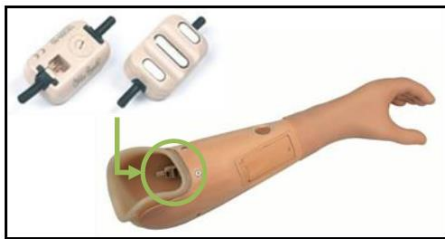


I. Introduction

Les handicaps liés à la perte d'une partie du membre supérieur augmentent avec le niveau d'amputation : les personnes amputées au-dessus du coude ont plus de difficultés à réaliser des tâches du quotidien. Seulement 15% des amputations concernent le membre supérieur (entre 8000 et 10000 individus amputés du membre supérieur en France). Par conséquent, on observe une inégalité de développement des solutions prothétiques proposées aux amputés du membre supérieur.

La prothèse substitue de manière active ou passive le membre manquant : parmi les articulations remplacées, certaines sont motorisées. Ces solutions actives sont de plus en plus utilisées par les personnes amputées ; elles sont appelées prothèses myoélectriques, en référence à la stratégie employée pour les contrôler. Grâce aux progrès technologiques des 10 dernières années, de nouvelles prothèses anthropomorphiques, avec plusieurs doigts motorisées, ont fait leur apparition sur le marché. La stratégie de commande actuelle peine à s'adapter à la complexité de tels systèmes.

Jusqu'à maintenant, les utilisateurs contrôlent les articulations prothétiques motorisées via des contractions volontaires des muscles du membre résiduel, mesurés grâce à des électrodes EMG placées dans l'emboîture de la prothèse, comme illustré ci-contre.



L'activité de chaque groupe musculaire (habituellement deux) est alors utilisée comme signal de contrôle des articulations prothétiques : la main se ferme lorsque le biceps se contracte, et s'ouvre lorsque le triceps se contracte. Selon la même méthode, l'utilisateur contrôle plusieurs mouvements prothétiques (par exemple flexion/extension du coude, pronosupination du poignet) : en ne disposant toujours que de

2 signaux de commande, il change d'articulation active grâce à une co-contraction (contraction simultanée de 2 muscles) ou une séquence de contractions. Les amputés trans-huméraux parviennent généralement à maîtriser la commande d'une main prothétique, mais ont de grandes difficultés à tirer profit d'un poignet et d'un coude actifs dû à une commande séquentielle et complexe, et leurs préfèrent ainsi des systèmes mécaniques autobloquants.

Le coude est une articulation essentielle pour la réalisation des activités du quotidien. Pour la plupart de mouvements sains, le contrôle du coude est implicite. Le contrôle moteur humain est organisé de façon hiérarchique : la plupart de nos gestes sont effectués dans l'espace des tâches ou l'espace 3D sans que l'on ait à se concentrer sur les mouvements articulaires ou les contractions musculaires. On observe ainsi des coordinations inter-articulaires permettant de réduire les efforts cognitifs. A l'inverse, la commande prothétique myoélectrique telle qu'elle existe requiert à l'utilisateur de se placer dans l'espace des articulations, lui demandant de la concentration qu'il n'attribue donc plus à la tâche. Beaucoup d'amputés trans-huméraux ne sont pas satisfaits de leur appareillage, notamment à cause d'une stratégie de commande contre-intuitive, et ils se limitent souvent à l'utilisation de la main, en ayant anticipé et bloqué le coude dans la position voulue.

II. Utiliser les mouvements du membre résiduel pour contrôler le coude

Bien que l'appareillage d'un amputé trans-huméral bloque l'articulation de l'épaule (poids, sangles, harnais), la plupart des amputés trans-huméraux ont un membre résiduel mobile dont les amplitudes de mouvements sont du même ordre de celles d'un membre sain. Par ailleurs, les résultats de la littérature ont montré qu'il existait une coordination entre l'épaule et le coude chez l'individu sain qui dépendait de la tâche, et que l'on pouvait modéliser cette coordination avec des moyens d'analyse numérique (par exemple, réseaux de neurones). Le modèle de coordinations obtenu peut ensuite être utilisé pour prédire

les mouvements du coude étant donné une mesure des mouvements de l'épaule. Notre approche consiste donc à **associer les mouvements du membre résiduel à ceux du coude prothétique** en utilisant un **modèle de coordinations épaule/coude** et des **mesures en temps réel des mouvements du membre résiduel**. La stratégie de commande développée permet à l'utilisateur de commander le coude prothétique automatiquement en réalisant les mêmes mouvements d'épaule que ceux d'un individu non amputé.

Alors que des améliorations techniques des prothèses ou de nouvelles stratégies de commande prothétiques voient le jour dans la littérature, la plupart des études évaluent le geste prothétique en se focalisant sur l'aspect fonctionnel. Des tests comme le Southampton Hand Assessment Procedure fondent leur score sur la réussite de la tâche par le sujet. Cependant, on sait qu'une limitation de l'amplitude au niveau d'une articulation telle que le coude entraîne le développement de stratégies de compensation pouvant évoluer en troubles musculo-squelettiques et des douleurs. Les compensations sont un problème récurrent chez les amputés de bras : leur utilisation limitée de la prothèse les force à sur-utiliser le membre controlatéral et le tronc. Il est donc essentiel d'évaluer aussi la qualité du geste, soit en comparaison avec un geste physiologique, soit avec un geste réalisé avec un appareillage standard. Nous avons donc choisi de faire une **évaluation cinématique des gestes réalisés par nos participants**, à l'aide d'un système de Motion Capture, afin de quantifier les éventuelles variations entre les différents modes de contrôle testés.

III. Méthodes

Les 3 années de thèse ont été partagées en 2 grandes étapes successives : la construction de modèles de coordinations épaule/coude, et les tests de la méthode de contrôle automatique du coude. La coordination épaule/coude dépendant de la tâche réalisée, nous avons restreint l'étude à la tâche de *reaching* qui est un des gestes les plus communs, mais qui n'est pas réalisable par une personne amputée de bras.

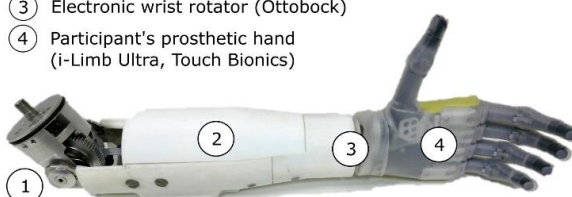
1. Construction du modèle des coordinations épaule/coude

La première étape a consisté à construire un modèle de coordinations inter-articulaires à partir d'enregistrements de gestes physiologiques. Plusieurs méthodes de modélisation ont été utilisées afin d'approximer la fonction reliant les vitesses angulaires de l'articulation de l'épaule à celle du coude. Ce travail a abouti à l'élaboration d'un **modèle générique qui combine les stratégies de reaching de plusieurs individus**. Les performances de prédiction de ce modèle ont été testées en simulation afin d'étudier l'influence de paramètres tels que le nombre de sujets ou le nombre de gestes inclus dans la base de données d'entraînement du modèle.

2. Tests du modèle

Les prothèses du commerce ne permettent pas de tester des stratégies de commande différentes de celle d'origine. Par conséquent, un prototype de prothèse a été assemblé à l'ISIR (Etienne de Montalivet, Nathanaël Jarrassé) à partir de pièces du commerce dans l'objectif de pouvoir implémenter et tester des diverses stratégies de commande, notamment celles développées pendant ma thèse. Nous avons eu une approche « embarquée » pour l'élaboration du prototype : les capteurs et l'ordinateur de bord sont autonomes et sont facilement intégrables dans la prothèse ou sur le harnais de l'utilisateur. Les mouvements de l'épaule, que ce soit pendant la phase d'acquisition des données ou pendant les phases de tests, ont été mesurés avec 2 centrales inertielles placées sur le tronc et le bras de la personne. De plus, afin de faciliter le travail des orthoprothésistes lors des tests, le prototype peut être rattaché à n'importe quel système d'emboîture.

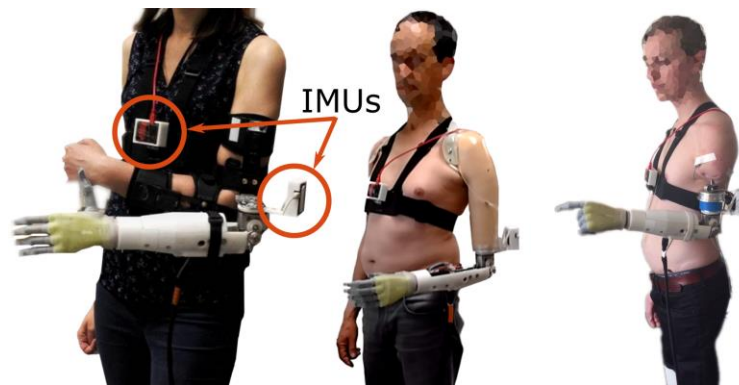
- ① Modified Hosmer elbow
- ② Prototype's controller: Raspberry Pi 3
- ③ Electronic wrist rotator (Ottobock)
- ④ Participant's prosthetic hand (i-Limb Ultra, Touch Bionics)



Tests avec des participants

Dans un premier temps, le modèle générique de coordinations physiologiques épaule/coude a été testé avec des individus sains. Ces derniers ont été équipés pour cela d'une orthèse de coude sur laquelle nous avons attaché notre prototype (illustré ci-dessous en A), lui-même contrôlé par le modèle générique. Cette étape nous a permis de tester plusieurs modèles (correspondant aux différentes méthodes de modélisation utilisées dans la phase de construction du modèle), et de sélectionner celui qui a priori est le plus adapté à une utilisation par un individu amputé.

Deux groupes d'individus amputés de bras ont été recrutés. Les individus du premier groupe, recrutés au Centre Louis Pierquin de l'Institut Régional de Médecine Physique et de Réadaptation, sont d'ordinaire équipés avec une emboiture conventionnelle avec harnais dite « externe » (illustré ci-dessous en B). Dans le cadre d'une mobilité internationale, j'ai pu aller faire des tests dans l'équipe de Max Ortiz-Catalan, chercheur à l'Université de Chalmers (Göteborg, Suède). Ce dernier nous a permis de recruter le second groupe de participants : ceux-là ont une prothèse ostéo-intégrée comportant un implant métallique prolongeant l'os sur lequel l'appareillage est branché (illustré ci-dessous en C). Les individus des deux groupes ont pu réaliser la tâche une première fois avec le coude contrôlé par un mode myoélectrique standard, puis une seconde fois avec le coude contrôlé automatiquement par les mouvements du membre résiduel.



IV. Résultats et contributions

Les expériences menées pendant cette thèse correspondent aux **premières implémentations d'un mode de contrôlé automatique du coude utilisant les mouvements de l'épaule** comme signal d'entrée. Une des grandes forces de ce travail est l'approche centrée sur le patient qui a permis d'aboutir rapidement à des expériences avec 7 amputés de bras qui ont ainsi pu tester le mode de contrôle automatique.

Tous les sujets ont pu réaliser la tâche avec les deux modes de contrôle testés (mode automatique basé mouvement, et mode myoélectrique de référence). Bien qu'une meilleure précision ait été obtenue avec le mode myoélectrique, tous les patients ont rapporté être bien plus satisfaits avec le mode automatique qu'ils ont trouvé naturel et donc plus intuitif. De plus, l'analyse cinématique a montré que le mode automatique permet de **restaurer la synchronisation physiologique entre les mouvements du tronc, de l'épaule et du coude** pendant le geste de *reaching*. En outre, les résultats obtenus montrent l'importance d'évaluer le comportement cinématique des participants : chaque individu a sa propre façon de se comporter avec la prothèse, ce qu'une analyse limitée à la performance de la tâche ne peut pas montrer.

Les travaux futurs incluent l'amélioration du mode de contrôle automatique. Au vu des résultats, il semble qu'imposer une synergie, bien que physiologique, à des participants ayant perdu une partie de leur membre perturbe leur comportement, notamment parce que l'amputation modifie le schéma corporel et les mouvements de l'épaule sont modifiés. Les travaux prennent donc la direction d'une solution personnalisée tenant compte des capacités de chaque utilisateur.