

# PROTHÈSE DE MAIN

L'amputation d'un membre est une intervention chirurgicale lourde qui consiste à enlever tout ou partie d'un membre. Les causes d'une amputation sont multiples :

- les affections traumatiques (83%), accidents de la route, du travail, domestiques, ainsi que les brûlures, les gelures...;
- les affections médicales (9%), irrigation sanguine insuffisante, infections osseuses ou des tissus, tumeurs...;
- les affections congénitales (6%);
- ...

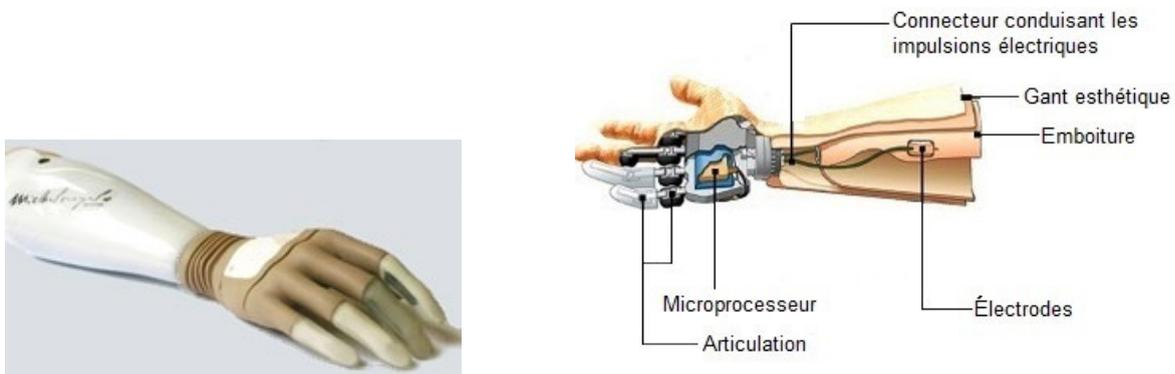


FIGURE 1 – Prothèse de main

Bien que l'amputation puisse être associée à des causes très différentes, celle-ci est toujours vécue comme un drame humain pour l'amputé. Elle le touche en effet dans son intégrité physique et elle bouleverse sa manière de vivre dans son activité quotidienne, ses études, son métier ou ses loisirs, modifiant ainsi ses aptitudes physiques. Les amputations du ou des membres supérieurs (un doigt, une main, un avant-bras ou un bras) représentent environ 14% des amputations en France, soit environ 8 000 à 10 000 amputations par an. Un cinquième des amputations des membres supérieurs sont des amputations cubitales, c'est-à-dire comprises entre le coude et le poignet. Afin de limiter les conséquences d'une amputation, le patient peut recourir à l'usage d'une main artificielle appelée dans la suite « prothèse ».

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 1), 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, fournit les ordres de commande à un ou plusieurs actionneurs électromécaniques (figure 1). Un gant esthétique recouvre l'ensemble de la prothèse.

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 figure 2 regroupe quelques verres de référence devant être saisis par une telle prothèse. Les besoins du patient s'expriment en termes d'exigences décrites dans le diagramme de la figure 3.

Les exigences sont en particulier caractérisées par les niveaux de performance suivants :

- l'effort du doigt sur le verre doit être compris entre 10 et 20 Newtons;
- le mouvement de préhension du verre doit s'effectuer en moins de 2s.

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

FIGURE 2 – Paramètres des différents modèles de verre à eau

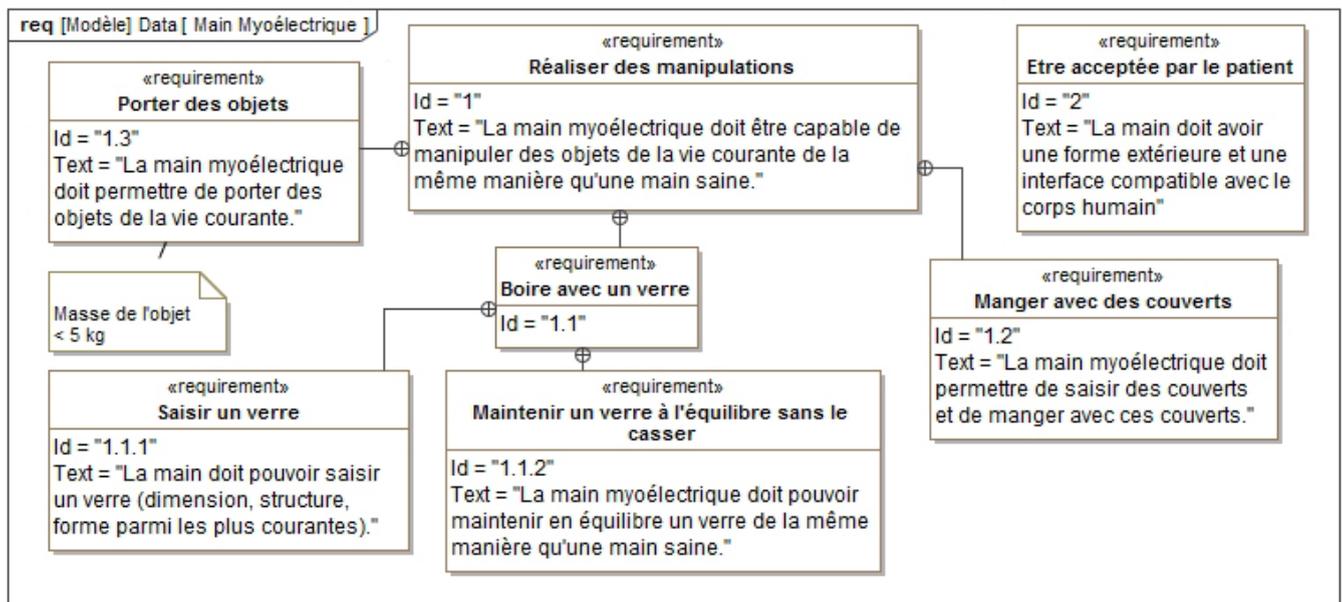


FIGURE 3 – Diagramme d'exigences

## 1 Comparatif des structures de commande des mouvements des doigts

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 - chaîne d'information du document réponse DR1 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.

Dans le cas d'un patient équipé d'une prothèse de la main, des électrodes positionnées sur les muscles de l'avant-bras délivrent des informations (impulsions électriques) traitées par un microprocesseur. Celui-ci élabore les ordres de commande pour les modulateurs d'énergie qui transfèrent la quantité d'énergie adaptée de la batterie aux actionneurs mettant en mouvement les phalanges de la prothèse (figure 4 et 5).

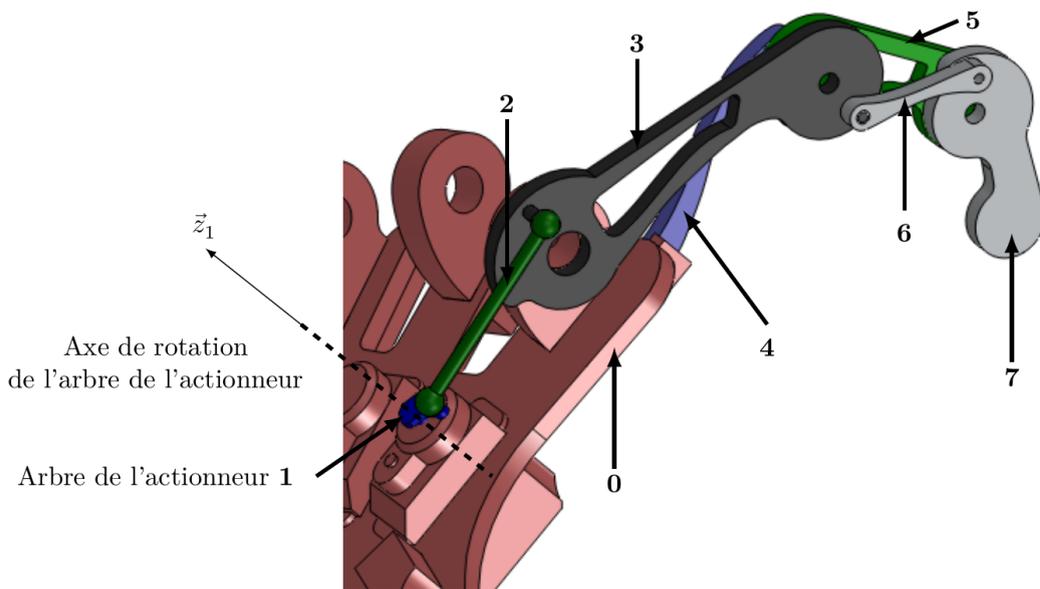


FIGURE 4 – Architecture d'un doigt articulé

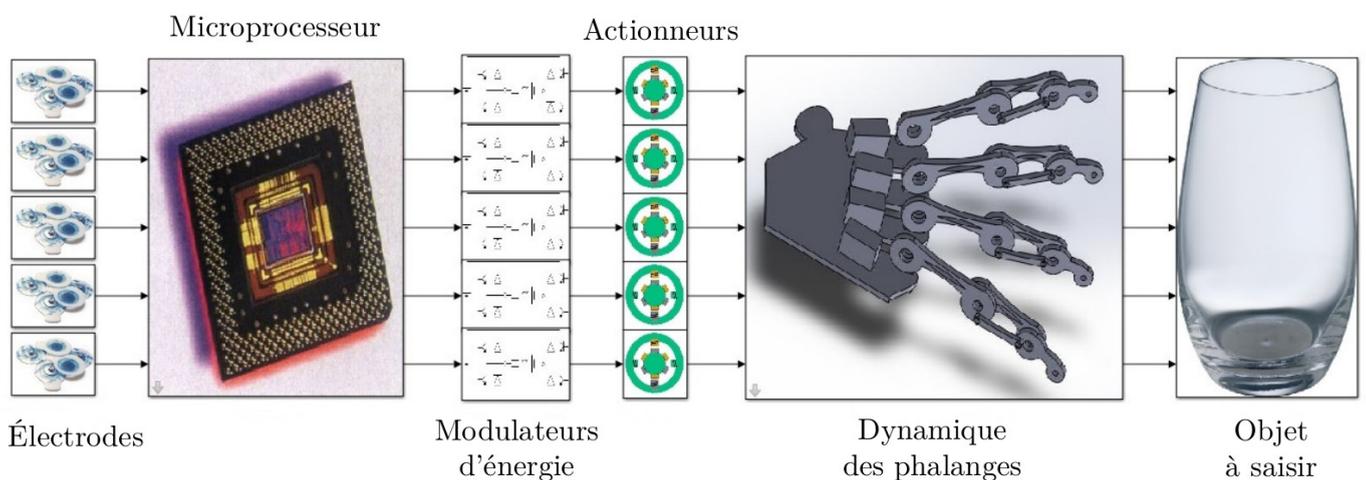


FIGURE 5 – Organisation structurelle du prototype de prothèse myoélectrique pour les 5 doigts de la main

Chaque phalange est un mécanisme articulé, animé par un unique actionneur (figure 4).

Les actionneurs sont des servo-moteurs asservis en position : un capteur potentiométrique mesure pour chacun

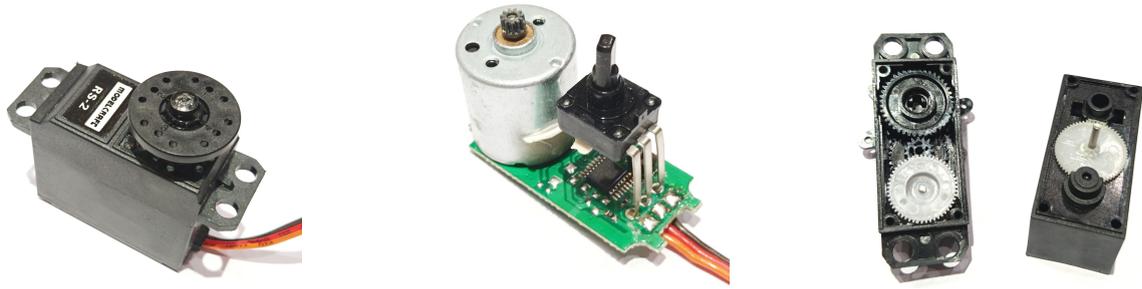


FIGURE 6 – De gauche à droite, le servo moteur monté, la vue du moteur et du capteur potentiométrique après démontage et les engrenages du réducteur

l'angle de rotation de l'arbre de sortie de l'actionneur et renvoie cette information au microprocesseur qui adapte en conséquence ses ordres de commande. La structure détaillée des servo-moteurs est décrite figures 6 et 8.

Par ailleurs, il est possible de pallier partiellement l'absence du toucher par la mesure de l'effort exercé par le doigt, directement proportionnel au courant consommé par l'actionneur. Ainsi, une mesure du courant en sortie des modulateurs d'énergie est réalisée par des capteurs à effet Hall. Cette information ne peut pas être renvoyée vers le cerveau du patient mais peut au moins être prise en compte dans les algorithmes du microprocesseur.

Deux convertisseurs analogiques numériques (CAN) permettent de convertir les tensions de sortie du potentiomètre et du capteur à effet Hall en un nombre entier codé sur 12 bits.

**Q3** Proposer un diagramme chaîne d'énergie – chaîne d'information dans le cas d'un patient équipé d'une prothèse de main.

**Q4** Définir la frontière du système « prothèse de main ».

**Q5** Proposer un diagramme de définition de blocs (bdd) de la prothèse de main.

**Q6** Proposer un diagramme de blocs internes (ibd) de la prothèse de main.

## 2 Modélisation dynamique d'un doigt de la prothèse

La prise d'un verre nécessite d'ajuster la position des doigts ainsi que l'effort de serrage. L'élaboration des lois de commande nécessite de développer un modèle numérique complet des doigts. Un modèle simplifié à un seul doigt est envisagé par la suite.

### 2.1 Modélisation du capteur potentiométrique et du CAN associé

Le capteur potentiométrique est constitué d'une piste résistive en carbone en demi-cercle et d'un curseur se déplaçant avec l'arbre de sortie glissant sur la piste résistive (figure 7). Les extrémités de la piste résistive sont reliées aux potentiels 0V et 5V. La résistance de la piste est de 2 k $\Omega$ . L'amplitude angulaire du mouvement est mécaniquement limitée à 180°.

Le potentiel du curseur est lue par un convertisseur analogique numérique (CAN) sur 12 bits. Le CAN renvoie un entier, valant 0 pour la mesure d'une tension nulle et la valeur maximale sur 12 bits pour la mesure d'une tension de 5 V. La conversion est linéaire, aux erreurs d'arrondi près.

**Q7** Exprimer la relation liant l'angle  $\theta_a$  de l'arbre de sortie de l'actionneur au potentiel  $U_p$  du curseur du potentiomètre.



FIGURE 7 – Potentiomètre démonté et représentation schématique

**Q8** Exprimer la relation liant la valeur de sortie  $M_p$  du convertisseur analogique numérique à la tension  $U_p$  du curseur du potentiomètre.

## 2.2 Modélisation du réducteur

La vitesse du moteur, de l'ordre de 1000 tr/min, est bien trop élevée pour la commande du doigt. Un réducteur (figure 8) comportant 4 engrenages (un engrenage est un couple de deux pignons engrenants) réduit la vitesse du moteur et la transmet à l'arbre de sortie. La présence d'une denture assure le non glissement des roues dentées les unes par rapport aux autres.

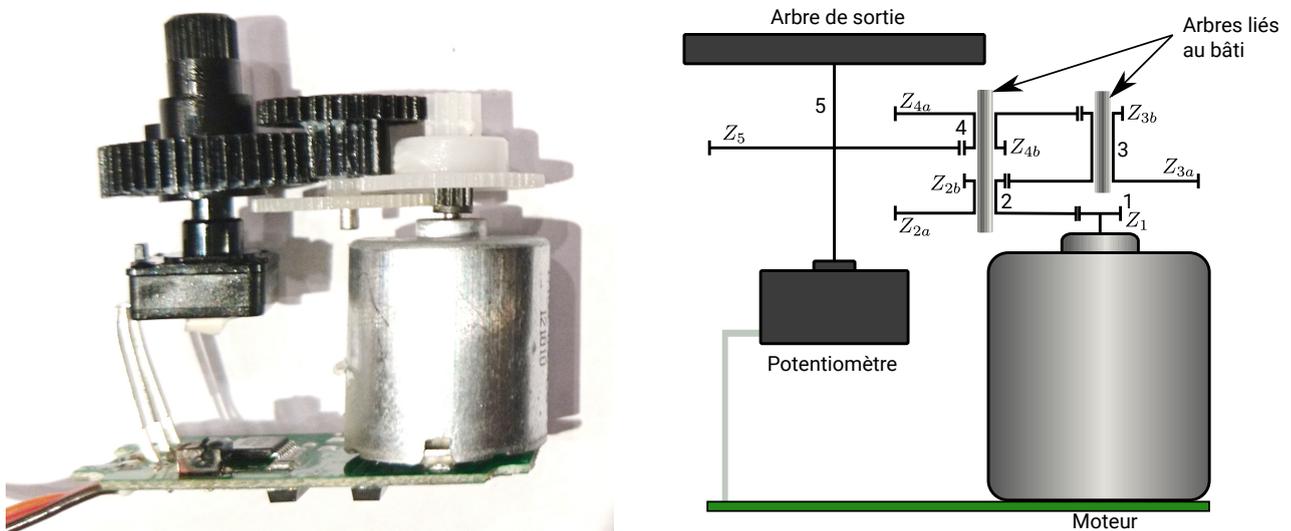


FIGURE 8 – Architecture du réducteur de vitesse du servomoteur

**Q9** La figure 9 montre le cas d'un unique engrenage comportant deux roues dont les nombres de dents sont  $Z_A = 10$  et  $Z_B = 20$ . Déterminer combien de tours doit réaliser la roue A pour un tour de roue B. En déduire le rapport de réduction  $K = \frac{\omega_B}{\omega_A}$ , où  $\omega_A$  et  $\omega_B$  sont les vitesses de rotation des roues A et B, en fonction des nombres de dents  $Z_A$  et  $Z_B$ .

On donne  $Z_1 = 11$ ,  $Z_{2a} = 61$ ,  $Z_{2b} = 11$ ,  $Z_{3a} = 51$ ,  $Z_{3b} = 10$ ,  $Z_{4a} = 35$ ,  $Z_{4b} = 15$  et  $Z_5 = 41$ .

**Q10** En déduire, pour le réducteur du servo-moteur, le rapport de réduction  $k = \frac{\omega_5}{\omega_1}$  en fonction des nombres de dents des pignons indiqués sur la figure 8.

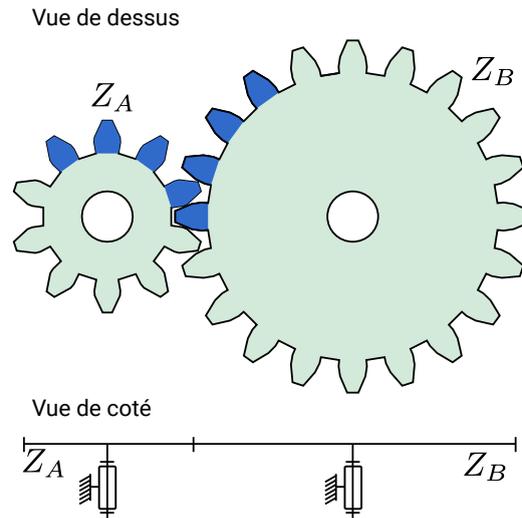


FIGURE 9 – Cas d'un unique engrenage à  $Z_A = 10$  et  $Z_B = 20$  dents

### 2.3 Modélisation du doigt articulé

Après modélisation cinématique du mécanisme articulé, il a été possible de tracer sous Python la loi liant le déplacement de l'extrémité du doigt  $\lambda$  à l'angle de l'actionneur  $\theta_a$  figure 10.

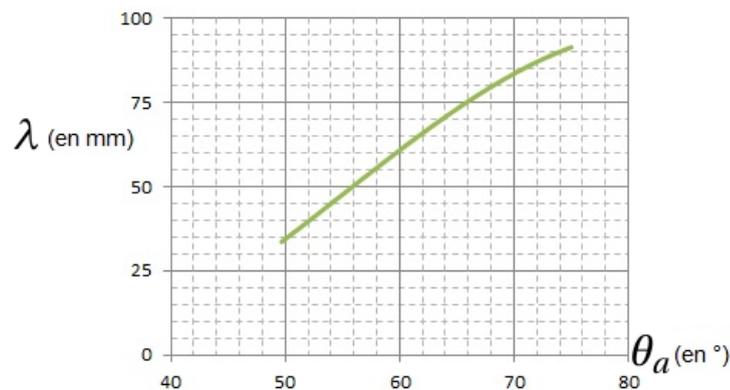


FIGURE 10 – Courbe représentant la loi liant le déplacement de l'extrémité du doigt  $\lambda$  à l'angle de l'actionneur  $\theta_a$

**Q11** En linéarisant le comportement, proposer une loi entrée-sortie liant le déplacement  $\lambda$  à l'angle  $\theta_a$ .

Lorsque le doigt exerce un effort, la souplesse des pièces et des articulations conduit à un déplacement du bout du doigt proportionnel à l'effort exercé. Pour 10 N exercés, le doigt fléchi de 3 mm.

**Q12** Par quel composant modéliser ce phénomène mécanique? Proposer une valeur de paramètre associé.

### 2.4 Modèle acausal du doigt

Un modèle acausal est partiellement élaboré sur la figure 13. La batterie stocke l'énergie électrique sous 10 V et le constructeur du moteur spécifie une vitesse maximale de 1000 tr/min.

**Q13** Identifier sur le schéma (en les entourant) la partie commande, les chaînes d'acquisition (capteurs et conditionnement), les composants de la chaîne d'énergie et le bloc correspondant à la souplesse du doigt et au contact avec le verre.

**Q14** Compléter le schéma en traçant les liens entre les blocs.

Une simulation du modèle est conduite en imposant une consigne de serrage du doigt de type rampe de 5 cm durant 1 s. Le modèle de contact avec le verre est défini tel que le doigt ne peut se déplacer librement que sur 4 cm, après quoi il touche le verre. La simulation conduit aux courbes figures 11.

**Q15** Déterminer à quel instant le doigt touche le verre et à quel instant il a terminé l'action de serrage du verre. Déterminer si les critères du cahier des charges sont satisfaits et si le comportement est compatible avec la batterie et le moteur utilisés.

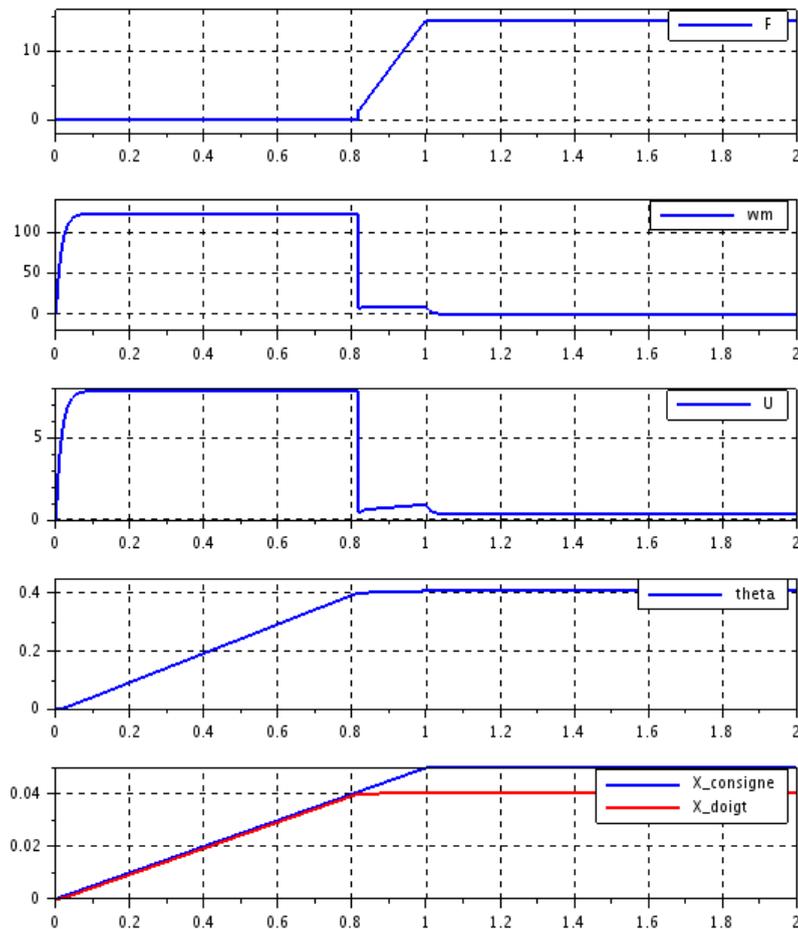


FIGURE 11 – Résultats de simulation

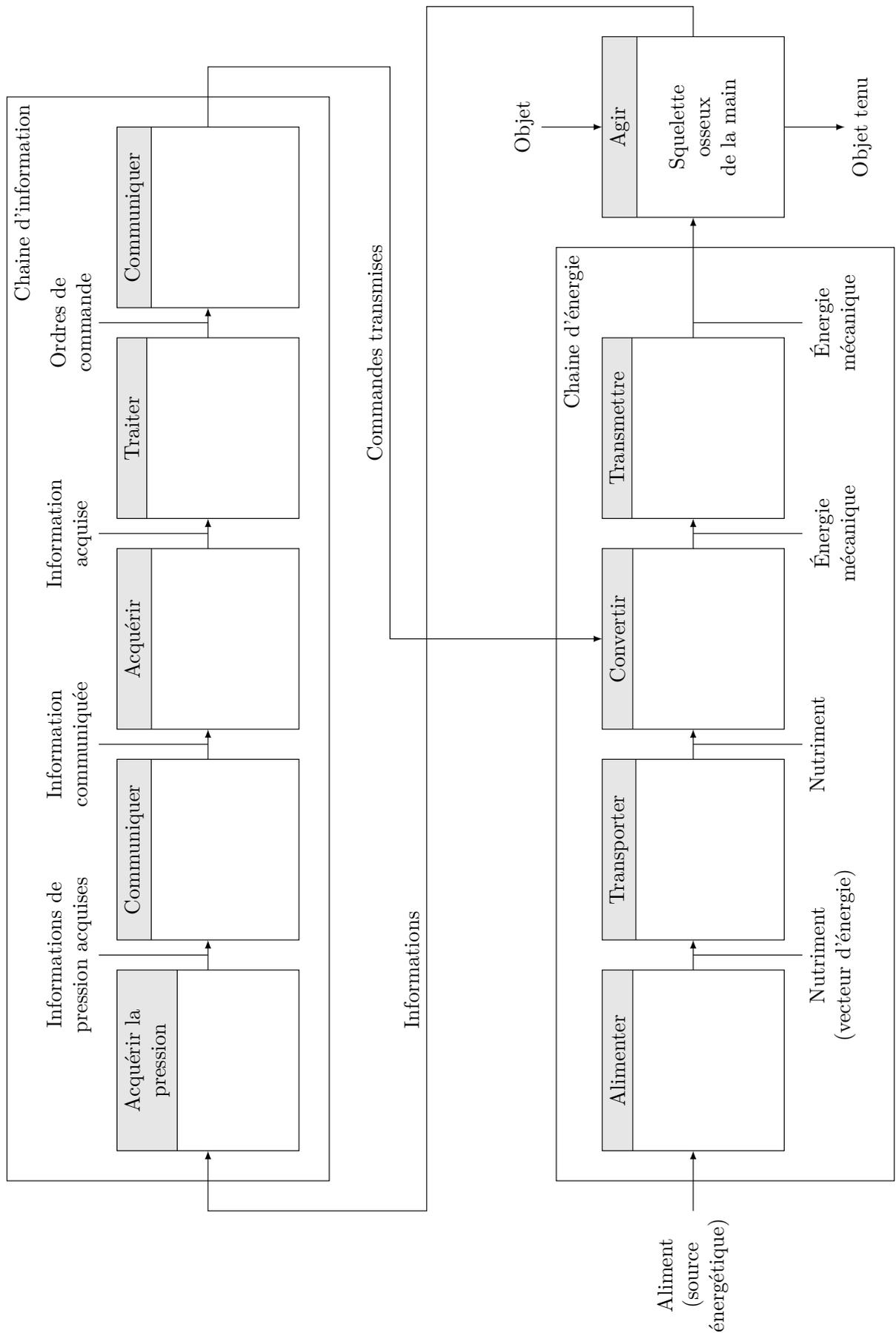


FIGURE 12 – Document réponse – Chaine d'information et chaine d'énergie pour une main valide

