

PROTHESE DE MAIN MYOÉLECTRIQUE¹

L'amputation d'un membre est une intervention chirurgicale lourde qui consiste à enlever tout ou partie d'un membre. Il existe actuellement de nombreuses technologies de prothèse de main, parmi lesquelles les prothèses esthétiques, les prothèses passives et les prothèses myoélectriques. Les prothèses esthétiques sont visuellement proches d'une main réelle mais ont des possibilités fonctionnelles limitées (soutenir des objets, porter un sac...). Les prothèses myoélectriques (figure 1a), qui représentent la dernière génération, fonctionnent grâce aux contractions musculaires du membre amputé restant, suite aux demandes du cortex frontal, qui sont acquises par des électrodes EMG (ElectroMyoGraphe) placées au contact de la peau. Ces électrodes délivrent des signaux électriques à un microprocesseur, qui après traitement, fournissent les ordres de commande à un ou plusieurs actionneurs électromécaniques (figure 1b). Un gant esthétique recouvre l'ensemble de la prothèse.

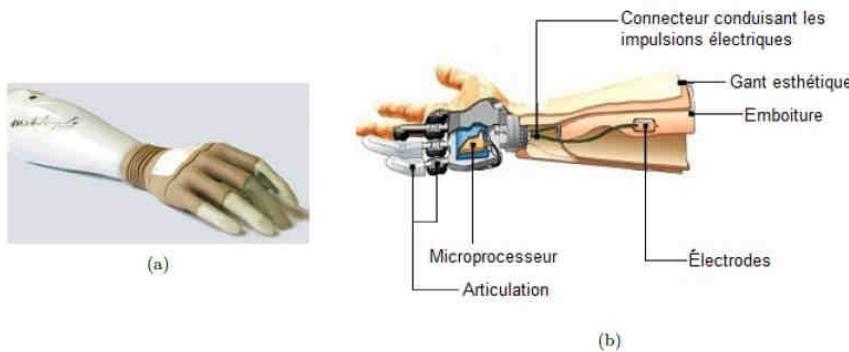


Figure 1 : (a) Photographie d'une prothèse myoélectrique ; (b) Constitution d'une prothèse myoélectrique

Objectif L'objet de l'étude est d'évaluer la capacité de cette prothèse à effectuer des gestes de la vie courante, en particulier saisir un verre à eau sans le casser.

Le tableau 1 regroupe quelques verres de référence devant être saisis par une telle prothèse.

Modèle	Verre 1	Verre 2	Verre 3	Verre 4	Gobelet plastique
Dénomination	V1	V2	V3	V4	G
Contenance	33 cl	32 cl	42 cl	52 cl	20 cl
Diamètre mini	48 mm	61 mm	76 mm	94 mm	42 mm
Masse	175 g	310 g	340 g	200 g	3,3 g

Tableau 1 Paramètres des différents modèles de verre à eau

Les besoins du patient s'expriment en termes d'exigences décrites dans le diagramme de la figure 2.

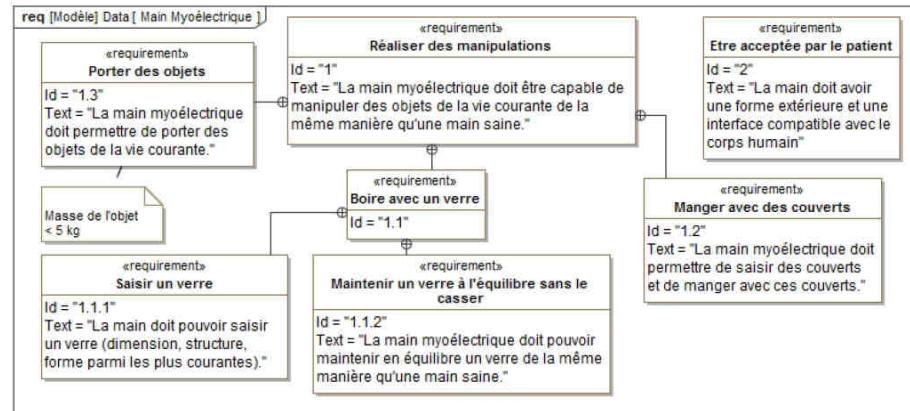


Figure 2 : Diagramme partiel des exigences de la prothèse de main

Le tableau 2 décrit la qualification des exigences relatives à la fonction « Boire avec un verre ».

Id	Exigences	Caractérisation du service rendu	Critères				
			V1	V2	V3	V4	G
1.1.1	Saisir un verre	Très satisfaisant	■	■	■	■	■
		satisfaisant	■	■	■	□	■
		moyen	■	■	□	□	■
		non conforme	Dans les autres cas				
1.1.2	Maintenir un verre à l'équilibre sans le casser	Très satisfaisant	■	■	■	■	■
		satisfaisant	■	■	■	□	□
		non conforme	Dans les autres cas				

Tableau 2 Caractérisation des exigences

I. Comparatif des mouvements des doigts

Objectif Mettre en évidence les différences fonctionnelles entre une prothèse myoélectrique et une main humaine saine.

Les organes du corps humain intervenant dans la commande des doigts humains sont listés ci-dessous :

- l'appareil digestif transforme les aliments en nutriments et assure également leur passage dans le sang ;
- le sang transporte les nutriments à tous les organes, notamment aux muscles ;
- les muscles actionnent le squelette osseux articulé via des tendons ;
- les capteurs sensoriels contenus dans la peau acquièrent des informations sensorielles telles que la température, la pression, la douleur... ;
- la moelle épinière et les nerfs sensitifs transmettent les informations au cortex pariétal supérieur ;
- le cortex pariétal postérieur capte les informations sensorielles ;
- le cortex frontal traite, décide et élabore les ordres de commande ;
- la moelle épinière et les nerfs moteurs transmettent les informations du cortex frontal aux muscles.

Les fonctions remplies par ces organes du corps humain peuvent être rapprochées de celles remplies par les constituants de tout système complexe, à savoir, l'actionneur, le capteur, le conditionneur de

signaux issus de capteurs, l'effecteur, l'interface de traitement, l'interface de puissance, le pré-actionneur, le transmetteur et l'unité de traitement.

- Q1/** Compléter le diagramme chaîne d'énergie-chaine d'information du document réponse DR1 (à la fin du document) en indiquant les organes du corps humain intervenant dans le fonctionnement d'une main humaine.
- Q2/** Parmi les organes listés précédemment, préciser celui qui manque dans la chaîne d'information chez la personne amputée. Indiquer la différence de comportement lors de la prise d'un objet entre une main saine et une main amputée équipée d'une prothèse myoélectrique.

II. La prothèse de main permet-elle de saisir un verre à eau ?

Objectif

Valider l'exigence Id 1.1.1, « Saisir un verre » (voir tableau 2).

La prothèse myoélectrique, comme la main humaine, est composée de 5 doigts munis par 5 actionneurs (un pour chaque doigt). Chacun des doigts est composé de 3 phalanges, à l'exception du pouce constitué seulement de 2 phalanges. Les études étant identiques pour chaque doigt composé de 3 phalanges, seule celle de l'index est mise en œuvre.

La figure 4 décrit sous forme simplifiée les constituants réalisant l'index d'une main gauche prothétique (gant esthétique non représenté). On retrouve notamment la paume (0), la phalange (3) associée à la bielle (4), la phalangine (5) associée à la bielle (6) et la phalangette (7). La bielle (2) permet la mise en mouvement de la phalange (3) à partir du mouvement de l'arbre de l'actionneur (1). En raison d'un encombrement limité, les ingénieurs ont proposé, sur le prototype de la prothèse, que la rotation du pouce soit réalisée dans un plan perpendiculaire à celui de l'index. *La prise d'un objet se fait donc par pincement entre la phalangette (7) et la paume (0). Le pouce de la main prothétique n'enroule donc pas l'objet.* Pour la saisie d'un verre, seule l'action de l'index est donc étudiée. À contrario, une main humaine enroule l'objet avec tous les doigts, pouce compris, et permet de saisir des objets de plus grandes dimensions.

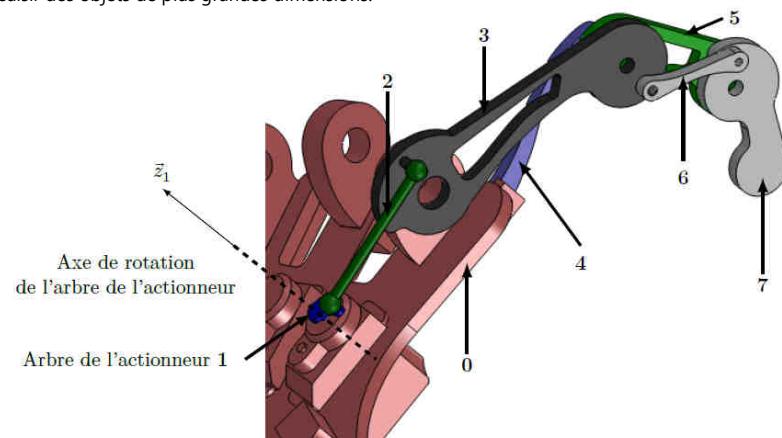


Figure 3 Description des constituants associés aux mouvements de l'index

Le dispositif permettant de mouvoir la phalangette (7) est représenté sur la figure 4 et schématisé sur la figure 5.

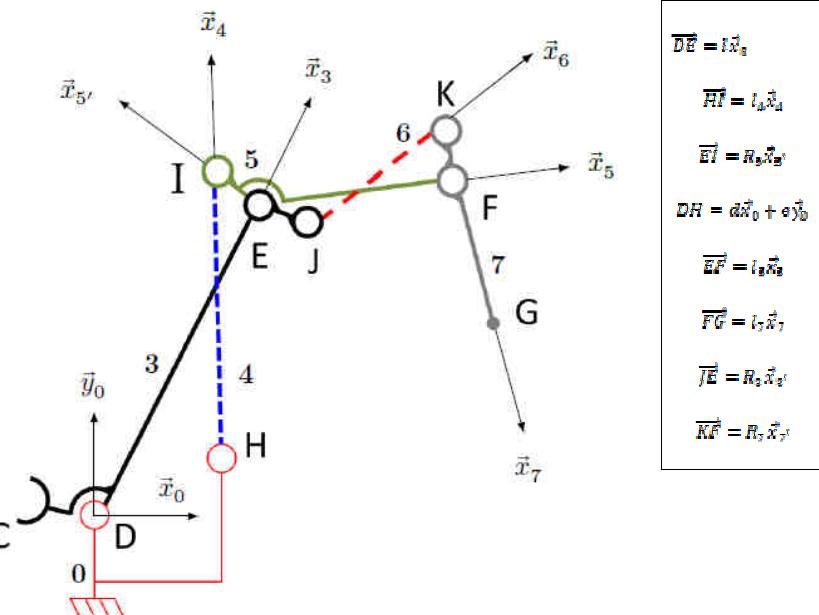


Figure 4 Schéma cinématique du dispositif de mise en mouvement de la phalangette (7) et paramétrage

Le pincement d'un verre à eau par l'index entre la phalangette (7) et la paume (0) est considéré effectué entre les points H et G.

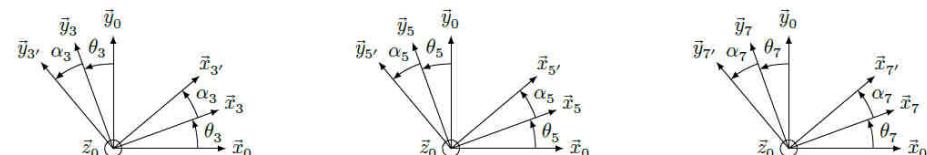
- Q3/** À partir des figures 4 et 5, indiquer le degré de mobilité de la liaison entre les solides (0) et (3), puis le comparer à celui d'une main saine. Justifier ce choix de liaison retenu par les ingénieurs sur le prototype de prothèse myoélectrique.

Les figures géométriques associées aux changements de bases sont données sur la figure 6. Les mouvements des différents solides sont dans le plan ($\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0$).

- Q4/** Exprimer le vecteur \vec{HG} dans la base (\vec{x}_0, \vec{y}_0). Les composantes seront exprimées en fonction des angles

θ_3 , θ_5 et θ_7 et des paramètres dimensionnels du modèle a , e , l_3 , l_5 et l_7 .

Le paramètre associé à la grandeur d'entrée lors de cette étude est l'angle θ_3 et le paramètre associé à la grandeur de sortie est la distance $\|HG\|$. Il est donc nécessaire d'exprimer la distance $\|HG\|$ en fonction de l'angle θ_3 seul (loi d'entrée-sortie géométrique de l'index).



On note $\theta_4 = (\vec{x}_0, \vec{x}_4) = (\vec{y}_0, \vec{y}_4)$ et $\theta_6 = (\vec{x}_0, \vec{x}_6) = (\vec{y}_0, \vec{y}_6)$

Figure 5 Figures géométriques de changement de bases et paramétrages

- Q5/** Proposer un graphe des liaisons de l'index (chaîne complexe de solides 0-3-4-5-6-7) à partir des figures 4 et 5. Proposer une démarche permettant d'exprimer les angles θ_5 et θ_7 en fonction de l'angle θ_3 et les paramètres géométriques dimensionnels. Ne pas mettre en œuvre les calculs.

Le modèle de connaissance ainsi obtenu permet de tracer l'évolution de la loi d'entrée-sortie (figure 7) pour un mouvement complet de flexion (fermeture) de l'index. Le diamètre du verre pincé est égal à $\|HG\|$ diminué de 4 mm correspondant aux épaisseurs du gant esthétique et des pièces.

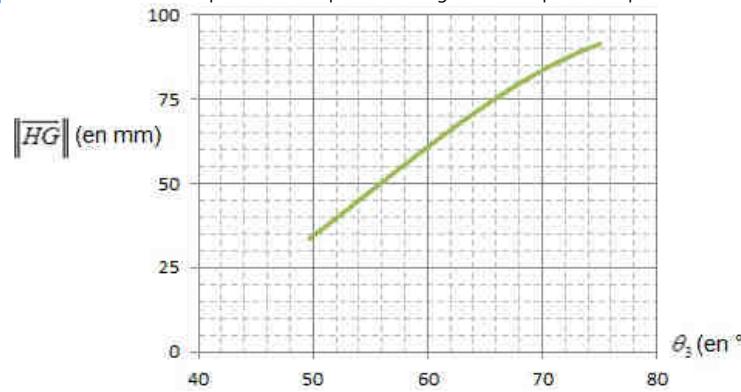


Figure 6 Tracé de la loi d'entrée-sortie de l'index

- Q6/** À partir des tableaux 1 et 2, indiquer le degré de satisfaction (très satisfaisant, satisfaisant, moyen ou non conforme) du service rendu par le prototype de prothèse pour l'exigence 1.1.1.

Le choix initial sur le prototype de la prothèse myoélectrique d'imposer les mouvements du pouce et de l'index dans des plans orthogonaux ne permet pas la saisie d'un nombre suffisant de verres. Par conséquent, l'articulation du pouce a été modifiée afin de permettre la saisie d'objets entre le pouce et l'index. Cette disposition, retenue pour la suite du sujet, permet ainsi d'obtenir un degré de satisfaction du service rendu très satisfaisant.

III. Capacité à maintenir un verre à eau sans le casser ?

Objectif Valider l'exigence Id 1.1.2, « Maintenir un verre à l'équilibre sans le casser » (voir tableau 2).

La commande de l'actionneur de l'index en boucle ouverte, sous tension nominale en régime permanent (rotor bloqué), permet de déterminer l'évolution de l'effort de pincement d'un objet entre les points G_1 et G_2 , le point

G_3 étant défini comme l'extrémité de la phalangette du pouce. Une simulation numérique a permis de déterminer l'effort de l'index sur le verre en fonction de la distance $\|GG_3\|$ (égale au diamètre du verre + épaisseurs du gant esthétique et des pièces).

Le facteur d'adhérence entre le gant esthétique et le verre à eau est $f = 0.6$ et l'hypothèse de verres parfaitement cylindriques est formulée pour la suite.

- Q7/** À partir de la courbe de la figure 8, compléter le tableau du document réponse DR2 (voir à la fin du document), et indiquer si la prothèse est capable de maintenir à l'équilibre l'ensemble des verres du tableau 1 remplis d'eau. La démarche, les hypothèses simplificatrices et la méthode sont laissées à l'initiative du candidat.

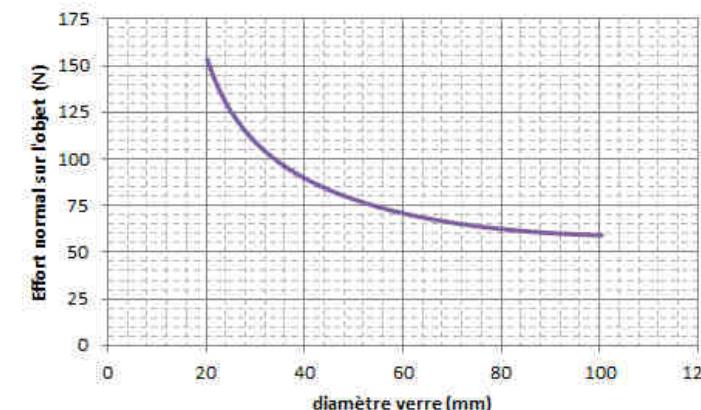


Figure 7 Évolution de l'effort normal exercé par l'index sur le verre en fonction du diamètre du verre

III.A.1) Effort de rupture du verre

Des essais expérimentaux sur les 5 types de verres à eau du tableau 1 ont été réalisés à l'aide d'une machine de traction-compression afin de déterminer la valeur de l'effort de rupture ou d'écrasement. Les résultats moyennés sur 10 mesures sont répertoriés dans le tableau 3.

Modèle	Verre 1	Verre 2	Verre 3	Verre 4	Gobelet plastique
Effort (N)	532	437	461	233	12
Déformation	Rupture	Rupture	Rupture	Rupture	Écrasement

Tableau 3 Efforts normaux provoquant la rupture ou l'écrasement des verres

- Q8/** À partir des tableaux 1 et 2, indiquer le degré de satisfaction (très satisfaisant, satisfaisant ou non conforme) du service rendu par la prothèse pour l'exigence 1.1.2.

Les ingénieurs développant la prothèse myoélectrique souhaitent améliorer le degré de satisfaction du service rendu au patient et ainsi assurer un maintien à l'équilibre sans rupture ou écrasement des 5 verres. Ils envisagent donc de contrôler l'effort appliqué par chaque doigt sur l'objet à saisir par le contrôle du couple développé par chaque actionneur. La suite de cette partie s'intéresse donc aux solutions technologiques assurant la maîtrise de l'effort de pincement.

III.B. – Modélisation du comportement dynamique de la chaîne d'énergie de l'index

Objectif Établir un modèle dynamique de la chaîne d'énergie relativé à la mise en mouvement de l'index de la main prothétique.

Dans cette partie, l'étude porte sur la chaîne cinématique, comprise entre l'arbre de l'actionneur (1) et la phalangette (7), composée des solides (2), (3), (4), (5) et (6) (figure 5). L'objectif est d'évaluer le couple que devra fournir l'actionneur pour la mise en mouvement de l'index de la main prothétique. Les masses des bielles (2), (4) et (6) et des phalanges (5) et (7) sont négligées, les liaisons sont supposées parfaites et le référentiel associé à la paume de la main prothétique (0) est supposé galiléen. Lors de cette phase de mise en mouvement, il n'y a pas d'action du verre sur l'index. Les caractéristiques géométriques et inertielles de la phalange (3) et de l'arbre de l'actionneur (1) sont fournies dans le tableau 4.

Le paramètre angulaire de la liaison pivot d'axe (G_1, E_1) orientant le solide (1) par rapport à (0) est noté θ_1 . Il représente la position angulaire de l'arbre de l'actionneur (1).

- Q9/** Donner l'expression des énergies cinétiques des solides (1) et (3) dans leur mouvement par rapport au référentiel galiléen associé à la paume (0).

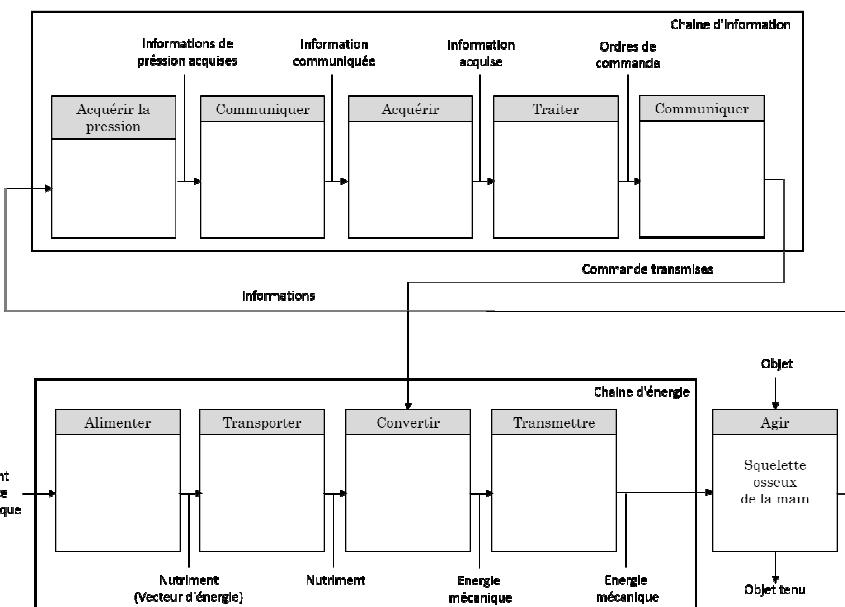
L'actionneur exerce une action mécanique sur le solide (1), assimilée à un couple pur $\vec{c}_{\text{mot}} = c_{\text{mot}} \cdot \vec{z}_1$.
L'accélération de la pesanteur est modélisée par $\vec{g} = -g \vec{z}_0$.

Q10/ Après avoir calculé les expressions des puissances galiléennes des actions mécaniques extérieures et intérieures au système (5) composé des solides (1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7), déterminer la relation entre le couple moteur $c_{\text{mot}}(t)$, $\theta_1(t)$, $\theta_2(t)$, leurs dérivées successives et les caractéristiques géométriques et inertielles des solides.

Phalange (3)		
	Masse	M_3
Centre d'inertie		$D\vec{G}_3 = a_3 \vec{x}_3 + b_3 \vec{y}_3 + c_3 \vec{z}_3$
Opérateur d'inertie		
		$I(G_3, 3) = \begin{pmatrix} A_3 & -E_3 & 0 \\ -E_3 & B_3 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{pmatrix}_{B_3}$

Arbre actionneur (1)		
	Masse	M_1
Centre d'inertie	G_1 situé sur l'axe de rotation de l'actionneur	
Opérateur d'inertie		
		$I(G_1, 1) = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & -E_1 \\ 0 & B_1 & 0 \\ -E_1 & 0 & C_1 \end{pmatrix}_{B_1}$

Tableau 4 Tableau des caractéristiques géométriques et inertielles de l'arbre de l'actionneur (1) et de la phalange (3)



Unité	Diamètre mm	Masse à vide g	Contenance cl	Poids total N	Effort normal nécessaire au maintien du verre N	Effort normal développé par un doigt N	Conclusion
Verre 1	48	175	33				
Verre 2	61	310	32				
Verre 3	76	340	42				
Verre 4	94	200	52				
Gobelet	42	3,3	20				