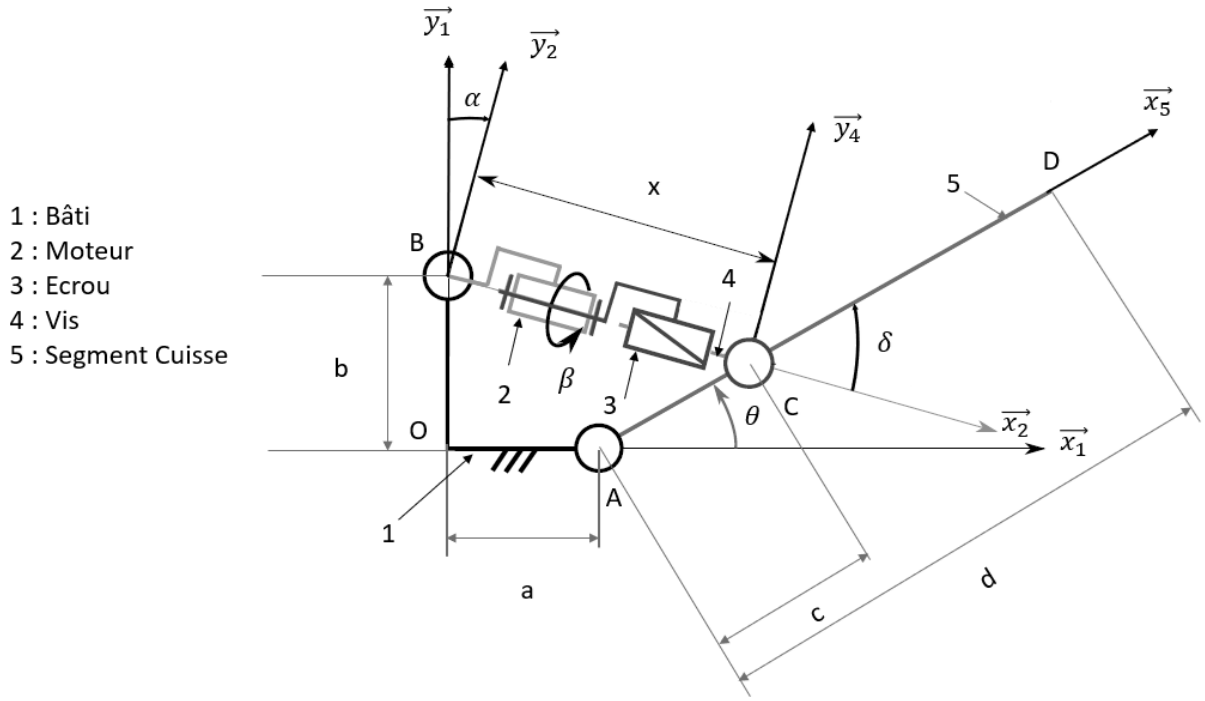


Figure 14 - Schéma cinématique de l'articulation de la hanche

Données :

- $R_1(O, \overrightarrow{x_1}, \overrightarrow{y_1}, \overrightarrow{z_1})$ repère associé au bâti 1 ;
- $R_2(B, \overrightarrow{x_2}, \overrightarrow{y_2}, \overrightarrow{z_2})$ repère associé au stator du moteur 2 en liaison pivot d'axe $(B, \overrightarrow{z_1})$ avec le bâti 1 tel que : $(\overrightarrow{x_1}, \overrightarrow{x_2}) = \alpha$ et $\overrightarrow{OB} = b\overrightarrow{y_1}$;
- $R_3(B, \overrightarrow{x_3}, \overrightarrow{y_3}, \overrightarrow{z_3})$ repère associé à l'écrou 3 en liaison pivot d'axe $(B, \overrightarrow{x_3})$ avec le stator du moteur 2 tel que $(\overrightarrow{y_2}, \overrightarrow{y_3}) = \beta$;
- $R_4(C, \overrightarrow{x_4}, \overrightarrow{y_4}, \overrightarrow{z_4})$ repère associé à la vis 4 tel que : $\overrightarrow{BC} = x\overrightarrow{x_4}$;
- $R_5(A, \overrightarrow{x_5}, \overrightarrow{y_5}, \overrightarrow{z_5})$ repère associé au segment de la cuisse 5 en liaison pivot d'axe $(A, \overrightarrow{z_1})$ avec le stator du moteur 2 tel que : $(\overrightarrow{x_1}, \overrightarrow{x_5}) = \theta$, $\overrightarrow{OA} = a\overrightarrow{x_1}$, $\overrightarrow{AC} = c\overrightarrow{x_5}$;
- pas de la vis : noté p (filet à droite) ;
- en position initiale, la distance x est notée x_0 et l'angle θ est noté θ_0 .

Q23. Exprimer le paramètre x en fonction du paramètre d'entrée β.

Q24. À l'aide de la fermeture géométrique (OBCAO), donner la relation liant les paramètres du mécanisme de mise en mouvement de la hanche sous la forme : $\beta = f(\theta)$.

La **figure 15** présente la superposition des résultats obtenus par simulation à l'aide du modèle Simscape de l'**annexe 3** (courbe "Simulation") et ceux obtenus par relevé expérimental (courbe "Capture") de l'évolution du moment par unité de masse de la hanche dans le plan sagittal.

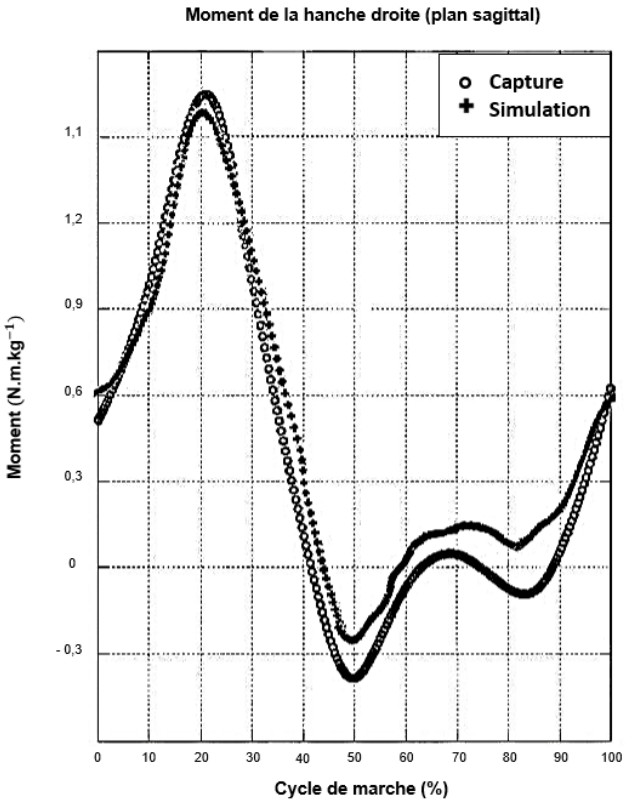


Figure 15 - Évolution du moment par unité de masse de la hanche dans le plan sagittal

Q25. Au vu de la **figure 15**, critiquer le modèle utilisé pour déterminer le couple nécessaire à la mise en mouvement de l'articulation de la hanche.

Q26. À l'aide de l'**annexe 5**, déterminer la masse totale des solides correspondant au membre inférieur en oscillation.

Q27. Valider le choix du moteur Maxon EC 45 réf.136212 d'un point de vue du couple. Les données nécessaires à cette validation sont présentes en **annexe 6**.

Partie III - Exigence fonctionnelle " Assurer le déchargement corporel "

Objectif global : vérifier que le système de décharge corporelle actif permet de réaliser un contrôle en boucle fermée de la force de décharge, soit pour maintenir un niveau de décharge constant durant le cycle de marche qui tient compte des mouvements dynamiques de la masse supportée, soit pour moduler cette décharge en fonction du cycle de marche.

III.1 - Présentation du système de décharge corporelle

Un système de décharge corporelle (BWS : body weight support) actif a été conçu afin de contrôler précisément et de façon dynamique la force de soutien transmise aux bretelles du harnais. Ce BWS est constitué des éléments suivants (**figure 16**) :

- un mécanisme de suspension du harnais possédant 4 degrés de liberté afin de suivre les mouvements du bassin antéro-postérieur, verticaux, l'obliquité et la rotation ;
- un treuil motorisé enroulant un câble dont l'extrémité est attachée au système de suspension ;
- un capteur de force mesurant la tension dans le câble ;
- quatre ressorts de traction placés en parallèle exerçant une traction sur le câble de liaison qui s'enroule sur le treuil. La force des ressorts agit en contre-réaction à la force de décharge corporelle, ce qui diminue le moment moteur. Dans ce cas, le moteur doit compenser uniquement les moments dûs à la dynamique du mouvement corporel vertical et aux variations de force du ressort induit par sa constante ;
- un système de variation de la longueur des ressorts pour régler la charge de contre-réaction ;
- un système de renvoi d'angle constitué de deux pignons coniques, l'un positionné sur l'arbre de sortie du moteur électrique et l'autre en bout de vis à billes.

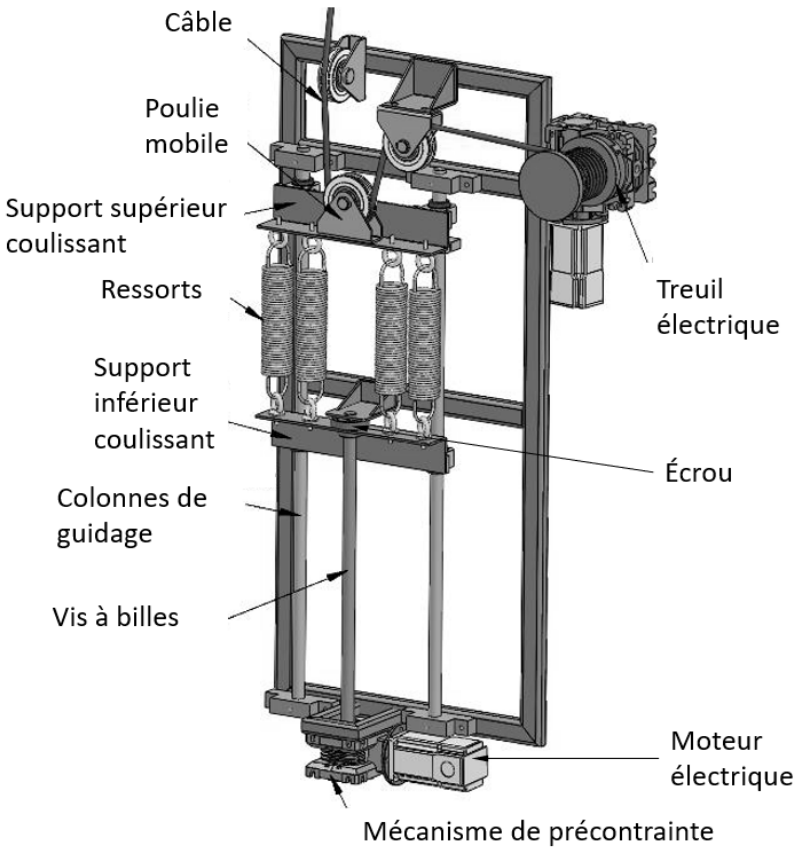


Figure 16 - Constituants internes du système de décharge corporelle

III.2 - Étude de l'architecture générale du système de décharge corporelle

Objectif : évaluer les efforts mécaniques dus aux ressorts.

Q28. À partir de la **figure 16**, compléter, sur le **DR**, le schéma cinématique du système interne constituant le mécanisme de décharge corporelle.

Q29. Donner le graphe des liaisons associé au sous-ensemble S = {vis, colonnes de guidage, support inférieur}.

Q30. Déterminer le degré d'hyperstatisme du sous-système S.

Q31. Donner la conséquence de ce degré d'hyperstatisme.

Q32. On souhaite modéliser le comportement des 4 ressorts identiques de raideur k par un seul ressort de raideur équivalente k_{eq}. En justifiant de manière rigoureuse votre démarche, donner l'expression de k_{eq} en fonction de k.

Q33. Déterminer l'expression de l'effort F_R développé par le ressort équivalent dans le cas d'un déplacement vertical noté y du centre de gravité du patient, l'effort F_R étant nul pour un déplacement y nul.

La **figure 17** présente l'évolution minimale (courbe en trait fin continu) et maximale (courbe en trait gras discontinu) du centre de gravité dans le plan sagittal au cours d'un cycle de marche constatée expérimentalement sur plusieurs patients. Les traits fins verticaux représentent les instants de contact initial et de lever des orteils et les pointillés définissent le milieu de la phase de simple appui.

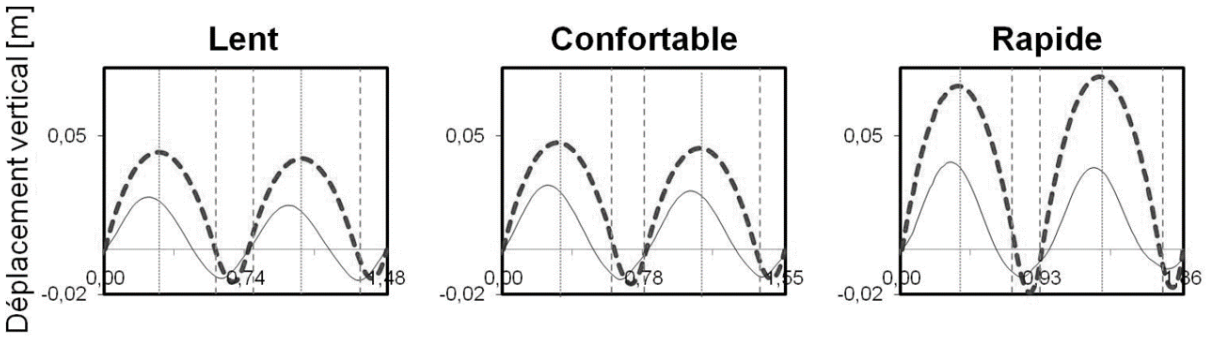


Figure 17 - Évolution de la position du centre de gravité dans le plan sagittal en fonction de l'allure

Q34. À partir des différentes courbes de la **figure 17**, déterminer l'effort maximal F_R réel disponible sachant que la raideur de chacun des ressorts est de k = $2\ kN \cdot m^{-1}$.

III.3 - Contrôle de la force de décharge du système de décharge corporelle

III.3.1 - Caractérisation de l'effort F_R

Objectif : déterminer la plage de variation de l'effort de contre-réaction du ressort F_R .

Le ressort de traction équivalent déterminé en **Q32** est placé en série avec le mécanisme de suspension du harnais (**figure 16**). Le câble de liaison s'enroule sur le treuil. La force de ce ressort agit en contre-réaction à la force de décharge corporelle, ce qui diminue le moment moteur. Dans ce cas, le moteur doit compenser uniquement les moments qui sont dus à la dynamique du mouvement corporel vertical et aux variations de force du ressort induit par sa constante.

Cela a pour but de réaliser un contrôle en boucle fermée de la force de décharge :

- soit pour maintenir un niveau de décharge constant durant le cycle de marche qui tient compte des mouvements dynamiques de la masse supportée (dans ce cas la différence $F_T - F_R$ est constante) ;
- soit pour moduler cette décharge en fonction du cycle de marche (dans ce cas l'évolution temporelle de la différence $F_T - F_R$ est une sinusoïde).

L'expression du moment résistant Mm_F s'opposant au couple moteur M_m est :

$$Mm_F = \frac{R_t(F_T - F_R)}{i_r \cdot \eta_C \cdot \eta_r}$$

où : - R_t : rayon du tambour du treuil = 37,5 mm ;
- i_r : rapport de réduction du motoréducteur = 66 ;
- η_C et η_r : rendement du câble (η_C = 0,95) et du réducteur (η_r = 0,72).

Lors d'une séance de rééducation, des relevés ont permis de mesurer une force de tension F_T dans le câble qui oscille de façon sinusoïdale entre 280 N et 680 N.

$$F_T(t) = 480 + 200\sin(\omega t)\ .$$

Dans ce cas, les déplacements verticaux y(t) des masses soutenues sont modélisés par un mouvement sinusoïdal d'amplitude de 25 mm et de période de 0,5 s. Cette amplitude correspond à une course verticale maximale du bassin pour un cycle de marche à une vitesse de $1{,}4\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Q35. Pour quelle raison la force de tension dans le câble ne doit-elle pas être nulle ?

Q36. En exploitant les courbes de l'**annexe 7** (relevés qui correspondent à un mouvement sinusoïdal d'amplitude de 25 mm), relever la valeur maximale et la valeur minimale du couple moteur Mm.

Q37. Si on considère $Mm_F = M_m$, déterminer l'expression de $F_T(t) - F_R(t)$ avec le résultat de cette différence exprimé en N.

Q38. Démontrer que $F_R(t) = 480 - 88{,}92\,sin(\omega t)$. En déduire la plage de variation de la force F_R.

III.3.2 - Étude de l'asservissement de l'effort de contre-réaction du ressort F_R

Le moteur utilisé est un moteur MAXON référence RE40 - 148877

Objectif : vérifier la performance du système en termes de précision.

Exigence	Critères d'appréciation	Niveau
Limiter l'erreur en régime permanent de l'asservissement de l'effort de contre-réaction du ressort F_R	ε_1 : erreur indicielle	$\varepsilon_1 < 2\ \%\ de\ F_{cons}$
	ε_2 : erreur de poursuite	$\varepsilon_2 < 5\ \%\ de\ F_{cons}$

Figure 18 - Extrait du cahier des charges associé à l'exigence " Limiter l'erreur en régime permanent de l'asservissement de l'effort de contre-réaction du ressort "

L'organisation de l'asservissement est décrite par la **figure 19**.

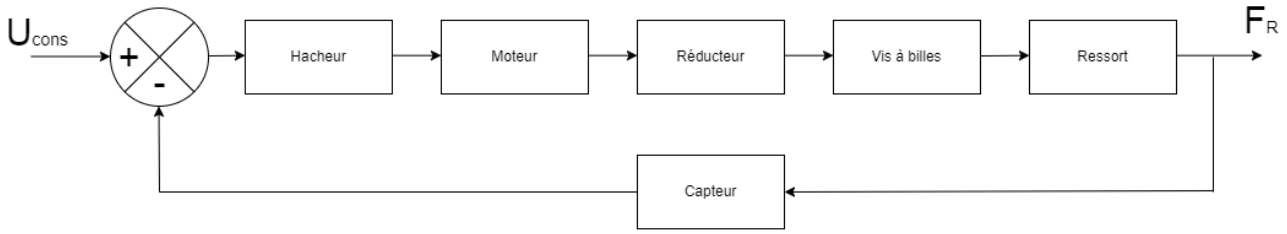


Figure 19 - Organisation structurelle de l'asservissement de l'effort F_R

- U_{cons} : tension de commande, image de la consigne de F_R;
- F_R : force de contre-réaction du ressort.

Cet asservissement peut être représenté par le schéma-blocs (**figure 20) :**

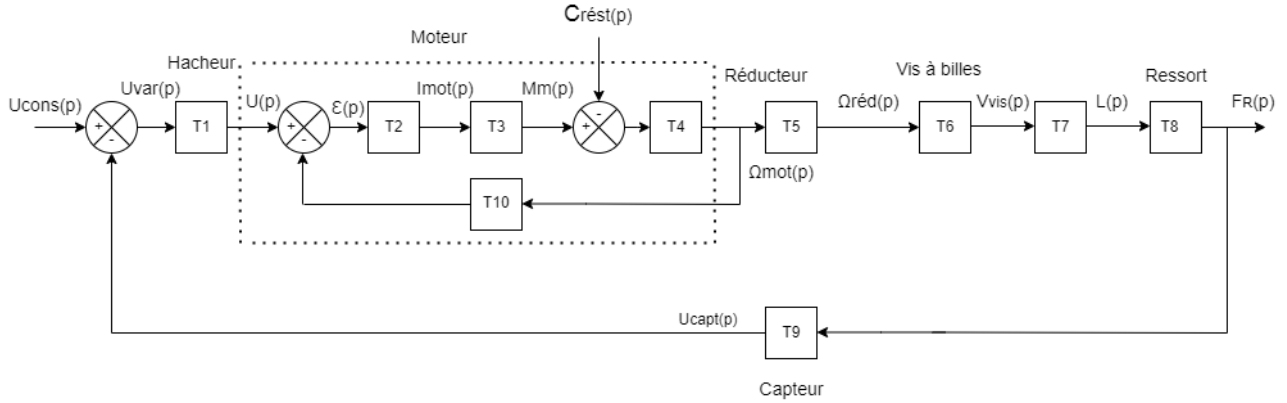


Figure 20 - Schéma-blocs de l'asservissement

T_1 : fonction de transfert du hacheur avec : $T_1(p) = \frac{U(p)}{Uvar(p)} = K_1 = 10$;

T_7 : fonction de transfert d'un intégrateur : elle permet de passer d'une vitesse linéaire V_{vis} à une distance D ;

T_9 : fonction de transfert du capteur : $T_9(p) = \frac{Ucapt(p)}{FR(p)} = K_9 = 10\ mV/N.$

On rappelle les équations qui caractérisent le comportement des moteurs à courant continu :

$$U(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} + e(t)\ ;$$

$$e(t) = k_v\Omega_{mot}(t)\ ;$$

$$J\frac{d\Omega_{mot}(t)}{dt} = M_m(t) - C_{rést}(t)\ ;$$

$$M_m(t) = k_iI_{mot}(t)\ ;$$

où J est le moment d'inertie équivalent à tout le système en mouvement ramené sur l'arbre moteur.

Les frottements sont négligés.

Q39. Exprimer littéralement la fonction de transfert $T_{mot}(p) = \frac{\Omega_{mot}(p)}{U(p)}$.

La raideur du ressort a pour valeur : $Kéq = 8\ N \cdot mm^{-1}$;
Le pas de la vis à bille : p = 4 mm ;
Le rapport de réduction du motoréducteur est de : $i_r = 66$.

Q40. Exprimer littéralement et numériquement les fonctions de transferts :

$$T_5(p),\ T_6(p),\ T_7(p) \text{ et } T_8(p).$$

L'asservissement de l'effort de contre-réaction du ressort doit se faire sur une plage comprise entre 0 N et 1 000 N.

Une première étude, qui ne fait pas partie de ce sujet, a permis de constater que le système était stable. Lors de cette étude, la fonction de transfert en boucle fermée de l'asservissement a été déterminée. Elle a pour expression :

$$H_{BF}(p) = \frac{FR(p)}{U_{cons}(p)} = \frac{\frac{1}{K_9}}{1+\frac{1+\tau_1 p+\tau_2 p^2}{K_9\tau_3}.p}$$

avec : $\tau_1 = \frac{RJ}{k_v k_i}$; $\tau_2 = \frac{LJ}{k_v k_i}$; $\tau_3 = \frac{K_1 R_t Kéq}{k_v i_r}$

avec R : résistance de l'induit k_v : constante de vitesse
L : inductance de l'induit k_i : constante de couple

Q41. À partir de $H_{BF}(p)$ et du schéma-blocs (**figure 20**), déterminer littéralement la fonction de transfert $H_1(p) = \frac{Uvar(p)}{U_{cons}(p)}$.

Dans le but de pouvoir comparer deux grandeurs de même nature : $F_{cons}(p)$ et $F_R(p)$, on modifie le schéma bloc de la **figure 20** pour obtenir celui de la **figure 21.**

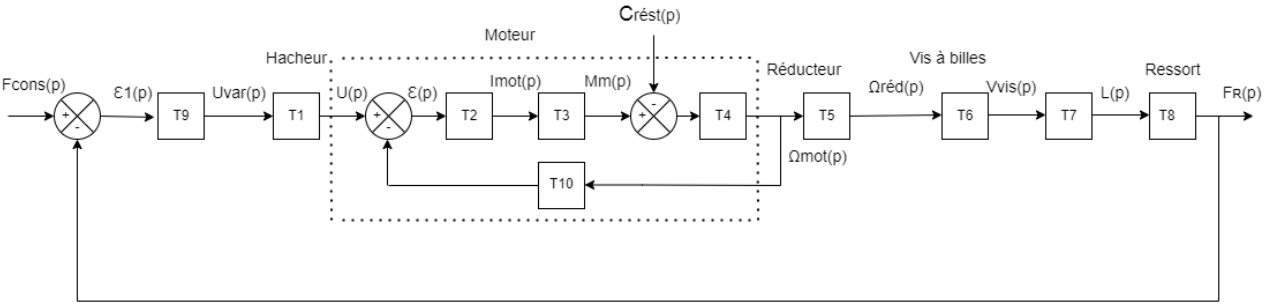


Figure 21 - Schéma-blocs avec en entrée F_{cons}

Q42. Déterminer littéralement la fonction de transfert $H_2(p) = \frac{\varepsilon_1(p)}{F_{cons}(p)}$ si $U_{cons}(p) = K_9\ F_{cons}(p)$.

Afin de pouvoir juger la performance de l'asservissement en termes de précision, on se propose de déterminer l'erreur indicielle.
On prendra pour faire l'application numérique : $\frac{1}{K_9\tau_3} = 133{,}1 ms$.

Q43. Calculer l'erreur indicielle de cet asservissement si F_{cons} est un échelon de 500 N.

Dans ce cas, $F_{cons}(p) = \frac{500}{p}$.

Q44. Calculer l'erreur de poursuite de cet asservissement si la consigne de force est :

$$F_{cons}(p) = \frac{500}{p^2}.$$

Q45. En vous référant au cahier des charges **figure 18**, que pouvez-vous conclure suite aux résultats que vous avez obtenus aux **Q43** et **Q44** concernant la précision.

Faut-il envisager la mise en place d'un correcteur ?
Si oui, de quel type ?
Ce correcteur peut-il être source de problèmes ?

Le contrôle de la force de soutien transmise aux bretelles du harnais est fait à l'aide d'un capteur analogique. Le principe de ce dernier ainsi que le conditionnement du signal délivré par le capteur fait l'objet de la sous-partie suivante.

III.4 - Étude du capteur de force mesurant la tension dans le câble

Objectif : choisir un capteur de force et valider la structure permettant d'obtenir une grandeur électrique proportionnelle à la force de tension dans le câble.

Exigence	Critères d'appréciation	Niveau
Force de tension maximale dans le câble	$F_{t,max} = 950$ N	± 5 %

Figure 22 - Extrait du cahier des charges associé à l'exigence
" Force de tension maximale dans le câble "

Le câble, relié au harnais permettant de soutenir le patient, doit permettre d'assurer la décharge corporelle. Cette dernière est fixée par le praticien en fonction de la pathologie du patient. Le praticien choisit le facteur de soutien qu'il intègre dans l'interface de commande. Ce facteur noté a est compris entre 0 et 1. La force de tension F_t dans le câble est alors donnée par la relation suivante :

$$F_t = (m_s + a\, m_b)(a_y + g)$$

avec :

- m_s : masse du système ;
- a : facteur de soutien corporel (a compris entre 0 et 1) ;
- m_b : masse corporelle du sujet ;
- a_y : accélération verticale du bassin ;
- g : gravité (9,81 $m \cdot s^{-2}$).

Les déplacements verticaux (y) des masses soutenues sont modélisés par un mouvement sinusoïdal d'amplitude de 25 mm et de période de 0,5 s. Cela correspond à une course verticale du bassin pour un cycle de marche à une vitesse de 1,4 $m \cdot s^{-1}$.

Données :

m_b : comprise entre 50 kg et 135 kg
$m_s = 3$ kg
$a = 0{,}5$

Q46. À partir des informations fournies, déterminer l'équation des déplacements verticaux y(t) (allure donnée à la **figure 17**) ainsi que l'équation de l'accélération $a_y(t)$.

On précise que $y(0) = 0$; en déduire la valeur maximale de la force F_t.
Le capteur de force est inséré le long du câble. Il permet un contrôle de la force de décharge.
Le câble est vissé de part et d'autre du capteur sur les embouts filetés prévus à cet effet.



Figure 23 - Capteur de force

Q47. À quel type de sollicitation mécanique est soumis le câble ?

La conversion d'une grandeur mécanique en signal électrique s'effectue avec des jauges de contrainte.
Un capteur de force avec jauges de contrainte est un corps d'épreuve sur lequel des allongements sont exercés au niveau de la surface du matériau par des charges extérieures.
L'allongement est détecté par des jauges appliquées sur la surface du corps d'épreuve. Les jauges convertissent la déformation de la pièce en une variation de résistance électrique.
Un schéma de la jauge est donné en **figure 24**.

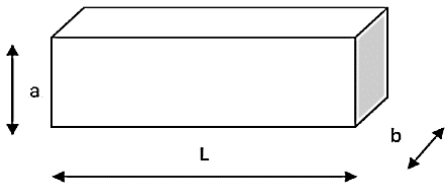


Figure 24 - Schéma des jauges utilisées

Sous l'effet d'une traction, quand L augmente de ΔL, l'allongement relatif est : $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$.
La diminution relative $\frac{\Delta a}{a}$ et $\frac{\Delta b}{b}$ des longueurs a et b s'exprime par : $-\nu\varepsilon$.
La variation relative de la résistivité est : $\frac{\Delta\rho}{\rho} = (1 - 2\nu)\frac{\Delta L}{L}$.
Pour la plupart des métaux, la valeur du coefficient de Poisson est $\nu =$ 0,3.

En partant de la relation $R = \rho\frac{L}{S}$, permettant de déterminer la résistance d'un conducteur, on obtient par dérivation logarithmique la relation suivante :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta a}{a} - \frac{\Delta b}{b}.$$

Q48. À partir des informations fournies précédemment, calculer le facteur de jauge $K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}}$.

Q49. Le capteur qui équipe le système est un capteur référence CO 100 – Y2 choisi dans la gamme des capteurs CO Y2 proposés par la société SAUTER en **annexe 8**.

En vous référant à l'extrait du cahier des charges indiqué **figure 22**, justifier ce choix.

La tension d'alimentation de 10 V, qui sert à alimenter le capteur, est fournie par un module amplificateur conditionneur analogique (référence ME 520) de la société MEIRI. La documentation de ce dernier est fournie en **annexe 9**.

La tension délivrée par le capteur est donnée par la relation suivante :

$$U_{capteur} = \frac{Sensibilité \times Tension\ d'alimentation}{Charge\ maximale}\ Charge\ mesurée.$$

Q50. Calculer la valeur de la tension électrique fournie par le capteur pour un effort mécanique maximal F_t d'environ 950 N. On considère que la sensibilité du capteur est de 2 mV/V.

Le signal de sortie du capteur est amplifié par le conditionneur analogique.
L'électronique associée au module ME 520 peut être schématisée par la structure illustrée en **figure 25.**

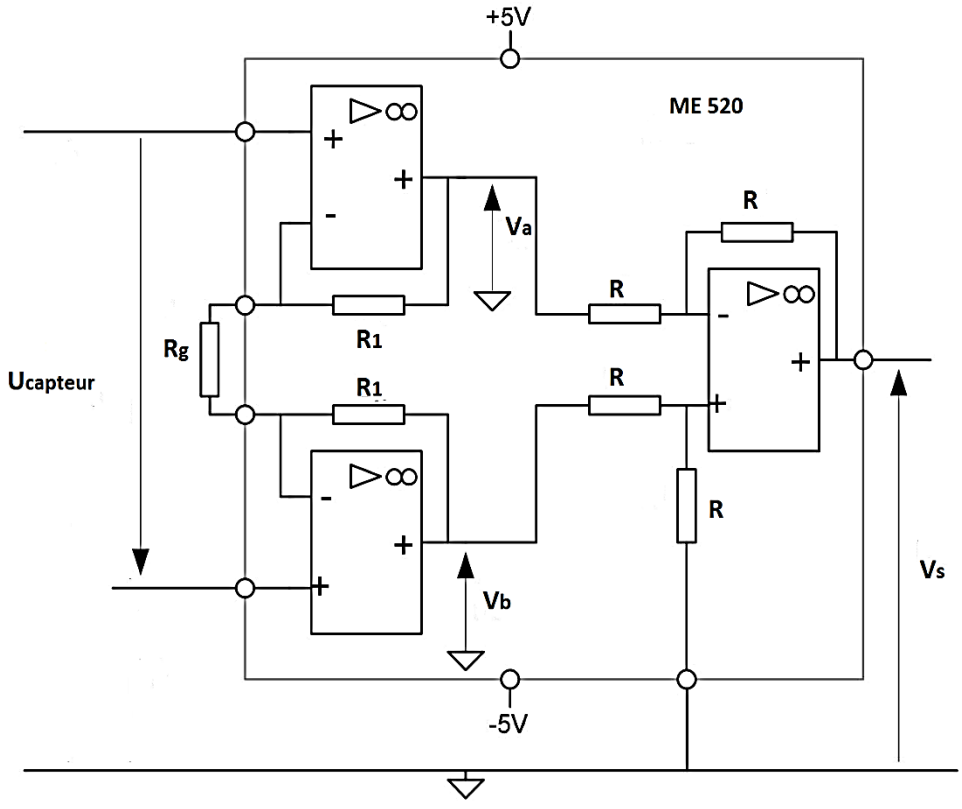


Figure 25 - Schéma du module ME 520

Q51. Le but est de déterminer le gain de l'amplificateur d'instrumentation et pour cela il faut :

- déterminer la relation entre Vs, Va et Vb ;
- déterminer la relation entre Va, Vb et $U_{capteur}$;
- en déduire la relation entre Vs et $U_{capteur}$.

Q52. Quel est le rôle de la résistance R_g ?

Q53. Expliquer pourquoi ce montage permet d'amplifier la tension $U_{capteur}$ sans perturber sa mesure.

Q54. Le raccordement du capteur vers le conditionneur de signal est fait à l'aide de conducteur en cuivre d'un diamètre de 3 mm et d'une longueur de 2 m. Pourquoi avoir choisi un diamètre aussi important ?

Donnée : résistivité du cuivre : $\rho = 0{,}0178\ \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$.

Pour régler la charge de contre-réaction, on fait varier la longueur des ressorts. Cette variation est obtenue à l'aide d'un mécanisme de précontrainte entraîné par un moteur à courant continu (**figure 16**).

III.5 - Étude de la motorisation du mécanisme de précontrainte

Le moteur utilisé est un moteur MAXON référence RE40 - 148877.

III.5.1 - Commande du moteur

Objectif : déterminer comment limiter l'ondulation du courant.

L'alimentation du moteur est faite en utilisant un pont en H. Pour contrôler la vitesse de rotation du moteur, on utilise une modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Dans le cas où le frottement n'est pas négligé, le moteur peut être modélisé par une fonction de transfert du second ordre. L'entrée correspond à la tension U appliquée aux bornes du moteur et la sortie correspond à la vitesse de rotation Ω du rotor. Ω est exprimée en $tr \cdot mn^{-1}$.
En tenant compte de la constante de temps mécanique τ_m et de la constante de temps électrique τ_e , on obtient une fonction de transfert $T(p)$ de la forme :

$$\mathrm{T(p)} = \frac{\Omega(\mathrm{p})}{\mathrm{U(p)}} = \frac{\mathrm{Hmo}}{(1+\tau_\mathrm{m}\mathrm{p})(1+\tau_\mathrm{e}\mathrm{p})}$$

avec : $\tau_\mathrm{e} = \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{R}}$: constante de temps électrique du moteur ;

τ_m : constante de temps mécanique du moteur ;

$\mathrm{Hmo} = 158\ \mathrm{rpm} \cdot \mathrm{V}^{-1} = 158\ \mathrm{tr} \cdot \mathrm{mn}^{-1} \cdot \mathrm{V}^{-1}$.

Q55. À l'aide de **l'annexe 10**, déterminer les valeurs numériques de τ_e et τ_m . Tracer le diagramme asymptotique de Bode du gain de cette fonction de transfert sur le **DR**.

À quel type de filtre peut-on assimiler le moteur ?

Q56. Justifier alors le fait que le moteur puisse être alimenté par une tension modulée en largeur d'impulsion. On précisera l'intérêt d'une telle modulation.

Q57. La tension en sortie du hacheur est une tension rectangulaire de fréquence f_h. Comment doit être choisie la période $T_h = \frac{1}{f_h}$ par rapport à la constante de temps électrique τ_e ?

Le hacheur utilisé est à quatre quadrants. Sa structure est donnée à la **figure 26**.

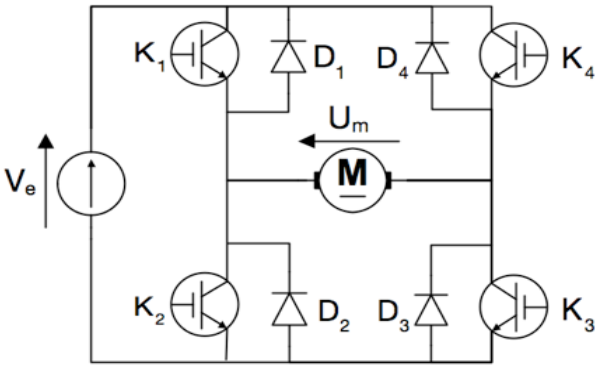


Figure 26 - Structure du hacheur utilisé

La stratégie utilisée pour piloter le hacheur est une commande bipolaire.

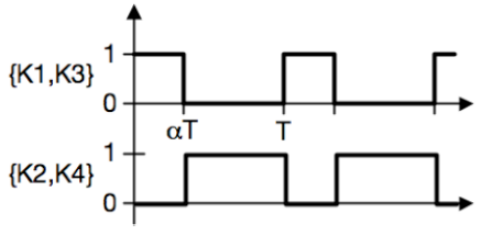


Figure 27 - Commande bipolaire

Q58. Établir l'expression de la valeur moyenne de la tension U_m, notée U_{moy} , aux bornes du moteur en fonction de la tension de la source continue V_e et du rapport cyclique α.

On rappelle que dans le cas d'un moteur à courant continu :

- les bobinages de l'induit sont caractérisés par leur résistance R et leur inductance L ;
- le comportement de l'induit est lié à la tension aux bornes du moteur U et génère la fcém E induite par la loi de Lenz.

Q59. Donner le schéma électrique équivalent du moteur à courant continu à aimant permanent.

Pour les raisons technologiques suivantes :

- dimensionnement des interrupteurs statiques qui composent le pont en H ;
- limitation de l'échauffement du moteur (échauffement dû aux harmoniques de courant) ;

il est nécessaire de s'intéresser aux variations du courant moteur.

La forme du courant qui circule dans le moteur est représentée à la **figure 28**.

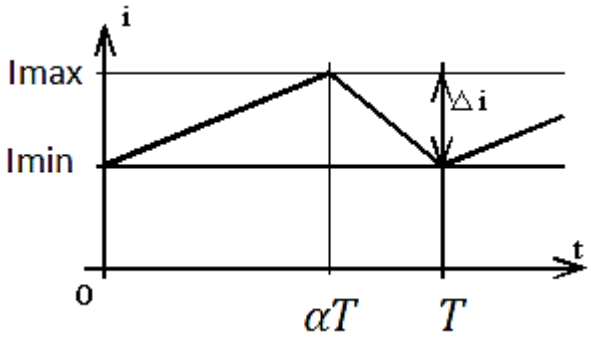


Figure 28 - Courant moteur

Q60. À partir du schéma équivalent de la question **Q59** dans lequel on néglige la résistance d'induit, (chute de tension aux bornes de la résistance de l'induit négligeable devant toutes les autres), établir l'expression du courant d'induit i(t).

En utilisant la propriété de continuité du courant en αT, déterminer l'ondulation ΔI = Imax-Imin en fonction de Ve, α, L et de fh.

Sur quels paramètres peut-on agir pour diminuer l'ondulation de courant ?
La **figure 27** détaille les états (saturés ou bloqués) des composants qui constituent le hacheur de la **figure 26**. En réalité, les composants ne sont pas parfaits et la commutation des interrupteurs n'est pas instantanée. Ainsi, pendant un certain laps de temps, tous les composants sont passants.

Q61. Quel est alors le risque électrique de ce mode de pilotage de commande bipolaire ?

Les caractéristiques du moteur données par son constructeur correspondent à une utilisation continue permettant d'atteindre l'équilibre thermique. Dans le système de décharge corporelle, la charge mécanique est entraînée avec de nombreuses accélérations et de nombreux freinages. Le moteur aura tendance à surchauffer et ses caractéristiques peuvent être modifiées.

III.5.2 - Vérifications expérimentales des caractéristiques du moteur

Objectif : énoncer les procédés expérimentaux permettant de vérifier les caractéristiques électriques et mécaniques du moteur lors d'une opération de maintenance.

On dispose d'une source de tension réglable, d'un oscilloscope, d'un voltmètre, d'un ampèremètre, d'une sonde de courant et d'un capteur de vitesse de rotation.

Q62. Proposer une démarche avec plusieurs protocoles expérimentaux permettant de déterminer :

- la résistance R de l'induit ;
- l'inductance de l'induit L ;
- le coefficient de la force contre électromotrice.

On rappelle que le couple de frottement visqueux $C_F(t) = f\,\omega(t)$.

Pour déterminer la valeur du coefficient de frottement visqueux f, on réalise un essai au ralentissement qui permet de relever la courbe n(t) (vitesse de rotation du moteur en $\mathrm{tr \cdot s^{-1}}$ en fonction du temps).
L'essai est fait dans les conditions suivantes :

- le moteur fonctionne à vide et tourne à sa vitesse nominale n_0 à l'instant t_0 ;
- à l'instant t_0, pris comme origine des temps, on coupe l'alimentation du moteur.

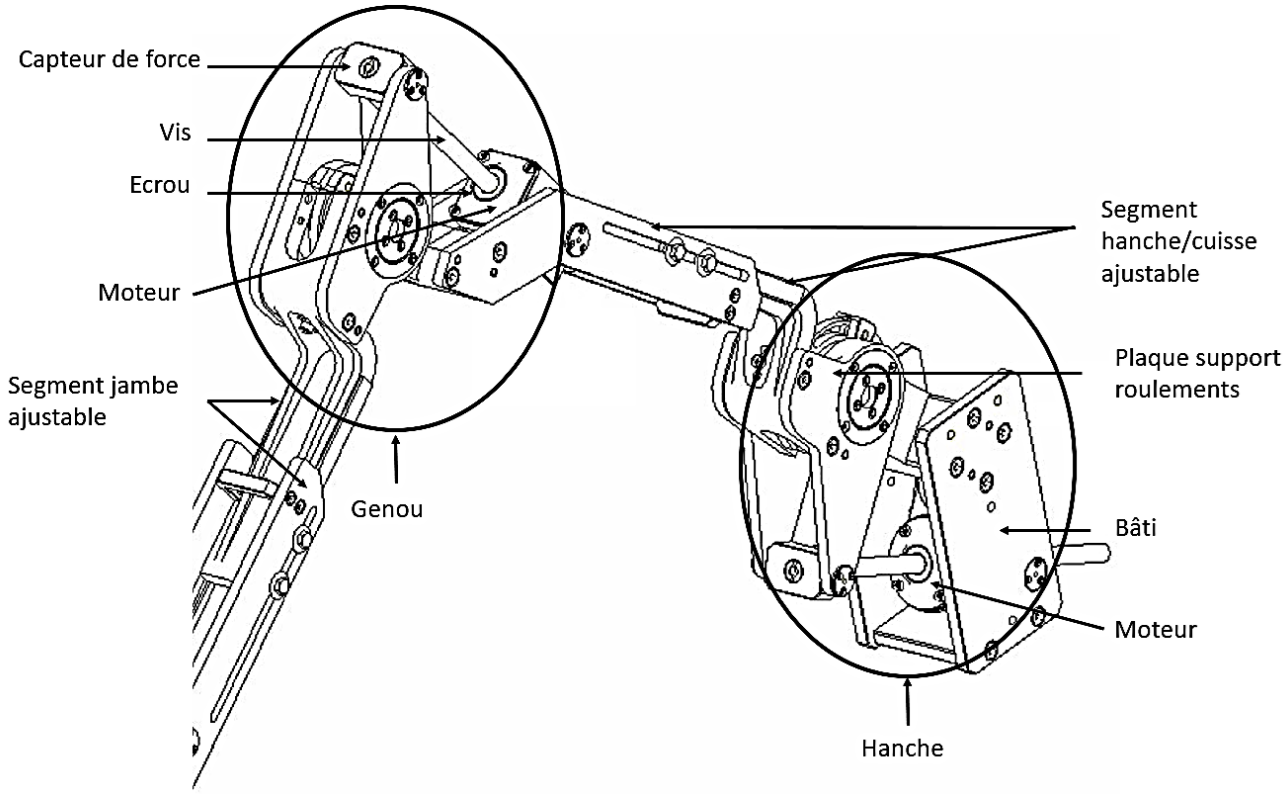
On considère que le couple de freinage C_f est constant lors de l'essai de ralentissement et que le moment d'inertie J_{mot} du moteur est connu.

Q63. Déterminer l'équation différentielle régissant l'évolution de la vitesse de rotation angulaire $\omega(t)$ (exprimée en $rad \cdot s^{-1}$). Donner l'expression de la constante de temps mécanique τ_m .

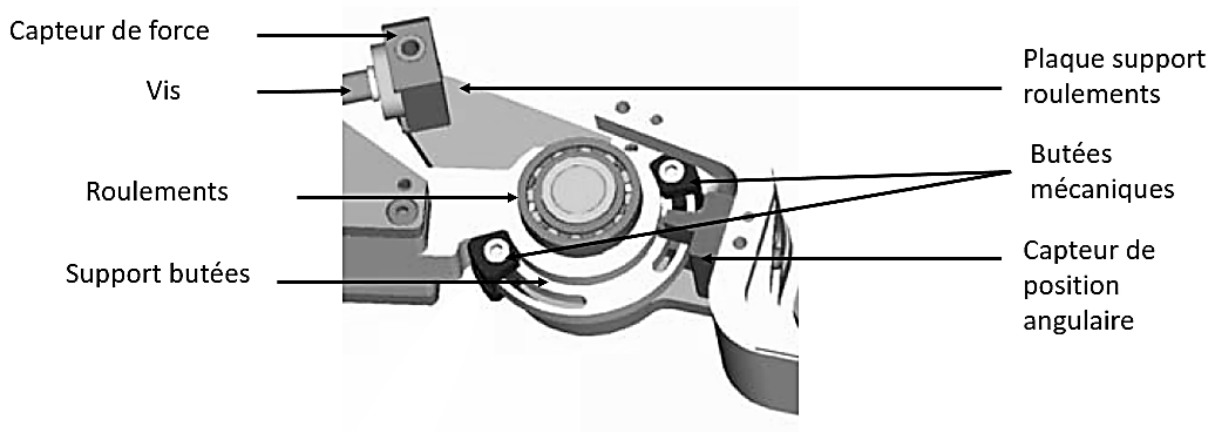
Q64. Tracer sur la copie l'allure de la courbe de ralentissement. Comment peut-on déterminer le coefficient de frottement visqueux ?

ANNEXE 1

Architecture générale de l'exosquelette

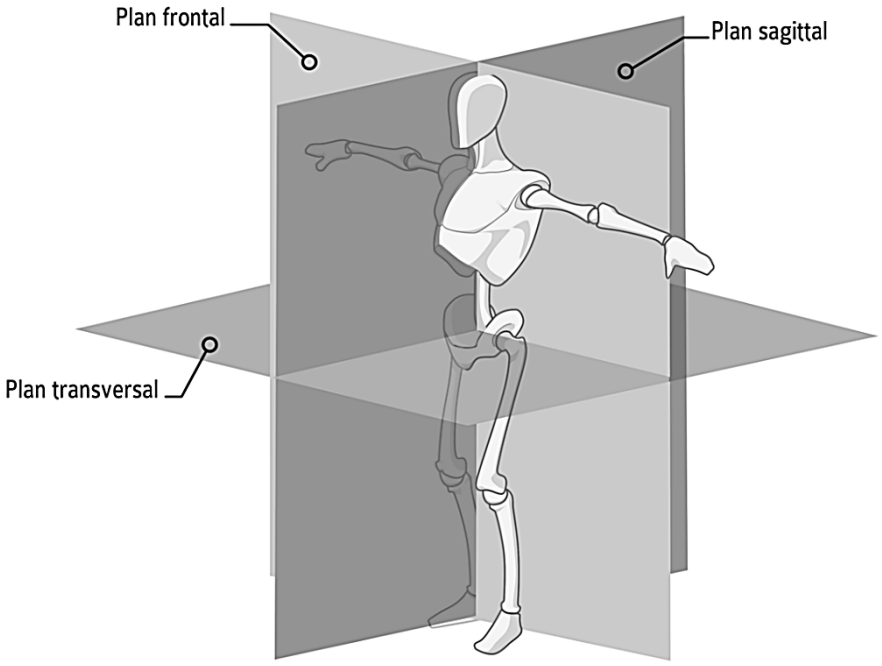


Composants internes de l'articulation de la hanche

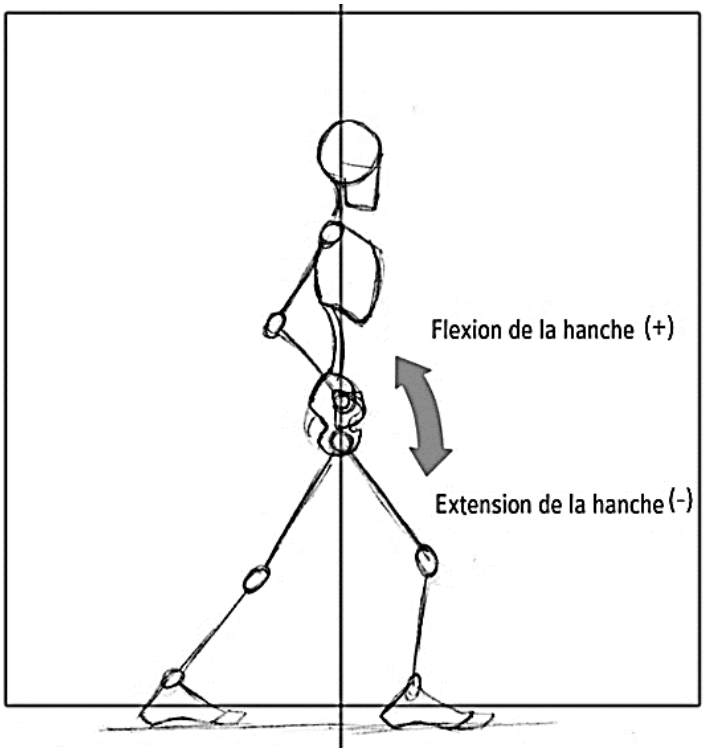


ANNEXE 2

Plans anatomiques



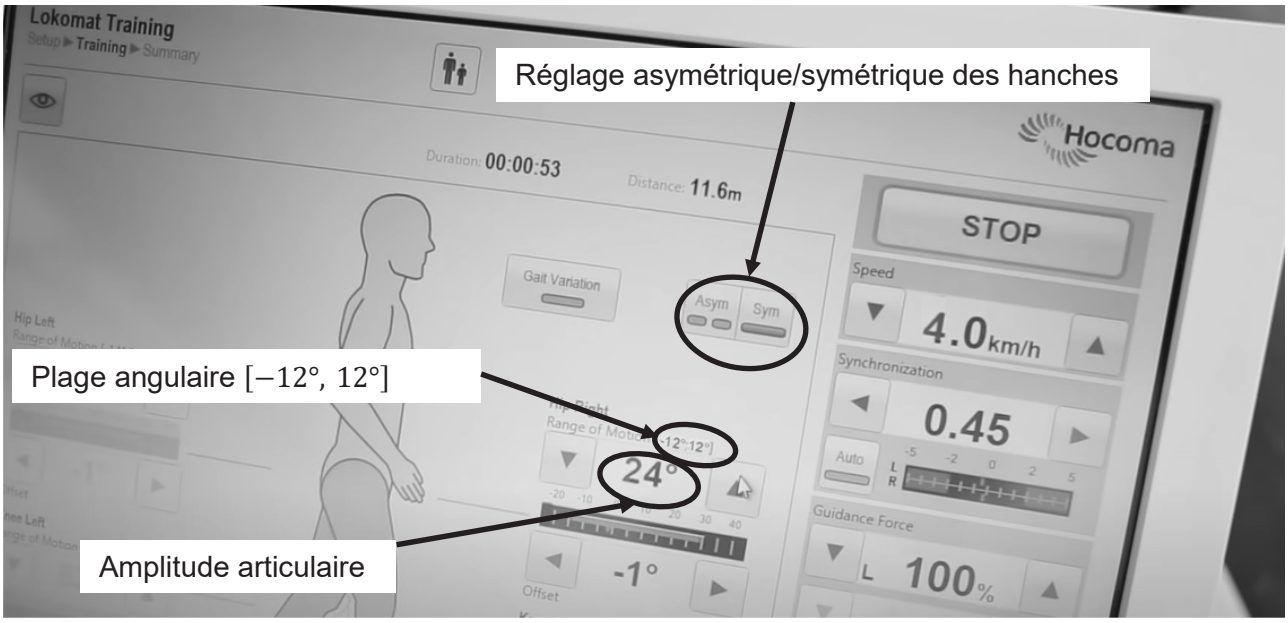
Définition des mouvements de la hanche



Convention des termes liés aux angles articulaires de la hanche
(+) : angle positif, (−) : angle négatif

ANNEXE 3

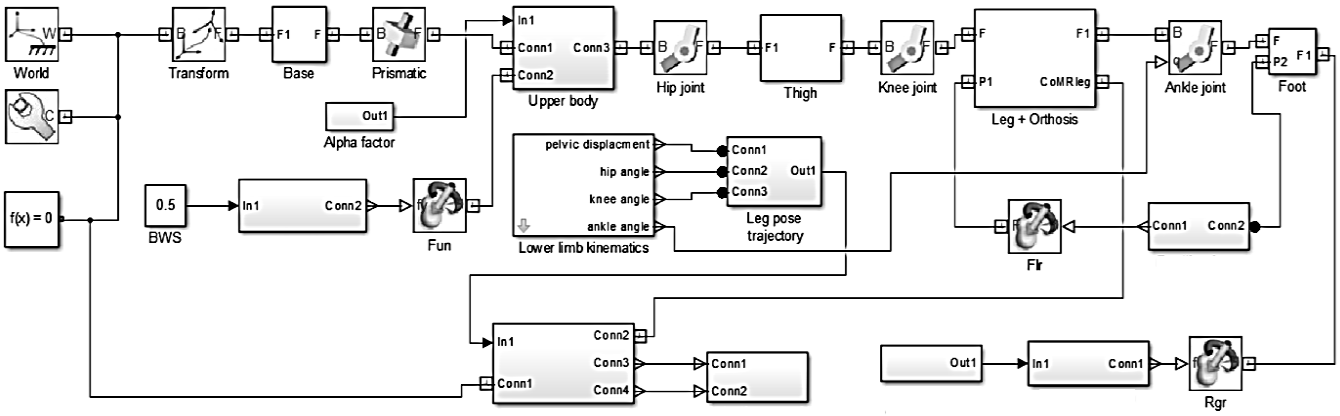
Logiciel de configuration du Lokomat®



Le logiciel de configuration permet au praticien de régler une série de paramètres.
Il est entre autres possible de :

- régler simultanément les hanches : comme ici, il suffit d'activer le mode symétrique ;
- fixer :
    - l'amplitude articulaire de la hanche ;
    - les valeurs extrêmes de la plage angulaire ;
    - la durée de la séance ;
    - la distance à parcourir ;
    - la vitesse de déplacement.

Modèle Simscape Multibody simplifié de l'exosquelette

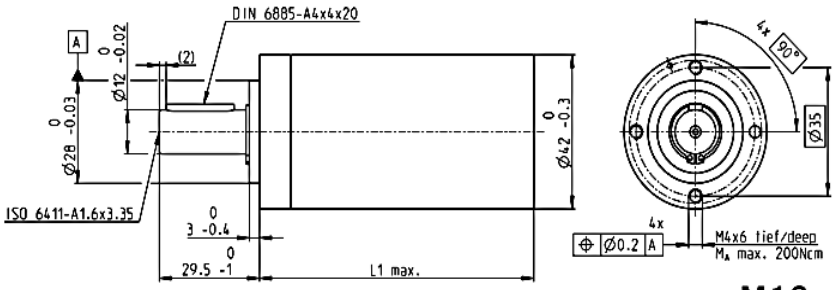


ANNEXE 4

Documentation technique MAXON

Réducteur planétaire GP 42 C ∅42 mm, 3.0–15.0 Nm

Version céramique



M 1:2

Données techniques				
Réducteur planétaire				taille droite
Arbre de sortie				acier inoxydable
Palier de sortie				roulements à billes préchargés
Jeu radial à 12 mm du flasque				max. 0.06 mm
Jeu axial sous charge axiale	< 5 N			0 mm
	> 5 N			max. 0.3 mm
Charge axiale max.				150 N
Force de chassage max.				300 N
Sens de rotation entrée/sortie				=
Vitesse d'entrée permanente max.				8000 tr/min
Plage de température conseillée				-40...+100°C
Nombre d'étages	1	2	3	4
Charge radiale max. à 12 mm du flasque	120 N	240 N	360 N	360 N

gear

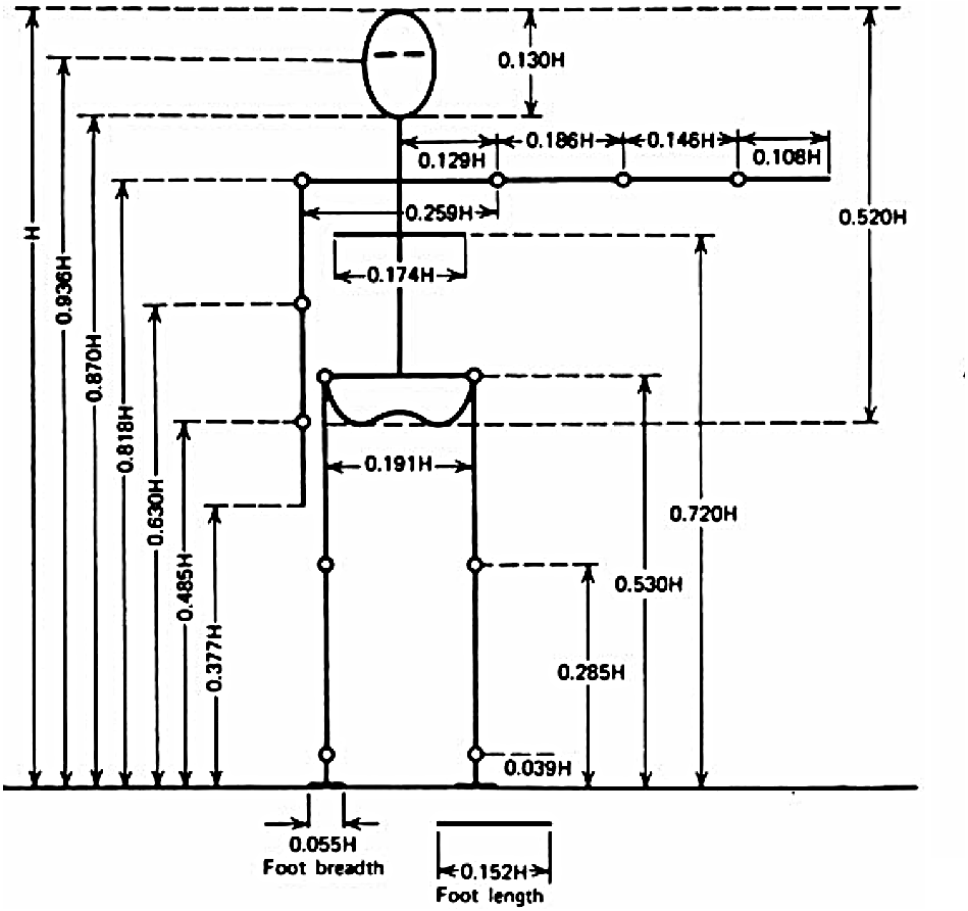
Programme Stock
Programme Standard
Programme Spécial (sur demande)

	Données sur les réducteurs		Numéros d'article									
			203113	203115	203119	203120	203124	203129	203128	203133	203137	203141
1	Rapport de réduction		3.5:1	12:1	26:1	43:1	81:1	156:1	150:1	285:1	441:1	756:1
2	Rapport de réduction exact		7/2	49/4	26	343/8	2197/27	156	2401/16	15379/54	441	756
10	Moment d'inertie	gcm²	14	15	9.1	15	9.4	9.1	15	15	14	14
3	Diamètre max. de l'arbre du moteur	mm	10	10	8	10	8	8	10	10	10	10
	Numéros d'article		**203114**	**203116**	260552*	203121	203125	260553*	203130	203134	203138	203142
1	Rapport de réduction		4.3:1	15:1	36:1	53:1	91:1	216:1	186:1	319:1	488:1	936:1
2	Rapport de réduction exact		13/3	91/6	36/1	637/12	91	216/1	4459/24	637/2	4394/9	936
10	Moment d'inertie	gcm²	9.1	15	5.0	15	15	5.0	15	15	9.4	9.1
3	Diamètre max. de l'arbre du moteur	mm	8	10	4	10	10	4	10	10	8	8
	Numéros d'article		260551*	203117		203122	203126		203131	203135	203139	260554*
1	Rapport de réduction		6:1	19:1		66:1	113:1		230:1	353:1	546:1	1296:1
2	Rapport de réduction exact		6/1	169/9		1183/18	338/3		8281/36	28561/81	546	1296/1
10	Moment d'inertie	gcm²	4.9	9.4		15	9.4		15	9.4	14	5.0
3	Diamètre max. de l'arbre du moteur	mm	4	8		10	8		10	8	10	4
	Numéros d'article			203118		203123	203127		203132	203136	203140	
1	Rapport de réduction			21:1		74:1	126:1		257:1	394:1	676:1	
2	Rapport de réduction exact			21		147/2	126		1029/4	1183/3	676	
10	Moment d'inertie	gcm²		14		15	14		15	15	9.1	
3	Diamètre max. de l'arbre du moteur	mm		10		10	10		10	10	8	
4	Nombre d'étages		1	2	2	3	3	3	4	4	4	4
5	Couple permanent max.	Nm	3.0	7.5	7.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
6	Couple intermittent max. admissible	Nm	4.5	11.3	11.3	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
7	Rendement max.	%	90	81	81	72	72	72	64	64	64	64
8	Poids	g	260	360	360	460	460	460	560	560	560	560
9	Jeu moyen à vide	°	0.6	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
11	Longueur du réducteur L1**	mm	41.0	55.5	55.5	70.0	70.0	70.0	84.5	84.5	84.5	84.5

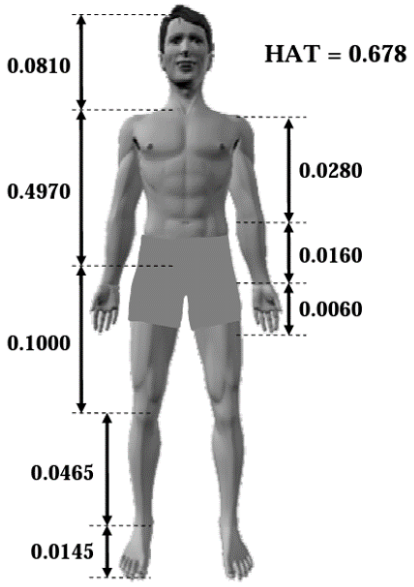
*pas de combination avec Moteur EC 45 (150/250 W) et EC-I 40
**pour EC 45 flat est L1 -3.6 mm

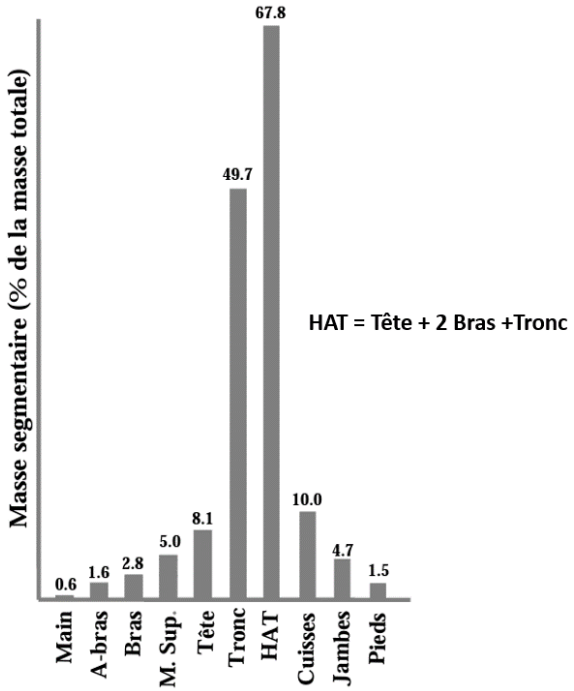
ANNEXE 5

Longueurs segmentaires normalisées



Masses segmentaires normalisées

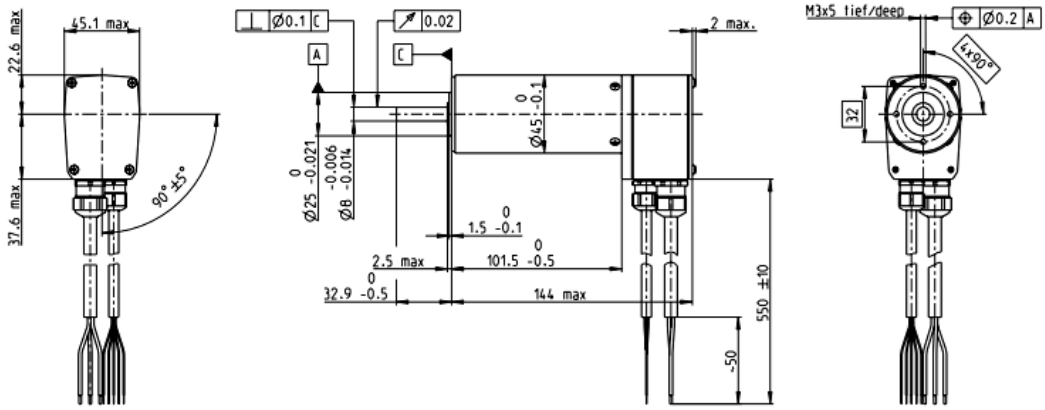




ANNEXE 6

Documentation technique MAXON

EC 45 ∅45 mm, brushless, 250 watt



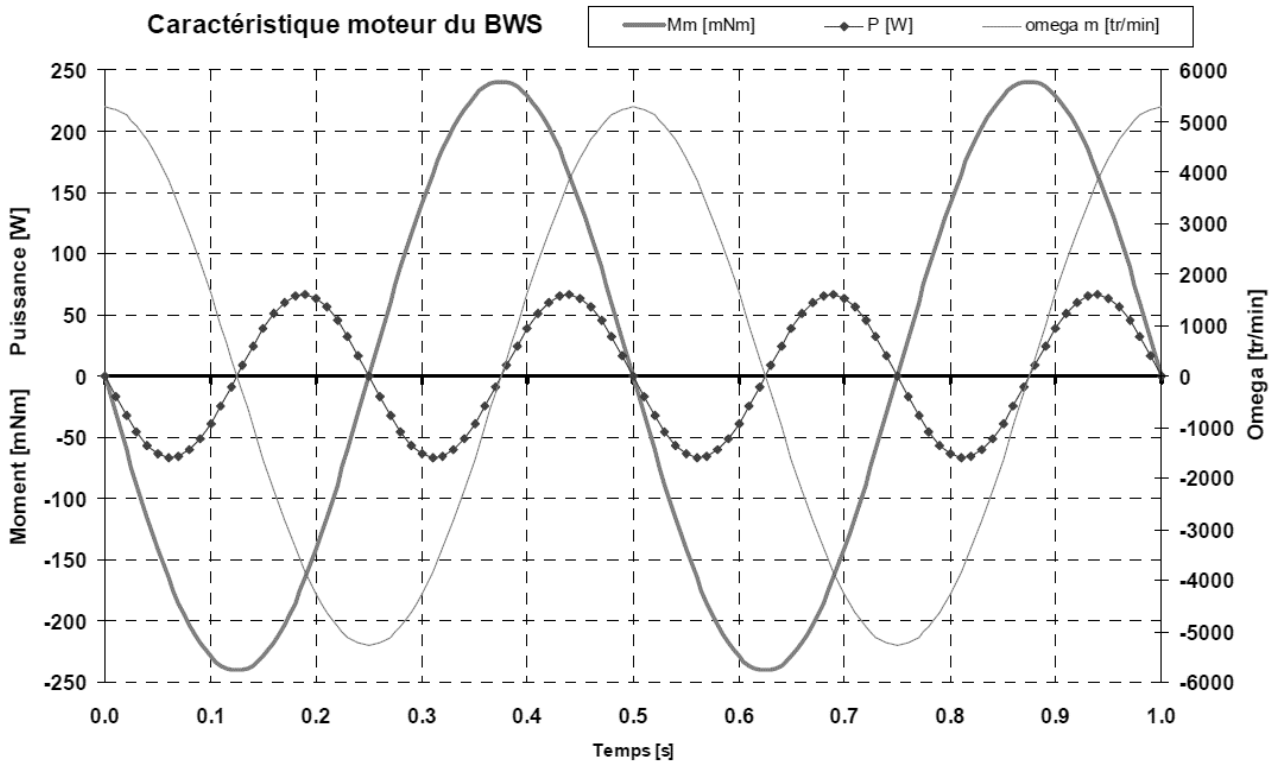
M 1:4

Stock program
Standard program
Special program (on request)

Motor Data		Part Numbers							
		136210	136207	136211	136208	136212	136209		
	Values at nominal voltage								
1	Nominal voltage	V	24	24	36	36	48	48		
2	No load speed	rpm	8670	5000	10400	6010	10700	6160		
3	No load current	mA	897	341	834	312	656	244		
4	Nominal speed	rpm	7970	4300	9730	5320	10000	5490		
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	311	331	312	341	316	347		
6	Nominal current (max. continuous current)	A	12.5	7.51	10.2	6.21	7.94	4.86		
7	Stall torque	mNm	4400	2540	5750	3320	6110	3530		
8	Stall current	A	167	55.8	175	58.3	143	47.7		
9	Max. efficiency	%	86	85	87	86	87	87		
	Characteristics									
10	Terminal resistance phase to phase	Ω	0.143	0.43	0.206	0.617	0.336	1.01		
11	Terminal inductance phase to phase	mH	0.0565	0.17	0.0883	0.265	0.149	0.448		
12	Torque constant	mNm/A	26.3	45.5	32.8	56.9	42.7	73.9		
13	Speed constant	rpm/V	364	210	291	168	224	129		
14	Speed/torque gradient	rpm/mNm	1.98	1.98	1.82	1.82	1.76	1.76		
15	Mechanical time constant	ms	4.34	4.34	3.99	3.99	3.85	3.85		
16	Rotor inertia	gcm²	209	209	209	209	209	209		

ANNEXE 7

Caractéristiques du moteur de contrôle du BWS



ANNEXE 8

Caractéristiques techniques des capteurs CO Y2 SAUTER

1 Short description

- Miniature button stainless steel IP65 (acc. to EN 60529) load cell
- Force measuring compatible
- RoHS conform
- Suitable for testing facilities and test stands
- Tension and compression measuring
- High precission (comprehensive Error 0,3%F.S.)

2 Available models

Capacity	Model
10kg (≈100N)	CO 10-Y2
20kg (≈200N)	CO 20-Y2
50kg (≈500N)	CO 50-Y2
100kg (≈1kN)	CO 100-Y2
200kg (≈2kN)	CO 200-Y2
500kg (≈5kN)	CO 500-Y2
1000kg (≈10kN)	CO 1000-Y2
2000kg (≈20kN)	CO 2000-Y2

3 Introduction

Please pay attention to the notes of the operating manual: read these operating manual carefully before commissioning, even if you already have experience with SAUTER measuring cells.
After receiving the measuring cell, it should be checked in advance whether no transport damage has occurred, whether the outer packaging or other parts or even the article itself has been damaged. If any damage is evident, please inform SAUTER GmbH immediately.

4 Warning notes

Observe the national accident prevention regulations.
Not correct executed use of the measuring cell can lead to serious injuries, death, material damage and personal injuries. Use only by trained and experienced people.
Never load more than the max. capacity to a measuring cell. Overloaded measuring cells no longer have the required accuracy. Overloaded or deformed measuring cells are no longer allowed to use and must be changed quickly.
Never step under suspended loads.
Always fasten overload- or break security to your construction.
Pay attention to the allowed static and dynamic loads of the used equipment.
Let the measuring cells calibrate at regular intervals.
Only load the measuring cell in its specified load direction. Avoid lateral forces.
Control the measuring cells to deformations and cracks.
Measuring cells with 4-Conductor cable will change their characteristic value when shortened or extended the cable length.

ANNEXE 9

Documentation technique module_ME520

ME520

Convertisseurs de signaux et conditionneurs de capteurs analogiques format rail DIN

APPLICATIONS

- Adaptation de tout type de signal analogique issu de capteurs pour le rendre compatible avec un système d'acquisition ou un automate programmable.
- Mesures de grandeurs électriques et grandeurs physiques (force, couple, déplacement, accélération, pression...), sur banc d'essai ou en contrôle de process industriel.



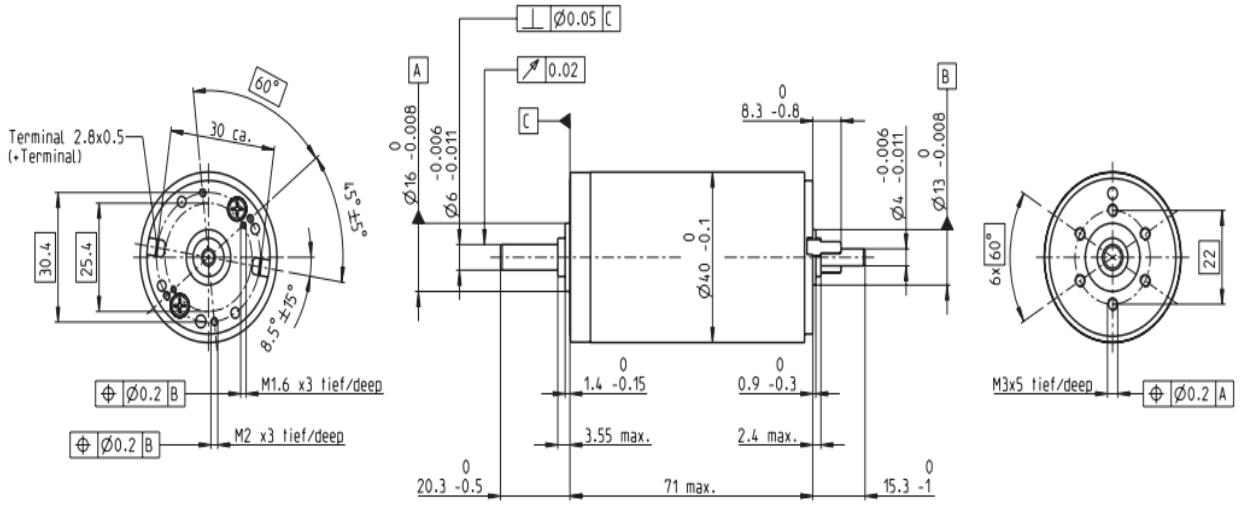
DESCRIPTIONS

- Le module de mesure ME520 monovoie propose des électroniques à sorties analogiques très complètes permettant la mesure de tous types de capteurs ou signaux, le conditionnement de capteurs ainsi que la conversion de nombreux signaux. Le module ME520 est d'une utilisation très simple, son réglage se fait par 3 boutons en face avant :
- un potentiomètre pour le gain un potentiomètre pour le zéro un bouton poussoir pour la calibration
- Tous les produits sont étalonnés dans nos laboratoires. Une grande variété d'options est disponible : isolation de l'alimentation ou autres types de capteurs adaptables déclinés en 14 versions.

ANNEXE 10

Documentation technique MAXON

RE 40 ∅40 mm, Graphite Brushes, 150 Watt



M 1:2

Stock program
Standard program
Special program (on request)

Motor Data		Article Numbers									
		148866	148867	148877	218008	218009	218010	218011	218012	218013	218014
	Values at nominal voltage										
1	Nominal voltage	V	12	24	48	48	48	48	48	48	48	48
2	No load speed	rpm	6920	7580	7590	6420	5560	3330	2690	2130	1720	1420
3	No load current	mA	241	137	68.6	53.6	43.7	21.9	16.6	12.5	9.66	7.76
4	Nominal speed	rpm	6380	6940	7000	5810	4930	2710	2060	1510	1080	781
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	94.9	177	187	186	180	189	190	192	192	190
6	Nominal current (max. continuous current)	A	6	6	3.17	2.66	2.23	1.4	1.13	0.909	0.73	0.6
7	Stall torque	mNm	1720	2420	2560	2040	1620	1020	814	655	523	424
8	Starting current	A	105	80.2	42.4	28.6	19.7	7.43	4.79	3.06	1.97	1.32
9	Max. efficiency	%	87	91	92	91	91	89	89	88	87	85
	Characteristics										
10	Terminal resistance	Ω	0.115	0.299	1.13	1.68	2.44	6.46	10	15.7	24.4	36.3
11	Terminal inductance	mH	0.0245	0.0823	0.329	0.46	0.612	1.7	2.62	4.14	6.4	9.31
12	Torque constant	mNm/A	16.4	30.2	60.3	71.3	82.2	137	170	214	266	321
13	Speed constant	rpm/V	581	317	158	134	116	69.7	56.2	44.7	35.9	29.8
14	Speed / torque gradient	rpm/mNm	4.05	3.14	2.97	3.16	3.45	3.29	3.31	3.27	3.29	3.37
15	Mechanical time constant	ms	5.89	4.67	4.28	4.2	4.19	4.16	4.15	4.15	4.15	4.16
16	Rotor inertia	gcm²	139	142	137	127	116	121	120	121	120	118

FIN

IMPRIMERIE NATIONALE – 23 1151 – D'après documents fournis

CONCOURS COMMUN

Numéro d'inscription

Numéro de table

Né(e) le

Nom :

Prénom :

Emplacement QR Code

Filière : TSI

Session : 2023

Épreuve de : SCIENCES INSDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Consignes

- *Remplir soigneusement l'en-tête de chaque feuille avant de commencer à composer*
- *Rédiger avec un stylo non effaçable bleu ou noir*
- *Ne rien écrire dans les marges (gauche et droite)*
- *Numéroter chaque page (cadre en bas à droite)*
- *Placer les feuilles A3 ouvertes, dans le même sens et dans l'ordre*

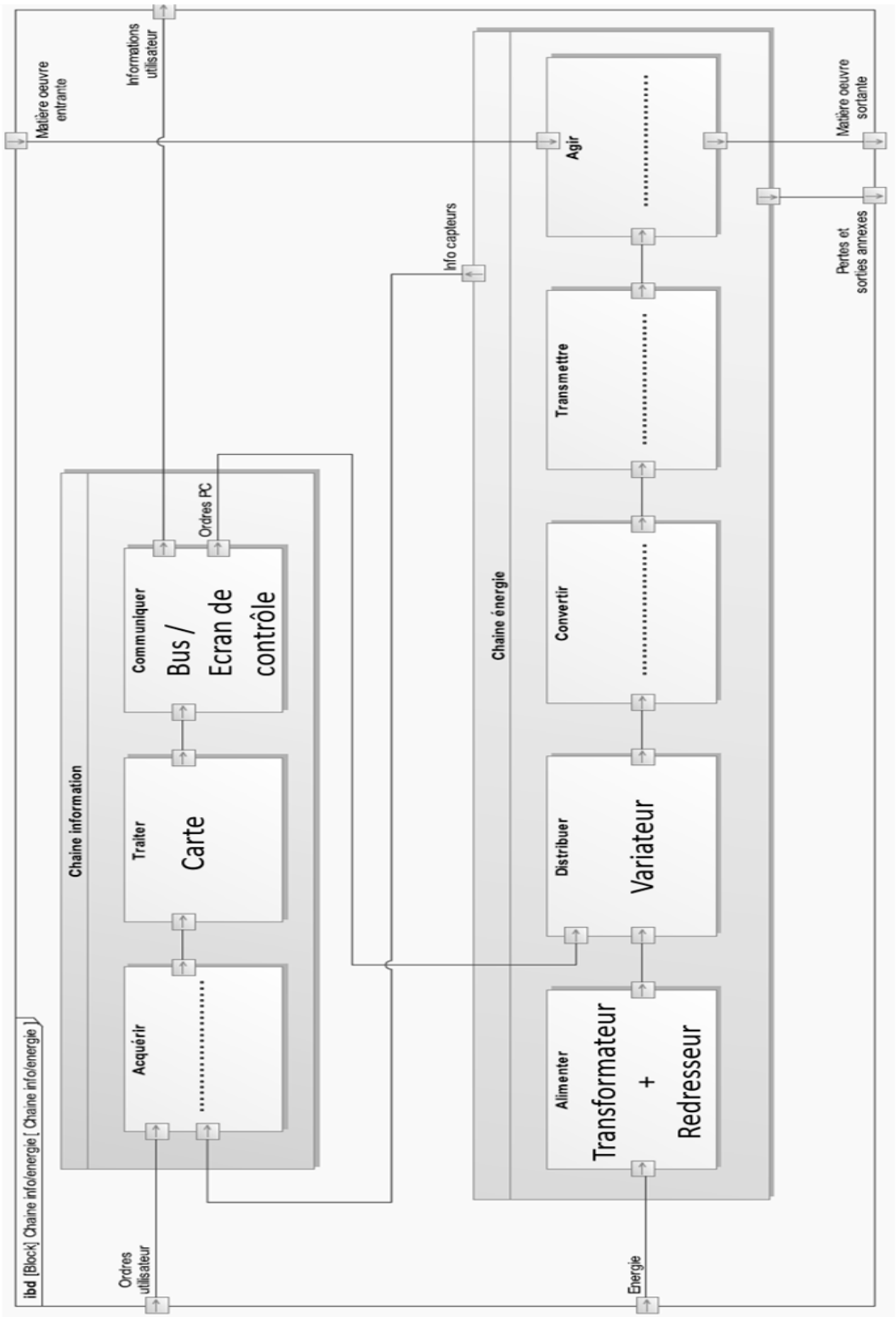
TSI7SI

DOCUMENT RÉPONSE

Ce Document Réponse doit être rendu dans son intégralité avec la copie.

NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

Q1. Compléter la chaîne fonctionnelle de l'organisation structurelle de la motorisation de la hanche.



Q7. Indiquer les phases de flexion et d'extension de la hanche.

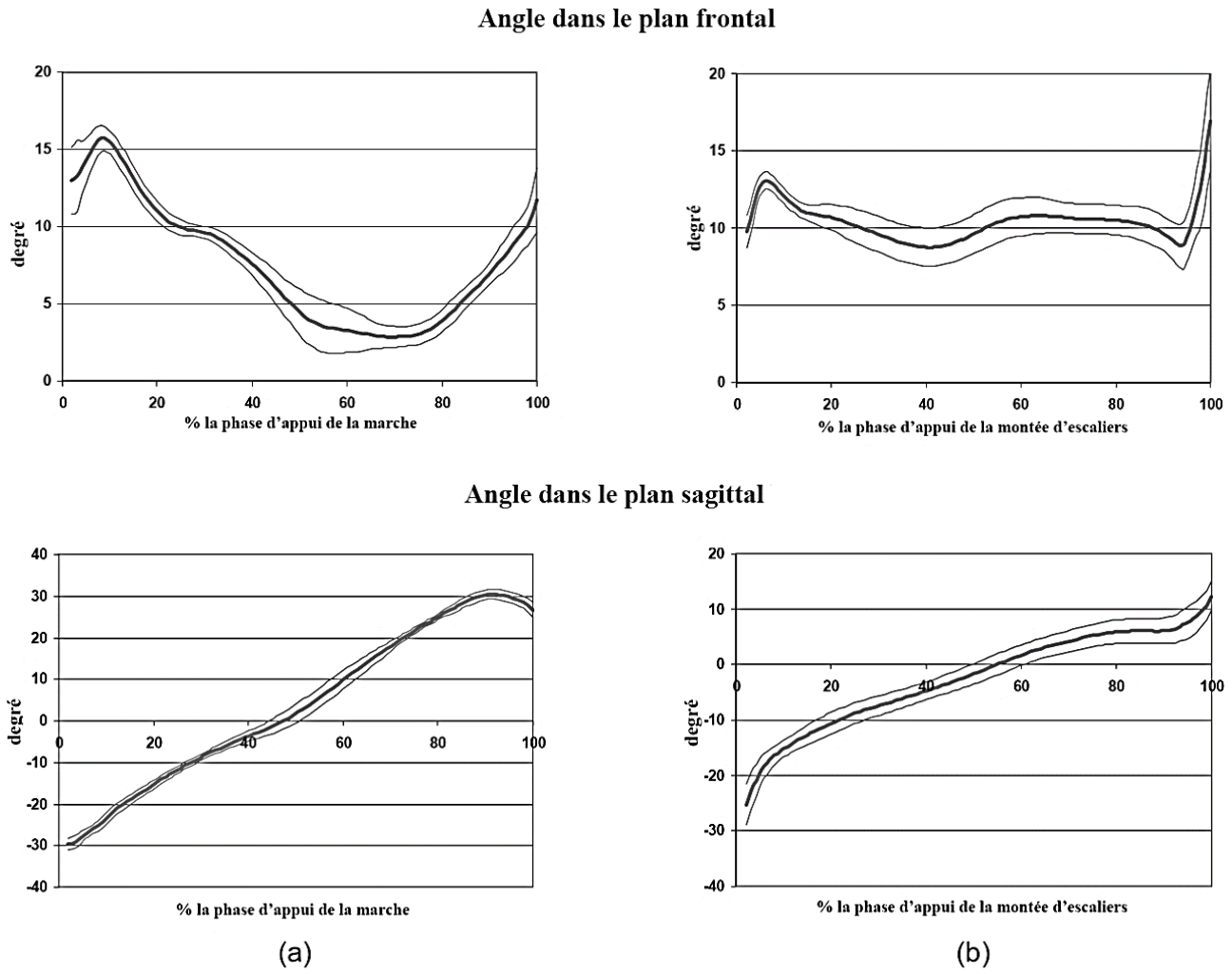
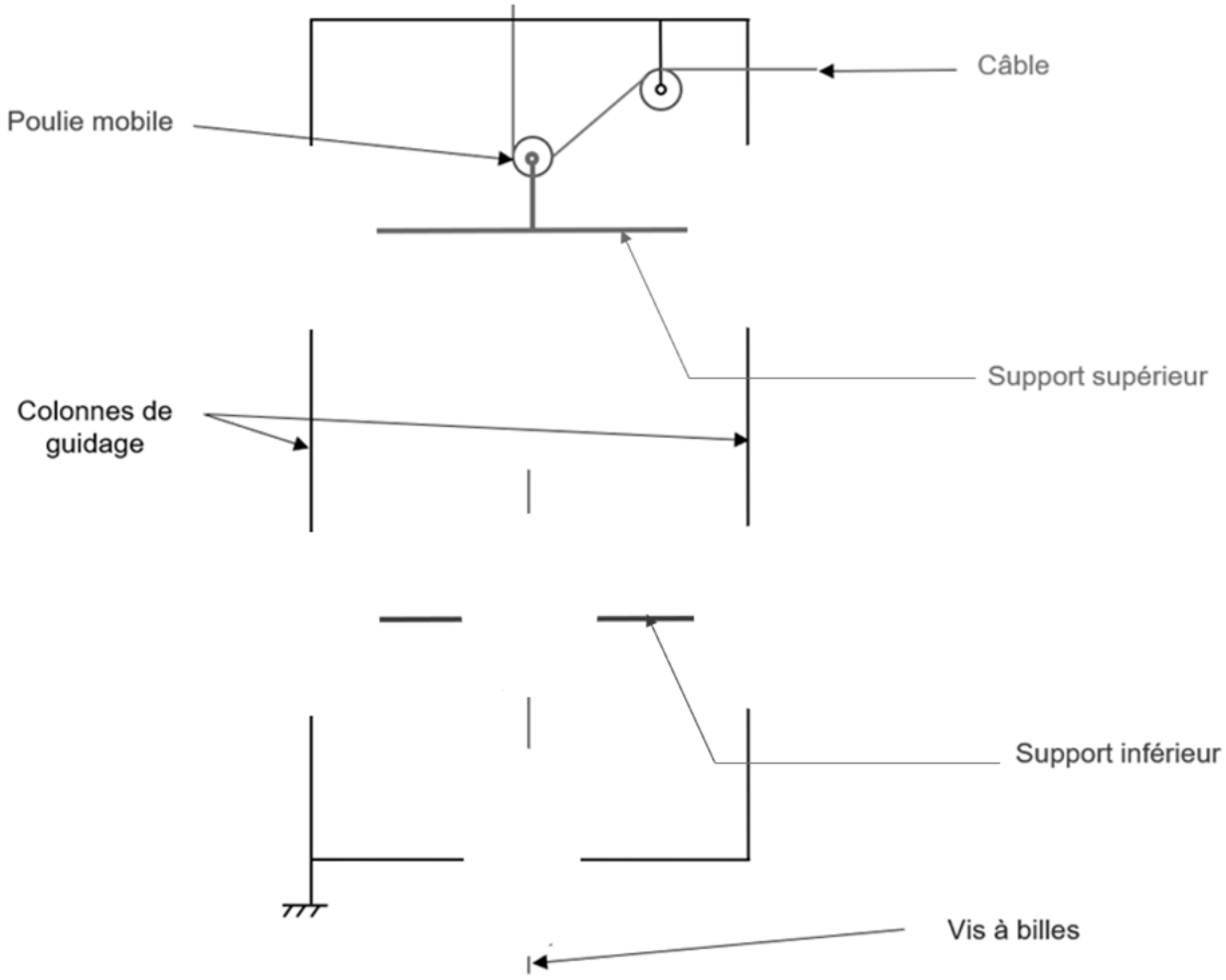
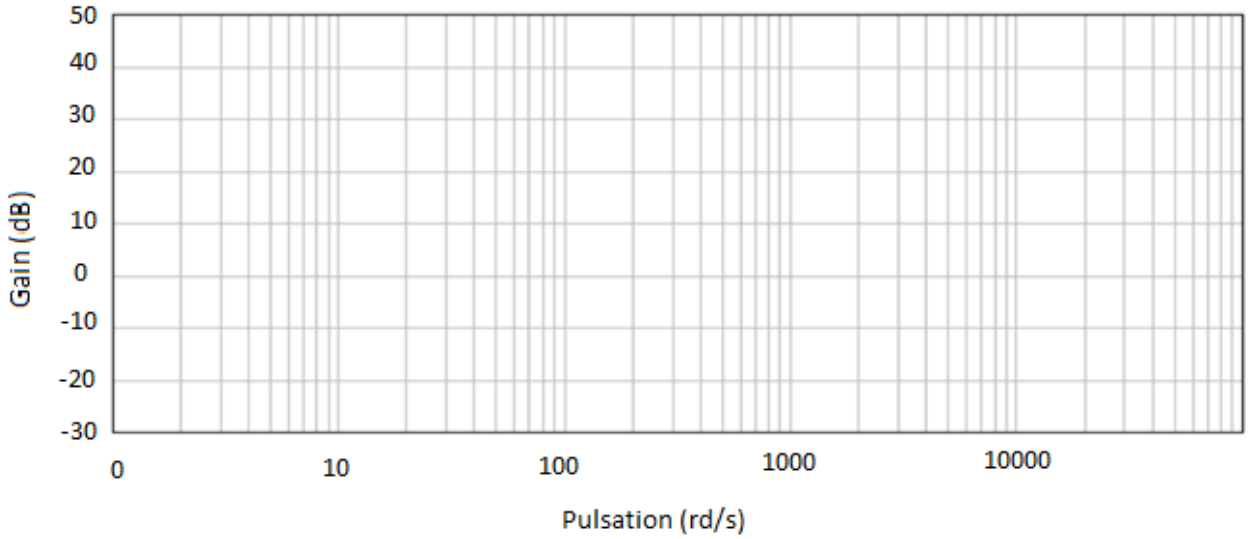


Figure 9 - Valeurs articulaires de la hanche : valeurs moyennes (trait gras) et écarts-types (trait fin). Les angles frontal et sagittal sont présentés pour le sujet sain au cours de la phase d'appui de la marche **(a)** et la montée d'escaliers (**b)**

Q28. À partir de la **figure 16,** compléter le schéma cinématique du système interne constituant le mécanisme de décharge corporelle.



Q55. Tracer le diagramme asymptotique de Bode du gain de la fonction de transfert.



Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de TSI 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

- Cinématique des mécanismes : composition des mouvements, contact ponctuel, lois entrée-sortie et fermetures
- 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
- Transmetteurs de puissance et trains d'engrenages
- Énergétique : puissances, théorème de l'énergie cinétique, rendement
- Modélisation des liaisons, graphe des liaisons et schéma cinématique
- Circuits électriques dans l'ARQS

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/ccinp/tsi