



Projet d'Intégration Scientifique, Technologique, Economique

Rapport de projet PISTE

Année universitaire 2015/2016

PISTE n°16-10

SUJET : De la prothèse d'aujourd'hui au bras connecté de demain

ELEVES INGENIEURS HEI :

- Bertrand Thomas
- Bourrée François
- Causse Hugo
- Cockenpot Rodolphe
- Dupont Aubin
- Echaiz-Guevara Paul
- Rachidi Alae-Eddine
- Relotius François
- Roussel Victoire
- Serval Alexandre

JURY DE SOUTENANCE :

Président de jury : Chrystelle Gaujard

Professeur(s) encadrant(s) : Hua Cao

Professeur(s) associé(s) :

Remerciements

Nous tenions, tout d'abord à remercier Madame Hua CAO du soutien et de la disponibilité qu'elle nous a consacré tout au long de ce projet.

Nous sommes reconnaissants envers tous les intervenants et professionnels nous ayant épaulés en nous donnant de précieux conseils. Nous avons partagé un moment enrichissant à découvrir les métiers des docteurs LABOUROT et PAT de l'hôpital de Roubaix ainsi que celui de l'orthoprothésiste BARBEZ d'Ortho Nord. Nous avons reçu un accueil bienveillant des commerciaux d'Ottobock rencontrés lors du salon dans le cadre de l'étude comparative et des personnes ayant pris le temps de nous répondre sur les forums.

De plus, nous tenions à remercier Olivier BIAU pour le temps qu'il a pu nous accorder et les 100€ proposés par HEI pour nous permettre de mener à bien ce projet. De même, nous sommes gratifiants envers les professeurs présents dans le Fablab d'HEI qui nous ont apporté des connaissances supplémentaires par rapport à l'impression 3D, particulièrement Jean-Michel MAIRIE qui a pris le temps d'étudier nos plans et réaliser un devis d'impression sur les imprimantes d'HEI.

Enfin, nous souhaitons mettre en relief la chance qu'HEI nous donne en nous proposant des projets pour découvrir le travail d'équipe et les difficultés à mener à bien un projet avec autant d'acteurs.

Cette première expérience marquera nos carrières, les tâches réalisées tout au long de ce projet resteront une réelle mise en situation de nos vies futures en ce qui concerne la conduite de projets et les travaux en équipe.

Nous espérons que la lecture de ce projet vous sera agréable, nous vous prions de recevoir, Mesdames, Messieurs, nos salutations les plus respectueuses.

Cordialement,

L'équipe 16-10

Table des matières

I.	Introduction	6
II.	Note de clarification, WBS, planning	7
	a) Note de clarification	7
	b) WBS	11
	c) Planning.....	12
	d) Analyse des risques	13
	e) Diagramme en pieuvre	14
III.	Anatomie	16
	a) Squelette de l'avant-bras	16
	b) Musculature de l'avant-bras.....	17
	1) Muscles de la loge antérieure.....	17
	2) Muscles de la loge postérieure	18
	c) Vascularisation et innervation de l'avant-bras.....	19
	1) Vascularisation de l'avant-bras	20
	2) Innervation de l'avant-bras	21
	d) Squelette de la main et du poignet	21
	e) Les muscles et tendons de la main	23
	f) Artères, veines et nerfs	24
IV.	La prothèse d'hier à aujourd'hui	26
	a) Histoire de la prothèse	26
	b) Législation	29
	1) Au niveau de la fabrication	29
	2) Au niveau éthique.....	29
	c) Contexte économique	31
	1) Définition	31
	2) Étude de marché.....	31
	3) Concurrence	33
V.	Processus de fabrication de la prothèse	34
	a) Comparaison des différentes prothèses	34
	1) Les prothèses esthétiques	34
	2) Les prothèses fonctionnelles	35
	3) Comparaison des prothèses myoélectriques.....	36

4) Les prothèses imprimées en 3D.....	38
b) Aspects techniques	38
1) Matériaux	38
2) Capteurs	42
3) Devis pour la réalisation d'une prothèse.....	47
VI. Rencontres avec des professionnels	48
a) Rencontre à l'hôpital de Roubaix.....	48
b) Rencontre Nord-Orthopédie.....	48
VII. Présentation du prototype	50
a) Construction.....	51
1) Le microcontrôleur Arduino.....	51
2) Servomoteur	51
3) Capteur musculaire	52
4) Les électrodes Passives.....	57
5) Choix du matériau	57
6) Batterie (Prévision).....	60
7) Plan du montage	62
b) Action possible et innovation.....	64
1) Hardware	64
2) Software	66
3) Esquisse de code pour le capteur colorimétrique.....	67
c) Avantages et inconvénients	68
VIII. Conclusion.....	70
Sitographie et bibliographie	71
Table des illustrations	73
Vision du projet par chaque membre de l'équipe.....	74

I. Introduction

Le Projet Intégration Scientifique, Technologique, Economique (P.I.S.T.E) est mené en première année d'école ingénieur. L'ensemble de la promotion est scindé en groupes d'une dizaine d'étudiants. Chaque groupe choisit un sujet qui vise à analyser et apporter une innovation à un objet ou un quelconque projet déjà existant. Encadrés par un professeur référent, les étudiants bénéficient d'environ six mois pour mener à bien leur étude. Notre groupe a choisi de s'atteler au sujet suivant : « De la prothèse d'aujourd'hui au bras connecté de demain ».

Pour réaliser notre projet, nous avons souhaité nous documenter sur le sujet de la prothèse par divers moyens. Outre une recherche sur internet, nous nous sommes rendus, par petits groupes au forum « Autonomic » à Lille Grand Palais. Nous souhaitions y rencontrer des personnes amputées. Nous avons échangé avec le Docteur Yohann Pat, Praticien hospitalier et le Docteur Laurence Labourot, Médecin Chef du Service Transversal de Médecine Physique et de Réadaptation au Centre Hospitalier Victor Provo à Roubaix. De plus, nous nous sommes inscrits sur le forum « Adepa » (Association de Défense et d'Etude des Personnes Amputées) consacré aux personnes amputées pour prendre connaissance de leur handicap au quotidien et avoir un retour sur les prothèses qu'ils possèdent.

Différents cours nous ont aussi aidés dans la réalisation de notre projet. En effet, le management de projet nous a permis de renforcer notre rigueur, a valorisé la nécessité de nous organiser et de synthétiser nos idées. Les Sciences des Matériaux ainsi que les Structures et Propriétés des Matériaux ont été un appui dans la réalisation de la prothèse et l'Electronique Analogique dans le choix des capteurs. Cette liste est cependant non exhaustive.

Le corps humain est doté d'un mécanisme complexe permettant toutes sortes de mouvements. Le cerveau régit nos actions en envoyant des signaux aux nerfs, lesquels les relaient automatiquement aux muscles. La perte d'un membre est un réel handicap pour l'Homme. Il se doit de remettre totalement en cause ses habitudes et tous ses acquis dans les scènes du quotidien. Voilà déjà un siècle, depuis la première guerre mondiale, que des méthodes ont été mises en place pour rendre la vie des blessés plus simple. A l'époque, les soldats malchanceux, revenant amputés du front, étaient réparés tant bien que mal avec des prothèses de bois, de métal ou de porcelaine. Pourtant peu d'entre eux retrouvèrent un jour une vie normale. Aujourd'hui, grâce aux avancées non négligeables de la médecine et des sciences, la conception de membre bionique est réalisable. Il est possible de créer et de contrôler des parties du corps robotisées, fonctionnant comme le sont les membres naturels desquels nous sommes dotés.

Notre étude nous a amenés, dans un premier temps, à observer l'anatomie humaine et ainsi de comprendre le fonctionnement physique de la transmission des signaux nerveux. Dans un second temps, nous nous sommes penchés sur l'histoire de la prothèse, le cadre législatif et le développement de ses systèmes artificiels. Enfin, nous nous sommes intéressés à l'élaboration

d'un prototype de prothèse d'avant-bras, puis à sa confection par le biais de l'imprimerie 3D. Nous avons eu l'idée de gérer les mouvements primaires de l'Homme à l'aide de boutons sur la prothèse, l'optique étant que, dans un avenir proche, chacun puisse avoir accès à des prothèses bon marché, mais utiles et au service de son propriétaire.

II. Note de clarification, WBS, planning

a) Note de clarification

→ Contexte

Notre projet P.I.S.T.E porte sur la prothèse de bras du futur.

Les clients sont les personnes nécessitant une prothèse de main pour leur permettre de retrouver leur mobilité (par exemple des personnes accidentées de la route ou du travail).

On parlera davantage de bénéficiaires que de clientèle.

Le but de notre projet est d'arriver à mettre en place un prototype de prothèse articulée et facilitant le quotidien des personnes amputées tout en minimisant les coûts.

Il existe déjà des prothèses de bras, mais notre objectif sera d'en développer une nouvelle, avec des capteurs intégrés et une fabrication simplifiée.

→ Données d'entrée

Pré-recherche : Documentaire TV

<http://protunix.com/protheses/protheses-membres-superieurs/>

<http://golem13.fr/jesse-sullivan-controle-son-bras-bionique-par-la-pensee/>

Le premier site internet : <http://protunix.com> présente les différents types de prothèses actuellement sur le marché. Tout notre travail de groupe va graviter autour de ces données puisque nous allons les analyser, les comparer pour ensuite pouvoir proposer un produit innovant, regroupant les forces de chaque modèle.

Le second article qui a inspiré notre groupe est tiré du site <http://golem13.fr> qui nous présente un tout nouveau type de prothèse développé par l'équipe de Todd Kuiken, ingénieur à l'université Northwestern. Ici les mouvements ne sont plus entraînés par des contractions musculaires comme dans les prothèses myoélectriques mais par des messages nerveux issus du cerveau. Ce procédé totalement innovant se rapproche de la normalité et donne un moyen beaucoup plus naturel au porteur de la prothèse de retrouver son autonomie. En effet les tests de l'équipe de Todd Kuiken ont montré que ce bras bionic donnait accès à une gamme de

mouvement largement supérieure aux gammes des autres prothèses. Notre groupe a donc voulu s'inspirer de ce type de prothèse pour proposer une innovation viable et intéressante.

→ **Faisabilité**

Nous allons principalement nous intéresser au fonctionnement mécanique de la prothèse et moins sur la connectique corps-machine qui demande d'importantes connaissances sur le corps humain. Le côté technique de la prothèse va de ce fait être privilégié ainsi que sa réalisation. Le produit final sera un ensemble main avant-bras articulé qui est capables de réaliser des mouvements simples de la vie quotidienne.

→ **Technologie utilisée**

L'accès à une imprimante 3D nous permettra de se procurer une majeure partie des composants de base de la prothèse.

Pour la mobilité, nous tenterons de rendre chaque doigt articulé et pliable, ainsi qu'un poignet capable d'effectuer des rotations sur plusieurs axes.

Notre objectif est uniquement de réaliser un prototype fonctionnel. Nous ne cherchons pas à le commercialiser aussi nous n'avons investigué le secteur concurrentiel dans ce domaine.

En revanche, les brevets déposés existants nous seront utiles dans nos recherches.

Une étude économique pourra être faite en fin de projet pour évaluer l'éventuel coût et la possibilité ou non de commercialiser un jour cette prothèse connectée.

→ **Objet du projet**

Les personnes ciblées par le projet veulent retrouver une indépendance et une dextérité perdue. L'étude de faisabilité n'étant pas encore faite, nous allons essayer de nous projeter afin d'étudier les limites de notre projet tels que le coût, la technologie, etc.

→ **Produit du projet**

Une documentation des projets existants et la réalisation d'un prototype sont prévues. On pourra rajouter une étude de marché et un rapport final détaillant les méthodes utilisées, les logiciels et la partie électronique du bras connecté.

Les services et avantages procurés par cette prothèse sont de retrouver une partie de la mobilité après un accident entraînant la perte d'un membre, de pouvoir saisir des objets, de ne

pas dépendre de quelqu'un pour des tâches du quotidien comme s'habiller ou autre. Enfin, d'être indépendant et de réduire au maximum le handicap.

→ Objectifs

Qualité : résistante à l'eau et à la chaleur, bon temps de réaction entre le désir du mouvement et le mouvement en lui-même, bonne mobilité du produit (rotation efficace des doigts et poignet), résistante aux chocs légers, confortable à porter (pas trop lourd), un minimum esthétique

- Coût : ~200€
- Temps : de septembre jusqu'à mars
- Performance : reproduction de mouvements élémentaires : saisir un objet, lancer une balle, voir effectuer des tâches plus complexes si possible (ex : lacer ses chaussures)

→ Acteurs du projet

Les acteurs du projet sont les 10 étudiants de notre groupe de projet P.I.S.T.E.

Ce projet comprendra un pôle électronique, un pôle documentation et innovation, un pôle technique pour la réalisation du prototype ainsi qu'un pôle axant plus sur l'aspect sensoriel de la prothèse. Chaque pôle sera indépendant mais fera participer les autres membres du groupe. Le chef de projet se tiendra informé des avancées de chaque pôle et coordonnera l'ensemble du projet.

Nous n'avons pas souhaité de client test d'un point de vue pratique. Une fois la prothèse terminée, si cette dernière est fonctionnelle nous pourrions cependant en faire profiter une association.

Pour les aides extérieures, un professeur d'HEI, Mme Biotteau, s'est proposée pour nous aider, puisqu'elle a travaillé dans les matériaux, notamment dans le domaine médical et celui des prothèses. Nous essayerons aussi de prendre contact avec des entreprises spécialisées ou des laboratoires. De plus, nous avons obtenu une participation de 100 € de la part d'HEI dans le but d'amener le plus loin possible notre projet.

→ Contraintes

Les contraintes sur un projet de la sorte sont nombreuses.

En premier lieu vient la contrainte du savoir, réaliser une prothèse avancée technologiquement et réalisant la liaison de l'homme à la machine n'est pas facilement réalisable pour des élèves ingénieurs sans cours spécifiques ni connaissances sur le domaine en particulier.

Ensuite vient une contrainte monétaire, car la qualité a un coût et si nous voulons obtenir un produit performant il faudra investir dans des composants de qualité et une abondance d'éléments de technologie et connectique pour une plus grande performance.

→ **Législation**

La législation française sera bien entendu à prendre en compte comme c'est le cas dans tout projet, et plus encore dans un domaine médical tel que celui des prothèses qui peuvent constituer une partie intégrante du corps humain, et du marché existant en France.

La législation est un point important et controversé face aux prothèses.

→ **Difficultés**

Les difficultés techniques envisagées sont nombreuses (réalisation des articulations, fluidité des mouvements, entretien de la prothèse...). Finaliser le prototype dans le temps imparti est un challenge, le réaliser à moindre coût sera un autre défi.

→ **Conséquences attendues**

Ce projet va nous permettre de tester nos compétences de travail en équipe et de répartir les tâches entre plusieurs groupes. L'objectif est aussi de nous aider pour notre PPP (Projet Professionnel Personnel). Enfin d'un point de vue extérieur, notre objectif sera de réfléchir et d'améliorer un produit déjà existant.

b) WBS

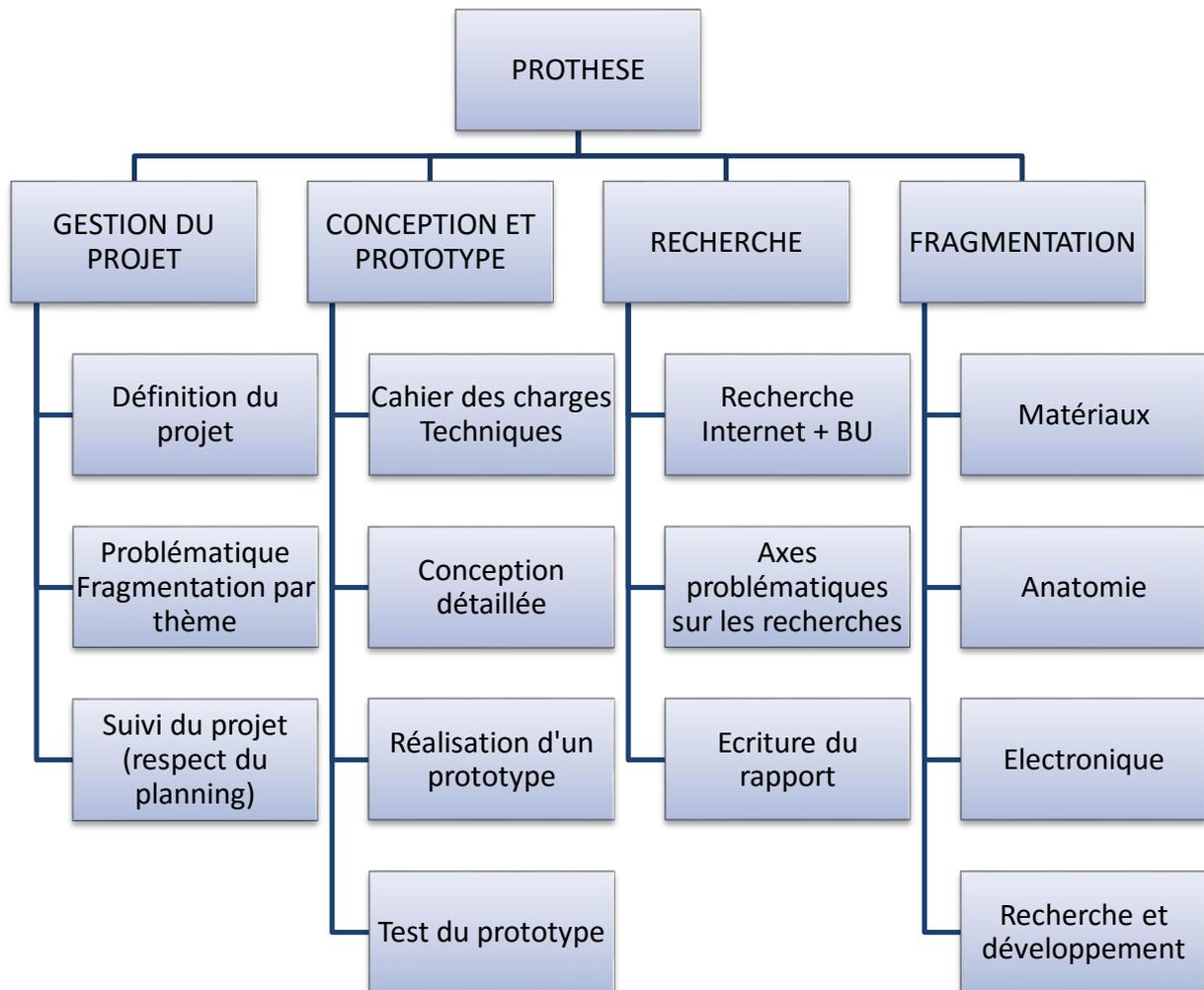


Figure 1: Organigramme du WBS

d) Analyse des risques

ORIGINE	RISQUE	CAUSES	EFFETS	Apparition (A) : 1-9 Gravité (G) : 1-9 Non détection (D) : 1-9	Criticité $C=A \times G \times D$
Recherche des données	Mauvaise compréhension et avancement dans le projet	Sites peu fiables	Informations contradictoires	A=5 G=7 D=6	210
Réalisation de la prothèse	Prothèse non fonctionnelle	Problème de codage, d'électronique	Impossible de présenter un travail complet et abouti	A=6 G=5 D=1	30
Planification du projet	Définir la durée des tâches à l'avance	Manque d'anticipation, d'organisation	Attendre que les tâches précédentes se finissent, être à l'arrêt	A= 3 G= 5 D= 2	30
Commande matériel	Non livraison ou retard Mauvaise pièce commandée/reçue	Mauvaise information sur le matériel, commande faite trop tard	Ne pas pouvoir commencer la conception de la prothèse être à l'arrêt	A= 4 G= 5 D=2	40
Rédaction du rapport	Rapport incomplet, pas assez détaillé	Incapacité de se place avec un œil extérieur, manque d'explication	Rapport peu intéressant	A= 4 G= 7 D=6	168

Figure 3: Tableau analyse des risques

Le principal risque de notre projet est dans la collecte d'information et la recherche d'informations pertinentes et d'une innovation utile. Pour éviter cela, nous avons fait le choix de rencontrer des professionnels et des personnes amputer pour coller le plus avec la réalité du marché et des ressentis de chaque. Nous pensons avoir su parer ce risque tout au long de ce projet en nous remettant souvent en question et en comparant toutes nos informations soit sur divers sites ou en demandant des conseils.

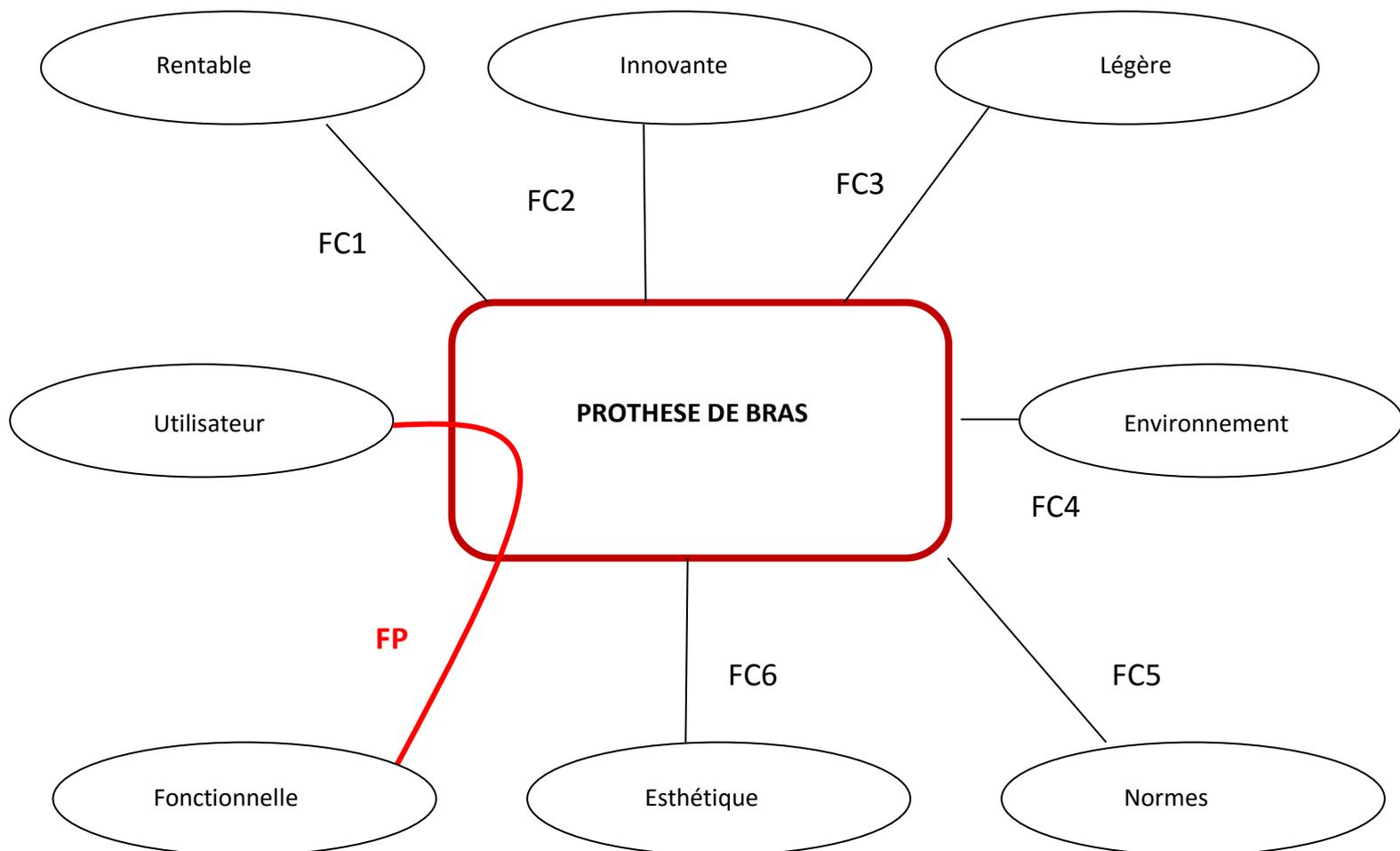
Le second risque, et non des moindres est de fournir un rapport peu complet ou inintéressant. Toute la difficulté étant de ne pas réussir à s'auto évaluer ou identifier les informations nécessaires et intéressantes pour la bonne compréhension du sujet. De ce fait, chaque

membre du groupe a lu des parties sur lesquelles il n'a pas travaillé pour ensuite donner son point de vue, discuter sur la clarté et l'utilité de ces explications dans le projet. De plus, nous avons fait lire à plusieurs personnes notre rapport pour avoir un retour d'une personne n'ayant aucune connaissance sur le sujet et l'accessibilité de celui-ci.

Enfin, le risque engendré par les commandes peut être résolu en commandant rapidement pour avoir le temps de faire des retours aux fournisseurs s'il y a des défauts ou des problèmes de communication.

e) Diagramme en pieuvre

Le diagramme en pieuvre est un outil permettant d'identifier rapidement la fonction principale (FP) du produit ainsi que les fonctions contraintes (FC) tout en mettant en relations le milieu extérieur et ses attentes.



FC : Permettre à l'utilisateur d'utiliser à nouveau son membre et le rendre fonctionnel

FC1 : Réaliser une prothèse abordable niveau coût

FC2 : Apporter une innovation en développant les fonctionnalités

FC3 : Concevoir une prothèse légère que le patient pourra supporter toute une journée

FC4 : Résister à l'environnement, chaleur, coup, frottement...

FC5 : Respecter les normes

FC6 : Ere esthétique et personnalisable pour chaque utilisateur et ses goûts

III. Anatomie

L'avant-bras est la partie des membres supérieurs comprise entre le coude et la main.

Celui-ci est constitué :

- D'un squelette comprenant 2 os qui sont l'ulna (ou cubitus) et le radius,
- Une musculature comportant vingt muscles dans 3 loges
- Une vascularisation (veines et artères),
- Une innervation (nerfs).

a) Squelette de l'avant-bras

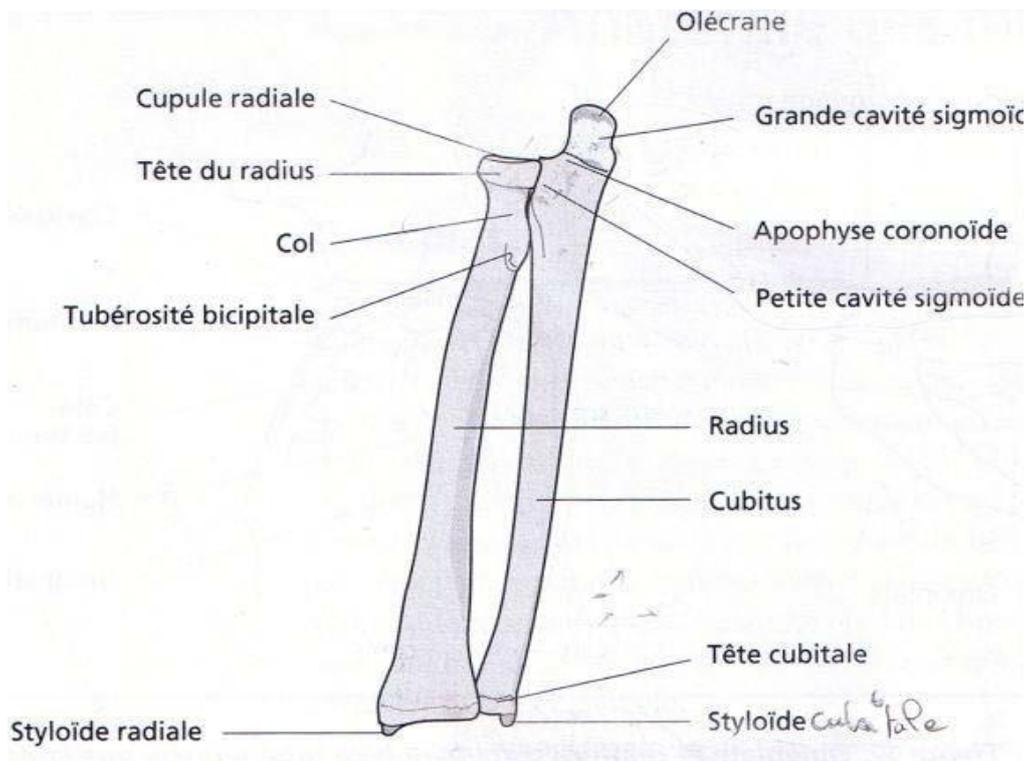


Figure 4: Schéma du radius et de l'ulna

Comme nous l'avons précisé dans l'introduction, le squelette de l'avant-bras est constitué de deux os « longs » (le squelette humain est constitué d'os longs, courts ou plats).

Ces deux os sont donc :

- L'ulna qui se trouve en position médiale, c'est-à-dire qu'il est le plus proche du tronc humain,
- Le radius qui se trouve en position latérale.

Comme nous pouvons le voir sur la figure ci-dessus, ces deux os possèdent une articulation haute avec le coude et une articulation inférieure avec la main.

Il existe aussi une membrane interosseuse permettant de garder le contact latéral entre ces deux os.

b) Musculature de l'avant-bras

L'avant-bras est constitué de vingt muscles répartis dans 3 loges qui sont les loges : antérieure, postérieure et latérale.

Ces mêmes loges sont divisées en 2 couches la couche superficielle et profonde.

1) Muscles de la loge antérieure

Les muscles se trouvant dans la loge antérieure superficielle sont :

- Le muscle rond pronateur
- Le muscle fléchisseur radial du carpe
- Le muscle long palmaire
- Le fléchisseur superficiel des doigts
- Le fléchisseur ulnaire du carpe

Les muscles se trouvant dans la loge antérieure profonde sont :

- Le fléchisseur profond des doigts
- Le long fléchisseur du pouce
- Le carré pronateur

Comme leurs noms l'indiquent, le rôle de ces muscles est de permettre une flexion des doigts de la main.

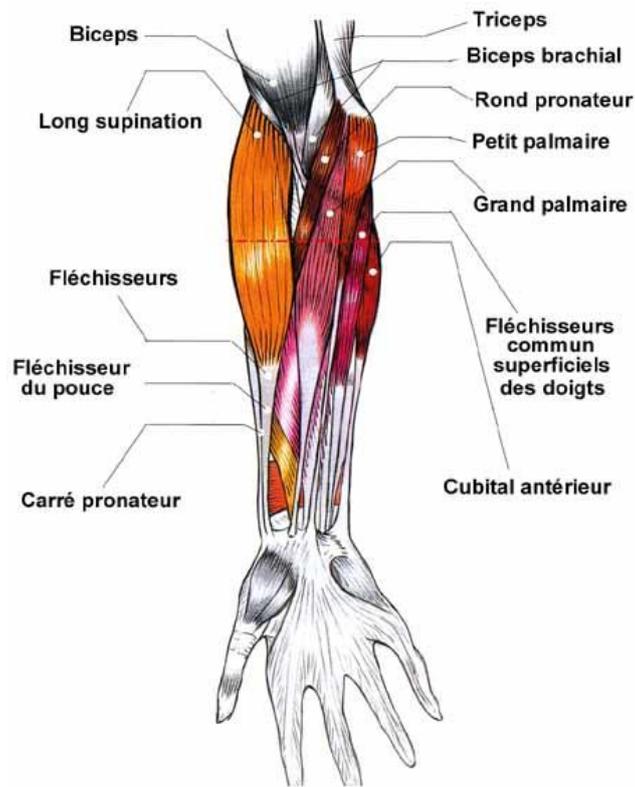


Figure 5: Schéma muscles de la loge antérieure

2) Muscles de la loge postérieure

Les muscles se trouvant dans la loge postérieure superficielle sont :

- Le muscle extenseur des doigts
- Le muscle extenseur du petit doigt
- Le muscle extenseur ulnaire du carpe
- Le muscle anconé

Les muscles de la loge postérieure profonde sont :

- Le muscle long abducteur du pouce
- Le muscle long extenseur du pouce
- Le muscle court extenseur du pouce
- Le muscle extenseur de l'index

Le rôle de ces muscles est de permettre l'extension de la main et des doigts de la main.

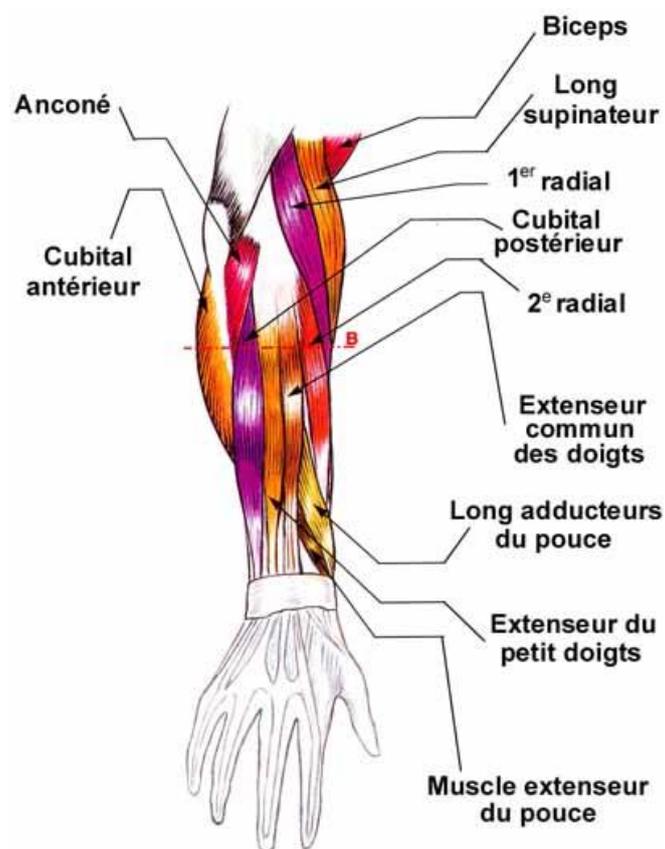


Figure 6: Schémas muscles de la loge postérieure

c) Vascularisation et innervation de l'avant-bras

Dans cette partie nous n'évoquerons que le nom et le rôle des artères, veines et nerfs que comporte l'avant-bras, sans s'attarder sur leur trajet au sein de ce dernier pour deux principales raisons : la première est qu'il est très difficile de décrire avec précision ces trajets

et que dans notre cas ces informations ne sont pas indispensables (puisque l'on travaille sur un bras artificiel et non organique).

1) Vascularisation de l'avant-bras

L'avant-bras est vascularisé par 2 artères principales :

- L'artère ulnaire (qui se trouve au niveau de l'ulna)
- L'artère radiale (au niveau du radius)

Comme pour toutes les autres artères du corps humain, celles-ci ont pour rôle d'apporter l'oxygène et les nutriments aux muscles de l'avant-bras et de récupérer les déchets.

Ces artères principales se divisent ensuite en artères de plus petites tailles que l'on appelle les artères interosseuses qui forment un réseau permettant les échanges avec les muscles.

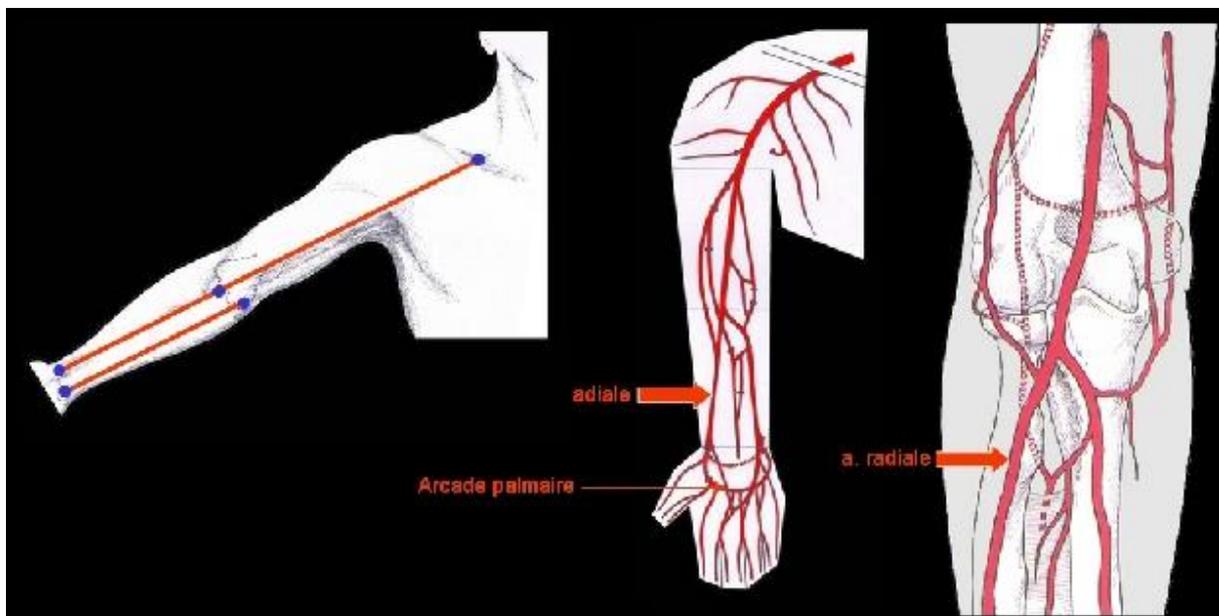


Figure 7: Schéma vascularisation

2) Innervation de l'avant-bras

Tout comme pour les muscles, les nerfs de l'avant-bras sont disposés en deux couches.

Une couche profonde où se trouve :

- Le nerf médian
- Le nerf ulnaire
- Le nerf radial

Une couche superficielle où se trouve :

- Le nerf cutané médial de l'avant-bras
- Le nerf cutané latéral de l'avant-bras
- Le nerf cutané postérieur de l'avant-bras

Le rôle des nerfs médian, ulnaire et radial (ceux de la couche profonde) est moteur : c'est-à-dire qu'il a pour rôle de commander la flexion et l'extension des muscles correspondants.

Le rôle des nerfs de la couche superficielle est cutané : c'est-à-dire qu'ils contrôlent le sens du touché (chaud, froid) pour envoyer des messages d'alerte au cerveau.

d) Squelette de la main et du poignet

L'anatomie de la main est très complexe comme l'est sa fonction aussi nous resterons simples dans la description anatomique. Située à l'extrémité de l'avant-bras ayant une fonction tactile et préhensile celle-ci se caractérise notamment par un pouce opposable aux autres doigts.

La main qui est composée au total de 27 os se divise en trois parties osseuses : le carpe, les métacarpiens et les phalanges.

Le carpe est constitué de 8 os qui sont répartis en deux rangées : la première rangée s'articule avec les deux os de l'avant-bras, le radius et l'ulna pour former le poignet. Dans la première rangée aussi appelée rangée proximale on trouve de dehors en dedans : le scaphoïde, le semi lunaire (ou encore lunatum), le pyramidal (ou encore le triquetrum) et le pisiforme.

La deuxième rangée aussi connue sous le nom de rangée distale s'articule en haut avec la première et en bas avec les métacarpiens. Dans la deuxième rangée on trouve de dehors en dedans : le trapèze, le trapézoïde, le grand os et l'os crochu.

Tous ces petits os carpiens sont mobiles les uns par rapport aux autres dans les mouvements de la main ou du poignet et sont reliés par des petits ligaments très complexes dont le plus important est le ligament scapho-lunaire.

Il est à noter qu'il n'existe pas de surface articulaire entre le carpe et l'ulna. Le triquetrum s'articule avec un disque articulaire¹ à la face inférieure de l'ulna.

Les métacarpiens sont au nombre de 5 et s'articulent en haut avec la deuxième rangée du carpe et en bas avec les premières phalanges. Ces 5 os métacarpiens constituent le squelette de la paume de la main. Il est à noter que le premier métacarpien s'articule uniquement avec l'os trapèze.

Les phalanges constituent le squelette des doigts et sont au nombre de 14 avec trois phalanges par doigt (une proximale, une moyenne et une distale) sauf pour le pouce qui n'en a que deux (une distale et une proximale).

Entre les métacarpiens et la première phalange se trouve l'articulation métacarpo-phalangienne et entre chaque phalange se trouve l'articulation interphalangienne.

• ¹ En anatomie, un disque articulaire ou un ménisque est une structure de fibrocartilage présente au sein de certaines articulations.

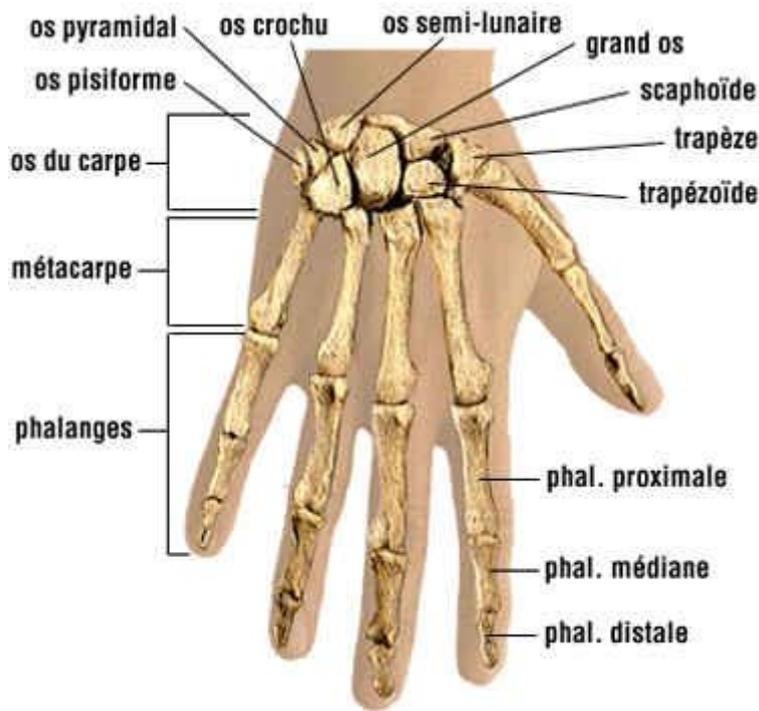


Figure 8: Schéma ossature de la main

e) Les muscles et tendons de la main

Les tendons qui circulent dans la main sont la terminaison de muscles extrinsèques qui sont situés dans l'avant-bras, et de muscles intrinsèques situés dans la main elle-même.

En avant ou en palmaire se trouvent les tendons fléchisseurs des doigts et du poignet qui passent pour la plupart dans un canal à la face antérieure du poignet : le canal carpien.

En arrière ou en dorsal se trouvent les tendons extenseurs des doigts et du poignet. Au niveau palmaire et externe se trouve un groupe musculaire intrinsèque appelé éminence thénar qui comporte plusieurs muscles dédiés au pouce.

En palmaire interne se trouve l'éminence hypothénar qui comporte des muscles dédiés au 5ème doigt l'auriculaire.

Enfin il existe des muscles intrinsèques intermétacarpiens : les interosseux. Les tendons fléchisseurs glissent dans des gaines et passent sous des poulies.

Chaque doigt sauf le pouce présente un fléchisseur superficiel et un fléchisseur profond. Le pouce présente un court et un long fléchisseur.

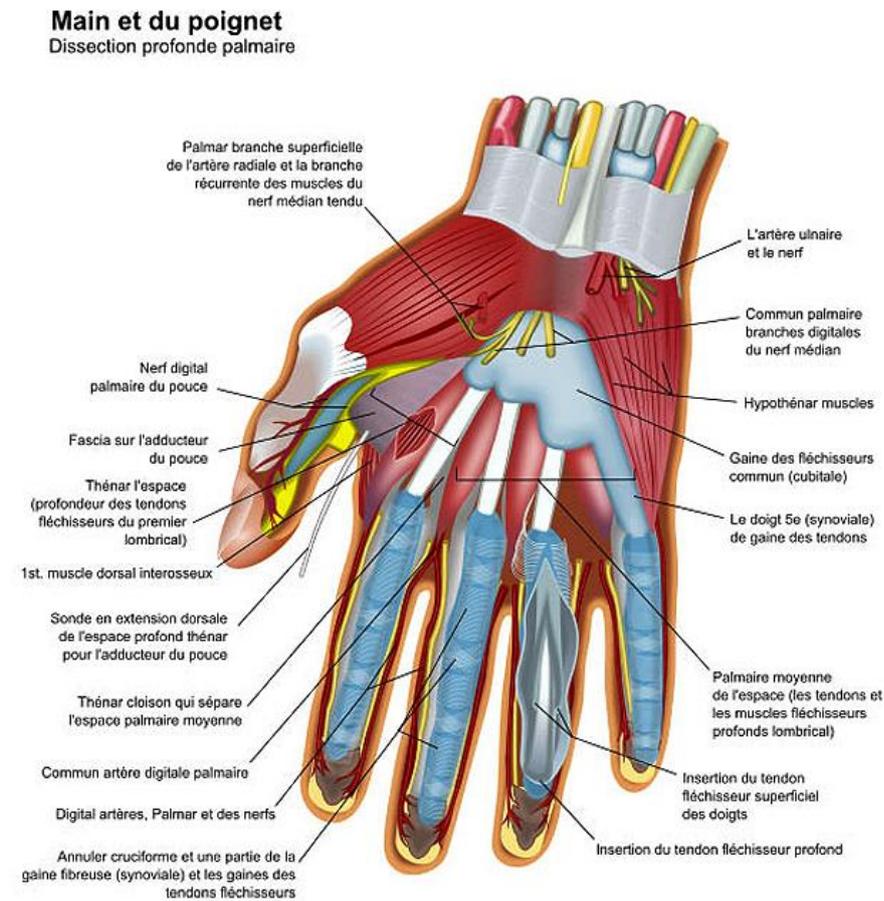


Figure 9: Schéma muscles et tendons de la main

f) Artères, veines et nerfs

Les trois nerfs principaux de la main sont le nerf médian, le nerf radial et le nerf cubital. Ces deux nerfs prennent leur origine au plexus brachial en sus claviculaire puis descendent dans le bras pour innerver la main avec des fonctions sensibles et motrices. Le nerf médian a plutôt une fonction de fléchisseur du poignet et des doigts et innerve la parie palmaire de la main et des doigts sauf le 5ème.

Chaque doigt est innervé par un nerf collatéral interne et externe issu du nerf médian pour les trois premiers doigts et la moitié du 4ème et du nerf cubital pour l'autre moitié du 4ème et du 5ème.

Les deux principales artères de la main sont l'artère radiale en externe et l'artère cubitale en interne qui se réunissent dans la paume en arcade palmaire. Chaque doigt est vascularisé par une artère et une veine collatérale interne et externe participant, avec le nerf collatéral, au pédicule vasculo-nerveux du doigt.

IV. La prothèse d'hier à aujourd'hui

a) Histoire de la prothèse

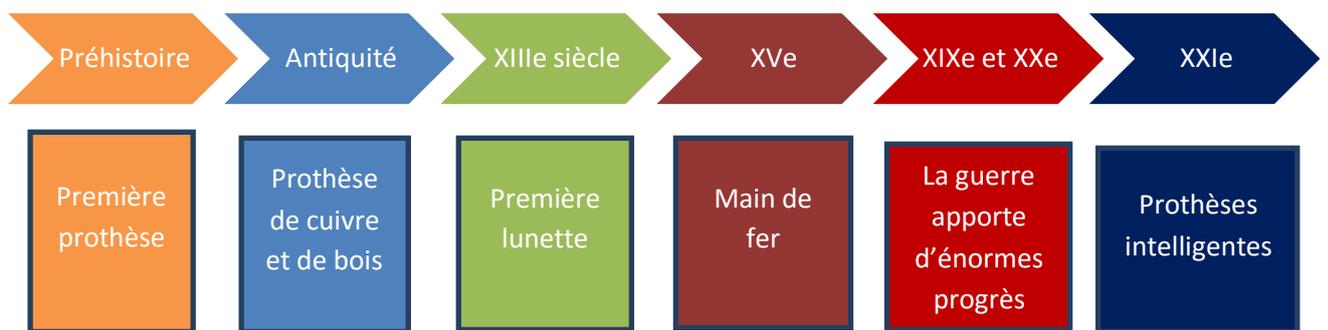


Figure 10: Historique de la prothèse

L'histoire des prothèses est évidemment étroitement liée à celle de l'humanité. Avec l'avènement de la posture sur deux membres, l'Homme s'est rendu compte que cette posture est la plus adaptée à son quotidien.

De cette manière est née la prothèse, provenant du grec *prosthêsis*, « addition ». Cela devait permettre à l'individu de retrouver un peu d'autonomie. A noter la différence avec la greffe, dont le but est de transplanter un tissu ou un organe provenant le plus généralement d'un autre individu.

Les Egyptiens étaient capables de faire des amputations et de fabriquer des prothèses. Une momie de femme datant de plus de 3000 ans, dont l'orteil du pied droit fut amputé, a été retrouvée avec une prothèse en bois lors de fouilles archéologiques. Cette dernière était constituée de trois parties maintenues par du textile et une gaine de cuir cousue.



Figure 11: Première prothèse fonctionnelle

Les traces d'usure laissent penser que cette prothèse a servi. Les chercheurs estiment qu'elle permettait d'assez bons mouvements. De plus, celle-ci a été testée en laboratoire puis reconstituée pour que l'on puisse se rendre compte de son confort ainsi que de son utilité. D'après Jacky Finch, chercheuse à l'université de Manchester, il s'agirait donc de « la première prothèse fonctionnelle au monde ».



Tout comme les Egyptiens, les Grecs et les Romains s'intéressèrent aux prothèses. En 1858, sur le site romain de Capua, au sud de l'Italie, un membre artificiel fut découvert. Fait de cuivre et de bois, ce dernier semble destiné à remplacer une amputation en dessous du genou.

Figure 12: Prothèse membre inférieur

Quant aux grecs, Hérodote écrivit dans Calliope (livre IX), vers 400 avant notre ère, l'histoire de Thereupon Hegesistratus d'Elée, qui, pour échapper aux spartes s'amputa la jambe et se fit une prothèse de bois.

C'est au XIIIe siècle que Roger Bacon inventa les lunettes, prothèses pour le visage. Contrairement à la pierre de lecture ou la loupe, elles n'ont pas besoin d'être tenues.

Néanmoins, les prothèses restent lourdes et peu fonctionnelles comme le pilon et le crochet caractéristiques des pirates.

C'est au XVe siècle, que selon le professeur de médecine de l'université de Würzburg, Gundolf Keil, apparaissent un nouveau type de prothèses. Elles sont alors « très évoluées mécaniquement et fonctionnelles. En effet, la mise au point de « la main de fer » fut une grande avancée. Cette prothèse était constituée d'une main au pouce fixe ou mobile, avec un bloc de doigts et un système d'arrêt progressif grâce à un mécanisme à ressort.



Figure 13: Cuissard

Au XVIe siècle, avec l'apparition de la poudre à canon s'en suit une croissance du nombre de blessures amenant à une amputation. C'est Ambroise Paré (1509-1590), chirurgien français, qui introduisit la cautérisation au fer chaud. Aussi, il est le précurseur des membres artificiels comme les cuissards à pilon ou les pilons articulés. Cherchant à reproduire le mouvement naturel au moyen de la mécanique, il s'aïda d'horlogers et serruriers.

Au XIX^{ème} siècle, face aux dizaines de milliers d'amputés revenant de la guerre de Sécession, les scientifiques se doivent d'apporter des solutions efficaces. En effet, de 1861 à 1865, la guerre entre les états du Nord et les états confédérés du sud est à l'origine d'un grand nombre de blessés. De plus, l'anesthésie apparaît au même moment ce qui permet de réaliser des opérations de plus longue durée.

Au cours du XX^{ème} siècle, la Première et la Seconde Guerre Mondiale furent effroyable sur le plan humain. La Première a été la cause de 30 000 amputations et durant la Seconde, des millions de blessés ont été comptabilisés. Ces catastrophes ont suscité de nombreuses avancées au niveau de l'industrie prothétique, notamment grâce à une mobilisation forte des vétérans de guerre et de l'aide financière des États-Unis.

En 1922, les premières prothèses de hanches sont inventées par les frères Jean et Robert Judet. Ces prothèses en méthacrylate de méthyle connaissent un très grand succès notamment en Angleterre, où elles prirent le nom de prothèses de Moore.

En 1950, le pied SACH est créé aux États-Unis, en caoutchouc et inarticulé, sa résistance convient particulièrement aux personnes peu actives.



Figure 14: Pied SACH



Figure 15: Genou hydraulique

En 1970 est inventé le genou hydraulique, caractérisé par le fait de pouvoir projeter la jambe vers l'avant au moyen d'un cylindre. Ce dernier, contenant un liquide propulsé par des valves, rend le mouvement plus proche du mouvement naturel.

Depuis, les avancées successives dans différents domaines comme l'informatique, la chimie des matériaux, l'électronique ou la biologie, permettent des améliorations fulgurantes dans le domaine de la prothèse. Petit à petit, les prothèses gagnent en légèreté, grâce au titane et en résistance, grâce au carbone. Elles deviennent petites et même contrôlables directement par le cerveau du patient grâce au traitement informatique comme c'est le cas du pacemaker, de la rétine électronique, de l'implant cochléaire ou encore de la peau artificielle.

Dernièrement, la prothèse tente d'intégrer des cellules vivantes cultivées en laboratoire brouillant ainsi la frontière avec la greffe.

En novembre 2005, Jess Sullivan teste le premier bras bionique du monde mis en place par le Réhabilitation Institute de Chicago. Cette nouvelle génération de prothèse permet d'être contrôlée via la pensée.

b) Législation

Les prothèses sont régies par une multitude de lois, aussi bien au niveau éthique qu'au niveau de la fabrication et de la conception. La partie la plus intéressante pour ce projet Piste étant celle portant sur la législation de la fabrication cependant, il est utile de réaliser un aperçu de la prothèse au sens éthique.

1) Au niveau de la fabrication

Le fabricant de la prothèse doit réaliser une documentation pour permettre d'identifier le dispositif concerné et le patient. Une prothèse est destinée à une unique personne, il faut donc pouvoir identifier le patient et sa prothèse. Le fabricant doit également certifier que la prothèse réalisée répond aux exigences requises.

Cependant, le choix des matériaux de l'emboîture sera déterminé par l'orthoprothésiste. Les matériaux utilisés devront être biocompatibles et non cytotoxiques. C'est-à-dire que les matériaux choisis ne devront pas interférer ou dégrader le milieu biologique et ne doivent pas être des substances nocives pour les cellules.

Par mesure de sécurité, tous les dispositifs médicaux utilisés dans la fabrication de la prothèse doivent comporter la norme CE (Communauté Européenne). De plus, l'orthoprothésiste est tenu d'informer le patient du choix des matériaux de manière écrite et orale et d'attester que tous les matériaux sont conformes à la norme ISO (Organisation Internationale de normalisation).

2) Au niveau éthique

Le corps est un instrument au service de la personne, il n'est pas synonyme de la personne.

Dans les années 80, la question du statut des prothèses fut mise en relief à travers différentes décisions rendues par le Tribunal correctionnel qui définit les prothèses comme étant de « simples choses mobilières fabriquées par l'homme ». En effet, les prothèses sont de plus en plus perfectionnées et sont susceptibles d'être assimilées comme des membres réels. La prothèse peut donc être remise en cause via un caractère accessoire.

La loi Badinter définit les prothèses comme liées à la personne. [1]

→ **La prothèse, personne par nature et par destination**

Il existe différents types de prothèses au vue de la loi Française :

- ◆ La prothèse par nature, il s'agit d'objets mis au service du corps humain de la personne lorsqu'ils sont incorporés à l'individu.
 - Une puce intelligente permettant aux personnes paralysées de retrouver une motricité, c'est une sorte de deuxième cerveau.
- ◆ La prothèse par destination, il s'agit d'objets mis au service du corps humain de la personne lorsqu'ils sont affectés à son service.
 - Un appareil dentaire amovible
 - Un chien d'aveugle qui est considéré comme une prothèse vivante au service de la personne non voyante.

→ **La prothèse, au rang de personne et d'objet**

- ◆ Au rang de personne
 - Le droit civil définit les questions de la responsabilité civile grâce à l'article 1382 relatif aux objets dont on a la garde et des dommages causés sans dommage corporel ainsi qu'à l'article 1384 qui se réfère aux dommages que l'on cause avec son corps.
 - Le droit pénal pose la question d'une atteinte corporelle à la personne ou d'un vol.
 - Le dentiste qui retire une prothèse contre la volonté du patient constitue un acte considéré comme une atteinte corporelle.
 - Si la prothèse est retirée d'un verre d'eau par un tiers contre la volonté de son propriétaire, cet acte est caractérisé de vol.

L'objet bionique peut être un objet médical dès lors qu'il poursuit une finalité médicale. De fait, des règles sont imposées pour l'importer, pour le tester avant de le mettre sur le marché.

- ◆ Au rang d'objet

Même si la prothèse constitue une personne par destination ou par nature elle constitue avant tout un dispositif médical selon le Code de la Santé Publique, et plus précisément un objet d'après l'article 52-11-1.

- Code de la sécurité sociale, toutes les prothèses ne sont pas prises en charge, de plus il distingue les prothèses (ce qui remplace) des implants (ce qui remplace) et des orthèses (ce qui assiste).
- Code civil, le statut des prothèses est ignoré. Les lois de bioéthiques relatent du respect du corps humain, l'instrument n'inspire de respect qu'en raison de sa fonctionnalité et du confort qu'il apporte.

Le risque avec les prothèses bioniques repose sur le fait qu'elles pourraient amener des faits inhumains et rendre certains individus surpuissants.

c) Contexte économique

1) Définition

Pour définir de manière précise ce qu'est une prothèse, nous nous sommes appuyés sur l'article L5211-1 du Code public qui précise :

« On entend par dispositif médical tout instrument, appareil, équipement, matière, produit, à l'exception des produits d'origine humaine, ou autre article utilisé seul ou en association, y compris les accessoires et logiciels nécessaires au bon fonctionnement de celui-ci, destiné par le fabricant à être utilisé chez l'homme à des fins médicales et dont l'action principale voulue n'est pas obtenue par des moyens pharmacologiques ou immunologiques ni par métabolisme, mais dont la fonction peut être assistée par de tels moyens. Constitue également un dispositif médical le logiciel destiné par le fabricant à être utilisé spécifiquement à des fins diagnostiques ou thérapeutiques.

Les dispositifs médicaux qui sont conçus pour être implantés en totalité ou en partie dans le corps humain ou placés dans un orifice naturel, et qui dépendent pour leur bon fonctionnement d'une source d'énergie électrique ou de toute source d'énergie autre que celle qui est générée directement par le corps humain ou la pesanteur, sont dénommés dispositifs médicaux implantables actifs. »

2) Étude de marché

Le marché mondial des prothèses et matériels orthopédiques représentait 33 milliards de dollars en 2011, équivalent à environ 24,8 milliards d'euros. Ce dernier a progressé de 5% par rapport à 2010. Ce marché comprend la plasturgie, la céramique et les métaux. Les parties du corps représentant le plus de ventes sont, par ordre décroissant : la colonne vertébrale, avec 23% du marché global, culminant à 5,8 milliards d'euros, le genou à 5,5 milliards d'euros et la hanche avec 4,5 milliards d'euros.

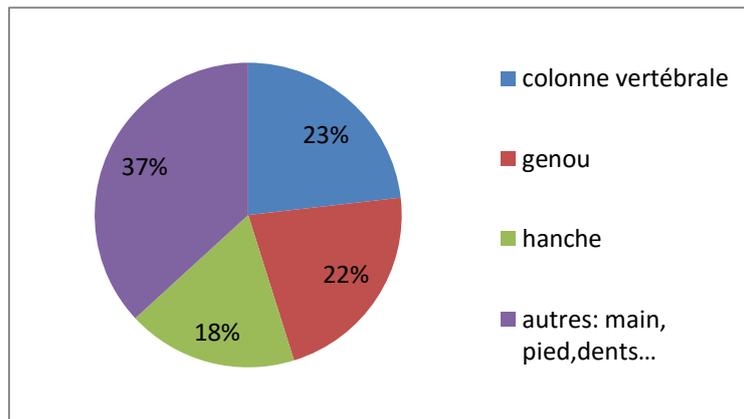


Figure 16: Comparaison des parts de marché des différentes prothèses

La plus forte augmentation concerne le marché des prothèses des extrémités, comme la main, connaissant une hausse de 12% au niveau mondial, atteignant le milliard d'euros.

En France, en 2010, d'après le ministère de l'industrie, le marché des dispositifs médicaux et des dispositifs de diagnostics est estimé à 19 milliards d'euros, dont 938 millions générés par les produits et prothèses orthopédiques. Sur le podium des marchés européens des dispositifs médicaux, la France se place deuxième, forte d'une part de 20%, derrière l'Allemagne et devant le Royaume-Uni.

Il est cependant important de noter qu'après une progression de 9% de 2010 à 2012 de l'activité des fabricants d'implants, 2013 marque un coup d'arrêt avec seulement 0,5% de progression et 2014 avec une récession de -2%. La première cause serait la conjoncture économique morose et le montant élevé du reste à charge pour la pose de prothèses et d'implants, ce qui par ailleurs, favorise le développement des prothèses imprimées en 3D.

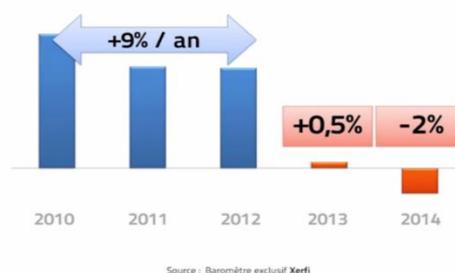


Figure 17: Baromètre d'activité des fabricants de prothèses

D'après le Syndicat national de l'industrie et des technologies médicales, le secteur rassemble près de 1100 entreprises, majoritairement des PME.

Le président de CF plastiques, Franck Laubé, fait le constat que « le marché des dispositifs médicaux implantables affiche une belle croissance de près de 20% par an. La France est en effet bien reconnue dans le monde, grâce à un savoir-faire technique de qualité. ». Franck

Simon, chargé de projet au pôle des technologies médicales de Saint-Etienne, semble partager le même avis. Il affirme même que « la France, avec les États-Unis, l'Allemagne et le Japon forme le quatuor de tête ».

Les raisons qui mènent à de telles avancées sont une population vieillissante et des systèmes de santé très organisés. En France, le U de CHU signifie « universitaire ». Les professeurs, également chercheurs, doivent fournir des travaux de recherche à leurs élèves qui sont avides de nouvelles connaissances pour améliorer la vie du patient.

La Chine, le Brésil et certains pays du golfe Persique, notamment le Qatar et les Émirats arabes unis, ont un marché des dispositifs médicaux en forte hausse. Le niveau de vie a augmenté et, en même temps que lui, la qualité des soins. »

3) Concurrence

Le marché français a pour objectif de se maintenir au sein de la course à l'innovation sur le plan international. En février 2013, trois entreprises de ce secteur, Fag Médical, Sober et Ormihl-Danet ont fusionné sous le nom d'Altéor afin de devenir le numéro deux du marché français. Cependant, cet élan d'innovation se voit freiné par la concurrence des pays fabricants des dispositifs bon marché et à faible valeur ajoutée, comme par exemple la Chine et l'Inde. Au cours de l'année 2010, le cabinet d'audit et de conseil Ernst and Young a estimé que la France exportait environ 44% des dispositifs médicaux qu'elle fabriquait. L'exportation s'impose donc comme un levier de croissance déterminant pour les PME françaises. Les États-Unis, premier marché des technologies médicales au monde, étaient le premier client de la France, avant d'être remplacés par les Pays-Bas.

Entre 2005 et 2006, l'entrée en vigueur des réformes de tarification et une politique restrictive de coût a eu pour conséquence l'augmentation de la prise en charge par les complémentaires santé et par le patient des coûts liés au dispositif médical. Avec 10 milliards d'euros de budget, la réforme « Hôpitaux 2007 » participe à la redynamisation du marché des dispositifs médicaux.

V. Processus de fabrication de la prothèse

a) Comparaison des différentes prothèses

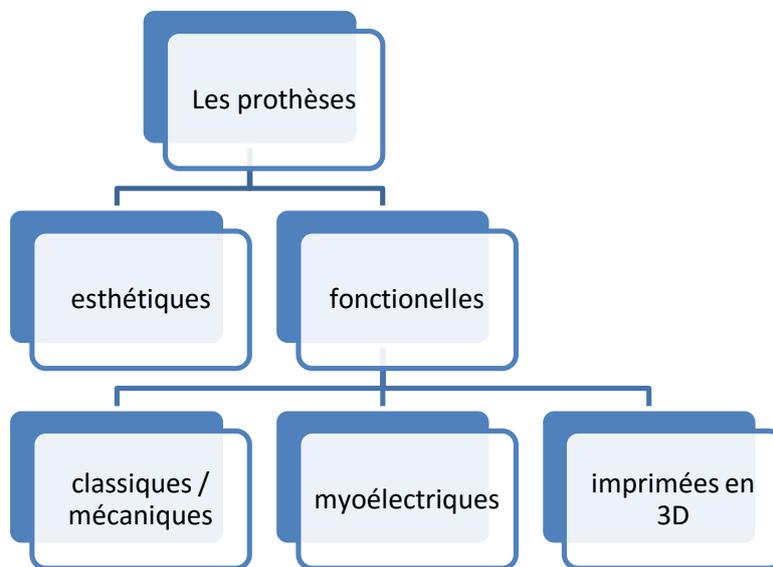


Figure 18: Organigramme des différents types de prothèses

Quel que soit le type de prothèse, la prothèse est constituée d'un système de fixation qui est choisi en fonction du patient, avec un manchon ou non, avec des matériaux différents qui dépendent de la sudation et des réactions cutanées possibles.

1) Les prothèses esthétiques

Les prothèses esthétiques reproduisent la forme et l'aspect du membre manquant afin de restituer au mieux l'image du corps.

Elles sont essentiellement appréciées par les patients qui recherchent une compensation esthétique mais sans le côté fonctionnel. Ce type de prothèse est principalement demandé pour son adaptation rapide, sa légèreté, sa ressemblance avec un membre réel et son coût, comme nous l'ont indiqué les docteurs Labourot et Pat de



Figure 19: Prothèse esthétique

l'hôpital de Roubaix.

Recouvertes d'une mousse qui reproduit la forme et la texture de l'avant-bras, elles sont adaptables à chacun en fonction de sa morphologie, pilosité et couleur de peau. L'imitation de la texture de la peau est possible grâce à un revêtement en PVC ou en silicone.

2) Les prothèses fonctionnelles

i. Les prothèses classiques/mécaniques



Figure 20: Prothèse mécanique

Contrairement aux prothèses précédentes, les mécaniques sont privilégiées pour les personnes préférant le côté fonctionnel de la prothèse à l'esthétique. Les prothèses mécaniques sont des appareillages fonctionnels et solides, qui permettent d'accomplir de façon autonome des tâches de la vie quotidienne. Elles sont particulièrement intéressantes pour effectuer des travaux physiques nécessitant de la force ou bien des prises spécifiques, dans tout type d'environnement. Ces prothèses peuvent être

utilisées avec différents dispositifs terminaux interchangeable tels que des mains, crochets, pinces,

ii. Les prothèses myoélectriques

Les prothèses myoélectriques rendent la vie des patients plus autonome. Etant alimentées par diverses énergies (solaire, batterie, dynamo...), il est possible de détecter la tension électrique créée par les contractions des muscles, de l'ordre de quelques microvolts sur la peau. Pour cela, des électrodes sont placées à l'intérieur de l'emboîture qui détectent les contractions musculaires, les amplifient et les transfèrent au système électronique de la prothèse sous forme de signaux de contrôle. Il est important d'amplifier les signaux car les muscles du bras sont atrophiés dû à la perte de l'avant-bras.

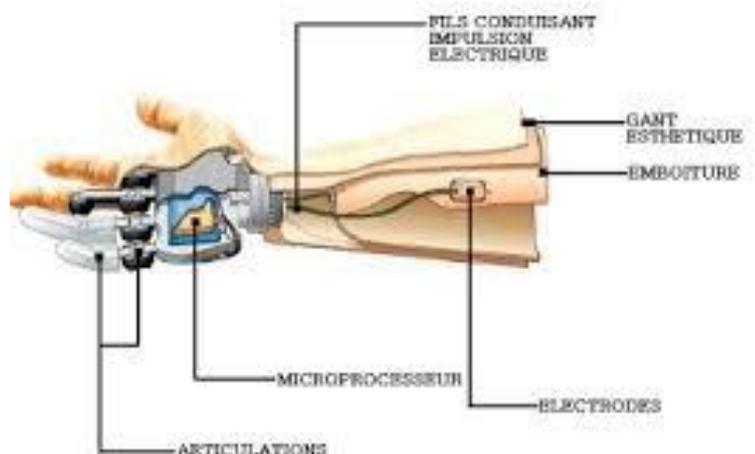


Figure 21: Prothèse myoélectrique

De plus, il est possible de contrôler la force de pression de la main. C'est-à-dire que la personne peut serrer fort son poing mais également réaliser des tâches délicates.

Le principal inconvénient de cette prothèse réside en son adaptation par la rééducation qui peut demander plusieurs années. L'objectif est de trouver les réglages qui correspondent le mieux à la personne. Pour cela, il existe des hôpitaux de jour qui permettent l'apprentissage et l'entraînement pour que chaque patient se sente au mieux avec sa prothèse. [2] [3]

3) Comparaison des prothèses myoélectriques

Nous allons principalement nous intéresser aux prothèses myoélectriques qui semblent être les plus complètes.

Prothèses	BEBIONIC	I-LIMB	MICHELANGELO
Positions /gestes	14 gestes avec différentes vitesses possibles	8 positions de doigt, possibilité d'en programmer d'autres via Apple store	8 positions de poignets + 1 partie pour adaptation libre du poignet
Vitesse	Plusieurs possibles	217mm/s	325mm/s
Mouvements	Flexion et extension des doigts Il n'est pas possible de saisir des objets entre les doigts		Flexion et extension Ecarte et resserre (saisir des objets entre les doigts)
Contrôle du pouce	Pouce motorisé, 1 seule position possible mais avec différents degrés possibles		Pouce motorisé Possibilité de bascule latérale et oppositionnelle
Connexions	Unité du poignet coaxiale extérieure compatible avec d'autres terminaux myoélectriques	Unité du poignet coaxiale extérieure compatible avec d'autres terminaux myoélectriques 8 entrées différentes pour les connexions	Connexion Bluetooth
Autres avantages	Fonction auto grip Peut soulever jusqu'à 45kg Convient surtout à des athlètes	Très minutieux (faire les lacets...)	Dynamique et facile d'utilisation Possibilité de moduler avec différentes parties (toutes les pièces sont adaptables)

Figure 22: Tableau comparatif des prothèses myoélectriques sur le marché

Il est difficile de définir une prothèse « idéale » car chaque patient formule des attentes différentes face à ce nouveau membre.

Les athlètes et sportifs préféreront sûrement la Bebionic par la vitesse qu'elle peut générer et la possibilité de soulever de lourdes charges. Le coût pour se munir de cette dernière selon les niveaux de finitions souhaitées est de l'ordre 25 000€ à 35 000€.

La Michel Angelo et l'I-Limb visent le même public. Néanmoins, l'avantage procuré par la Michel Angelo est de pouvoir réaliser plus de mouvements fins. Il y a de grandes chances pour que son choix soit favorisé dans les pays asiatiques pour manger avec des baguettes par exemple ce qui n'est pas possible avec les autres prothèses. De plus la Michel Angelo est plus rapide que l'I-Limb. [4]

En ce qui concerne l'I-Limb, elle convient à un large public qui souhaite retrouver la fonctionnalité du membre manquant, elle est connectée via une application sur les Smartphones avec la possibilité de choisir ses mouvements préférés ce qui permet un large panel de mouvements à ses utilisateurs.

Les prothèses myoélectriques sont en pleine essor mais cependant avec un coût important. Leur prix est compris entre 35 000€ et 45 000€ pour l'I-Limb et entre 52 000€ et 57 000€ pour la Michel Angelo. C'est donc pour cela que les prothèses imprimées en 3D se développent de plus en plus. Les fichiers de programmation sont trouvables en open source sur internet, il est donc possible d'imprimer soit même une prothèse à moindre frais sans forcément avoir des connaissances dans ce domaine.

En effet, il est possible de trouver sur le marché des prothèses myoélectriques imprimées en 3D avec un coût de fabrication inférieur à une centaine d'euros tandis que d'après le Bulletin Officiel de la République Française n°2001-30 fixe une base de remboursement de ce type de prothèse d'avant-bras à hauteur de 6 000€ pour un adulte et 9 000€ pour un enfant. [5]

C. - NOMENCLATURE ET TARIF DES PROTHÈSES DU MEMBRE SUPÉRIEUR
MUES PAR ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DITES PROTHÈSES MYOÉLECTRIQUES
Les tarifs en euros sont applicables à compter du 1er janvier 2002

CODE	NOMENCLATURE	TARIFS	
		En euros	En francs
§ 1. - PROTHÈSES POUR ADULTES			
	Prothèse d'avant-bras mue par énergie électrique, double emboiture, trois batteries (moulage non compris, chargeur non compris, gant non compris)	6 312,53	41 407,46
	Prothèse de bras, coude mécanique, avant-bras myoélectrique incluant la main myoélectrique, double emboiture, trois batteries (moulage non compris, chargeur non compris, gant non compris)	7 013,92	46 008,31
§ 2. - PROTHÈSES POUR ENFANTS OU POUR ADOLESCENTS			
	Prothèse d'avant-bras mue par énergie électrique, double emboiture, trois batteries (moulage non compris, chargeur non compris, gant non compris)	9 118,10	59 810,80
	Prothèse de bras, coude mécanique, avant-bras myoélectrique incluant la main myoélectrique, double emboiture, trois batteries (moulage non compris, chargeur non compris, gant non compris)	9 819,49	64 411,62

Figure 23: Coût officiel prothèse myoélectrique

4) Les prothèses imprimées en 3D



« Maxence a reçu « une main colorée aux couleurs de son choix, de super héros, qu'il pourra enlever à sa guise. Ce sera ludique pour lui dans la cour de récré avec les copains », explique la maman de Maxence, six ans, né sans main droite. Le petit garçon a été équipé lundi d'une prothèse de main imprimée en 3D, qu'il peut attacher avec du velcro et qu'il a personnalisée avec un grand « M » dessus pour « super Max ». » [6]

La Nouvelle République

Figure 24: Maxence et sa prothèse imprimée en 3D

Les prothèses imprimées en 3D sont appréciées par un grand public mais surtout par les enfants. En effet, étant entièrement personnalisables et plus abordables, elles permettent aux enfants de ne plus être contraints de porter une prothèse qui ne leur convient pas et la changer régulièrement tout au long de leur croissance ou leur goût. En effet ces dernières deviennent de réels accessoires de modes ou d'image de la personnalité de la personne qui les portent.

b) Aspects techniques

1) Matériaux

Le modèle de prothèse I-Limb Quantum, décrit précédemment, crée par la société Touch Bionic est perçue comme l'une des meilleures prothèses biomécaniques à ce jour.

Cette prothèse est apte à porter des charges allant jusqu'à 90kg, cela dépend, néanmoins de la taille du modèle commandé. On y retrouve des pièces en thermoplastique. Certaines sont imprimées en 3D. De plus, le châssis en aluminium garde une certaine légèreté tout en augmentant la durabilité de la prothèse et sa capacité de charge (jusqu'à 90kg donc) et avec une capacité de charge des doigts allant jusqu'à 32kg. La différence étant que chaque doigt est contrôlé individuellement, et est motorisé. Le pouce et le poignet étant articulés manuellement ou électroniquement.

Certaines prothèses sont même équipées d'un revêtement en silicone, qui permet de recréer l'apparence de la main en haute définition, pour la rendre encore plus discrète.

La conception de notre prothèse ne sera pas aussi performante bien évidemment, mais le choix du matériau étant une partie clef de la conception, nous allons au préalable étudier les divers matériaux possibles pour une impression en 3, c'est-à-dire les polymères thermoplastiques et les polymères thermodurcissables.

Les polymères possèdent de nombreux avantages :

- Ils sont relativement légers (en effet leur masse volumique est $< 1,5 \text{ t/m}^3$)
- Ils sont souples (le module d'Young est généralement en dessous de 3GPa. A titre de comparaison, on a 20GPa pour le béton, 70 pour l'aluminium, et 200 pour l'acier)
- Sauf cas particuliers, ce sont de très bons isolants thermiques et électriques
- A température ambiante, leur structure reste stable (puisque'ils ne se ramollissent qu'à des températures entre 100 et 250°C).

Pour fabriquer un objet, on doit connaître les matériaux qui le composent. Pour notre prothèse imprimée en 3D, le matériau principal est le plastique. Il en existe diverses sortes présentes sur le marché :

→ **L'ABS :**

La star des plastiques d'impression (ou acrylonitrile butadiène styrène)

C'est le plus utilisé des matériaux d'impression 3D. On le retrouve au quotidien (par exemple dans les célèbres briques Lego, mais aussi dans les carrosseries automobiles, les appareils ménagers etc...).

Il s'agit d'un thermoplastique avec une base d'élastomère qui le rend plus résistant aux chocs et plus souple.

Propriétés :

Une température de fusion à 250°C, et stable entre -20 et 80°C ce qui est très suffisant pour une utilisation au quotidien.

Non biodégradable, il rétrécit au contact de l'air, d'où le chauffage des surfaces d'impression pour éviter tout décollement.

→ **Le PLA :** (polymère acide polylactique)

Plus difficile à utiliser en raison de sa grande vitesse de refroidissement, il reste une bonne alternative pour l'impression 3D et est issu de matières organiques renouvelables (comme l'amidon du maïs) donc biodégradable. On peut réaliser des pièces d'une plus grande précision mais nécessitant de l'acier inoxydable pour la tête d'impression.

Propriétés :

Sa température de fusion à 185°C. Sa durabilité est en revanche sensiblement réduite au contact de l'eau, mais ne nécessite pas de surface chauffante pour l'imprimante 3D.

La résistance à la chaleur est également moins élevée.

Le PLA peut être mélangé à quasiment tous les matériaux :

- Le PHA (un autre poly-ester 100% biodégradable)
- La fibre de bois (pour obtenir un matériau très ressemblant au bois)
- La fibre de bambou
- La brique (pour un effet grès)
- Le bronze, le cuivre pour des sortes d'alliages plus lourds
- Le carbone pour des pièces ultra solides et légères.

→ Le Nylon et autres polyamides :

Les polyamides sont réalisés à partir de poudres plastiques, mais le Nylon présente l'avantage d'être utilisable avec la plupart des imprimantes 3D car il utilise la technique de dépôt de la matière fondue, comme pour l'ABS ou le PLA.

Grâce à leur non-toxicité, comme pour le PLA, les polyamides sont utilisables pour les objets étant en contact avec les aliments (sauf alcools), comme pourrait l'être notre prothèse de main.

Propriétés :

Pour le nylon 618, le plus utilisé dans l'impression 3D, la température idéale de fusion est de 245°C.

De plus, on peut obtenir des surfaces plus lisses, permettant une plus haute qualité de finition, ce qui explique qu'il soit beaucoup utilisé dans l'industrie (engrenages, moules, et surtout prothèses médicales !)

Enfin le Nylon est inodore en impression contrairement à l'ABS, et sa résistance au choc est la plus élevée.

→ L'Alumide : (mélange en aluminium en poudre et polyamides)

Il s'agit d'un matériau très solide résistant au choc, qui ne se trouve pas sous forme de bobines contrairement au Nylon, à l'ABS ou au PLA, mais sous forme de poudre granuleuse nécessitant un procédé d'impression différent (technologie du frittage sélectif par laser).

Propriétés :

Plus lourd, ce matériau offre une moins grande souplesse, mais une résistance accrue. Sa résistance à la température est également bien plus élevée puisqu'elle atteint 170°C. En revanche, l'Alumide est plus couteux et nécessite un traitement post-impression, de fraisage ou polissage et n'est pas vraiment destiné à un usage quotidien mais plutôt à la conception de coques de protection.

→ Les Résines :

Idéales pour les finitions, les résines thermoplastiques ou thermodurcissables, offrent une précision et une douceur de la surface très élevée. Elles offrent également des possibilités multiples que ce soit pour des pièces brillantes, mates, ou translucides.

Néanmoins ces résines sont davantage conçues pour la réalisation de petites pièces, et pour les objets de décoration, car leurs propriétés mécaniques ne sont pas très performantes.

Les pièces sont plus esthétiques mais moins résistantes, aux chocs et à la chaleur.

→ Le PET : (polyéthylène téréphtalate)

Pour simplifier on peut décrire le PET comme un polymère de pétrole raffiné. On l'utilise pour la fabrication des bouteilles plastiques. C'est un matériau transparent, et cristal.

C'est un matériau assez léger et rigide, de plus en plus utilisé dans l'impression 3D, et plus seulement dans l'industrie.

Propriétés :

Le PET a une température de fusion de 245°C

De plus il s'agit d'un matériau recyclable

Cependant, il existe une controverse au niveau de la toxicité des phtalates, et bien que le PET ne contienne, contrairement au PVC, aucun phtalate, son utilisation est sujette à discussions.

→ Le Polypropylène : (PP)

Il s'agit d'un thermoplastique lui aussi très utilisé dans l'industrie et désormais utilisable pour l'impression 3D. Ses domaines d'utilisation sont très nombreux (automobile, vêtements jetables, emballages plastiques, etc...)

Il possède d'excellentes propriétés anti-abrasives (c'est-à-dire résistants à l'usure et aux frottements) et de résistance aux chocs.

Propriétés :

Sa température de fusion de 145°C

Facilement recyclable, et reconnu pour sa flexibilité et sa rigidité, le PP est en revanche peu résistant aux changements de températures, et est plus sensible que les autres aux UV, ce qui

doit être pris en compte pour notre prothèse. Néanmoins, des dérivés existent offrant une plus grande résistance à la chaleur (jusqu'à 130°C) ou à l'humidité selon les différentes marques sur le marché.

→ Autres filaments :

Il existe beaucoup d'autres matériaux, on peut citer le XT Copolyester spécialement conçu pour l'imprimante 3D, sans odeur, translucide, et très solide. Le TPE, un élastomère thermoplastique, aux propriétés uniques car d'une très grande souplesse, mais parfois dur à imprimer en raison de sa texture presque caoutchouteuse ; on ne peut néanmoins pas l'utiliser dans le cadre de notre prothèse.

Mais il en existe encore beaucoup d'autres sur le marché, et leurs propriétés varient selon les fabricants.

[7] [8] [9] [10]

2) Capteurs

Pour permettre à l'utilisateur d'une prothèse de faire les mouvements qu'il souhaite, il est primordial de réussir à récupérer l'information envoyé par le cerveau. Pour ce faire, des capteurs doivent percevoir les signaux musculaires à leur intensité maximale. Ces derniers sont appelés les signaux myoélectriques ou électromyogrammes (EMG) et sont enregistrés au niveau des muscles. L'interprétation de ces signaux peut être utilisée pour de nombreuses applications, notamment le contrôle de mains ou bras artificiels. [11]

Un électromyogramme est un potentiel généré au niveau des fibres musculaires quand les muscles sont contractés. C'est le système nerveux central, c'est-à-dire le cerveau et la moelle épinière, qui contrôle le muscle en agissant sur l'ensemble des fibres musculaires. Pour détecter ces signaux, il existe deux types de capteurs. Les électrodes à aiguille, qui touchent directement la fibre musculaire et permettent d'obtenir le signal émis par une seule fibre. Ces dernières présentent un inconvénient car elles abîment la peau et le tissu musculaire (utilisées pour diagnostiquer des maladies). Aussi, les électrodes de surface, qui sont fixées sur la peau au niveau du muscle ciblé. Ces dernières permettent de récupérer le signal fournit par un ensemble de fibres musculaires. Elles sont bien plus simples à utiliser que les électrodes à aiguille.

De plus, il existe deux types d'électrodes de surface. Les électrodes humides, à base de gel Ag/AgCl, qui maintiennent l'impédance électrique² désirée mais leur usage est unique et leur

² Les tissus du corps humains peuvent être représentés par une succession de résistances R et de réactances (inductances et capacités) X, le tout constituant une impédance Z : $Z^2=R^2+X^2$

durée de vie est courte. Les électrodes sèches qui sont constituées principalement d'acier inoxydable. Même si elles sont réutilisables, elles possèdent une impédance électrique haute et instable. La présence de sueur modifie leurs caractéristiques. En effet, elle fait décroître facilement l'impédance de ses dernières et déforme légèrement le signal myoélectrique capté.

L'étude des signaux EMG consiste en la reconnaissance de des zones actives au cours des mouvements mais aussi d'estimer les états des muscles au niveau de leur force mais aussi de leur fatigue. C'est ainsi que l'on peut identifier les activités motrices fonctionnelles rencontrées dans notre vie quotidienne (écrire, se coiffer, etc.) à l'aide des signaux myoélectriques de surface. Il est alors tout à fait possible d'utiliser ses signaux pour commander des bras robotiques. La prothèse EMG utilise ces signaux générés par les muscles partiellement perdus par l'amputé. Elle repose sur le fait que celui-ci a conservé une partie des fonctions que possédait son membre.

Les premières études de mains contrôlées par électromyogrammes de surface ont été menées juste après la seconde guerre mondiale. Malgré les évolutions, ces dernières ne sont pas totalement satisfaisantes. Les prothèses de main actuelles sur le marché, par exemple, permettent aux patients de faire des commandes simples, comme ouvrir ou fermer la main.

Les mains artificielles peuvent être commandées en utilisant deux types de signaux :

- **Les mouvements simples :**
 - **Les mouvements du poignet :** la supination, la pronation, la flexion ou encore l'extension.
 - **Les mouvements des doigts :** la flexion et l'extension du pouce ou d'un ensemble de doigts
- **Les mouvements préhensiles**, qui permettent de prendre, de saisir des objets. Il existe quatre types majeurs de saisies qui dépendent de la forme de l'objet :
 - La saisie cylindrique,
 - La saisie sphérique
 - La saisie latérale,
 - Le pincement.

Ces mouvements font intervenir une coordination des mouvements au niveau de plusieurs articulations. Ils varient d'un patient à l'autre. C'est pour cela qu'il faut saisir le mouvement de l'individu pour pouvoir le restituer au niveau de la prothèse. D'où le fait que la saisie se réalise au niveau du membre intact pour une personne amputée. Cette saisie se fait grâce à une caméra ou un gant de données.

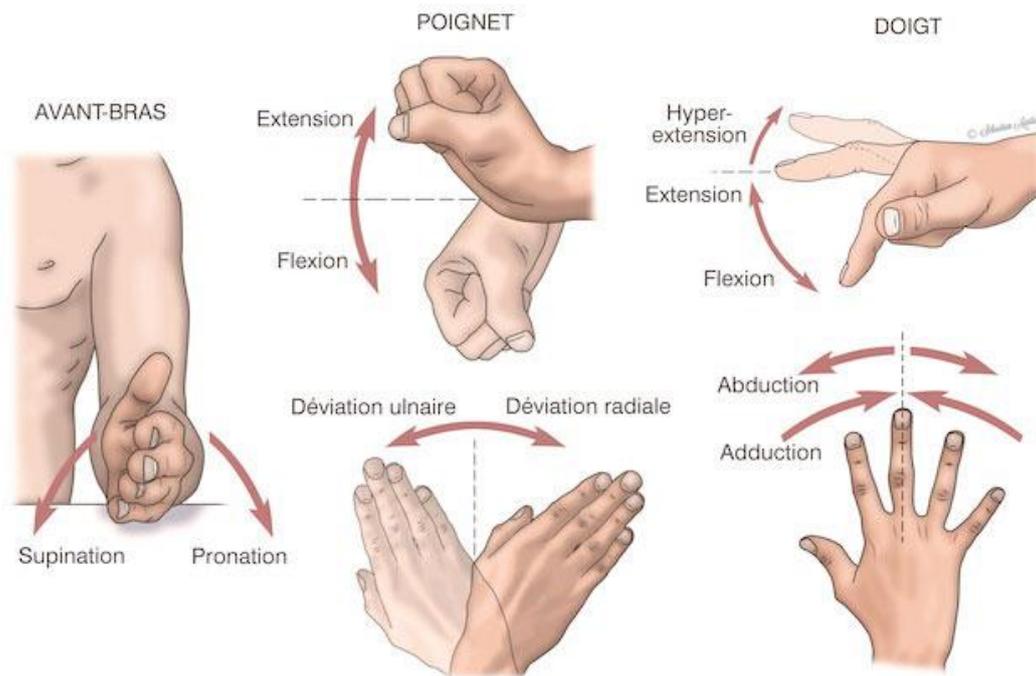


Figure 25: Mouvements de la main et du poignet

Une fois que le mouvement est déduit à partir du signal EMG, un mécanisme de contrôle vérifie, à l'aide de capteurs de position et de capteurs de force, qu'il est correct, ce qui permet de le corriger. Ce système facilite la saisie d'objets par l'utilisation de capteurs qui mesurent les angles de variation et la force entre la main artificielle et l'objet.

Les signaux myoélectriques de surface sont complexes car ils sont bruités. Ainsi, ils doivent subir plusieurs traitements. Tout d'abord, il faut filtrer le signal. L'amplitude des électromyogrammes détectés est de 10mV maximum. La détection de ces signaux est affectée par le bruit (changement de température, choc au niveau des électrodes, etc.) ou les inductions électrostatiques³ et électromagnétiques⁴ engendrées par les sources d'alimentation électriques. Aussi, la peau atténue le signal dans le cas des EMG de surface. Pour remédier à cela le signal est amplifié et filtré. Il existe également l'effet Cross-Talk qui bruit le signal (pouvant être traduit par « brouhaha »). Il est dû aux interférences entre les signaux EMG émis par les muscles qui se trouvent au voisinage de l'électrode de mesure. Il empêche d'avoir un signal propre à l'activité du muscle mesuré. Là aussi, le signal est filtré de manière à réduire au maximum cet effet.

Suivant les individus, la même information n'indique pas la même interprétation. En effet, cette spécificité est due aux variations existantes entre les patients, parmi lesquelles on

³ Phénomène engendré lorsqu'on approche un corps chargé d'un corps conducteur neutre et qu'il n'y a pas de transfert de charges réelles

⁴ : Phénomène physique conduisant à l'apparition d'une force électromotrice dans un conducteur électrique soumis à un flux magnétique variable

retrouve les variations physiques (la taille, la corpulence) et les variations psychologiques (aptitude cognitive*, réponse conditionnée, apprentissage moteur). De plus, dans le cas de la commande d'une main ou d'un bras artificiel, les signaux mesurés seront différents suivant que l'opérateur est amputé ou non. Les muscles endommagés des amputés deviennent plus faibles et la quantité de tissu gras augmente en retour après l'amputation. Ceci conduit à un affaiblissement des signaux EMG et à un signal plus bruité. On en déduit le fait que l'adaptation est le principal problème dans la reconnaissance des formes. Il est en effet nécessaire de s'adapter aux différences pouvant être significatives entre les signaux tout en gardant une adaptation universelle, une généralisation.

Les signaux peuvent subir des modifications au cours du temps. Les évolutions à long terme s'effectuent au niveau du patient ou des appareils de mesure. On trouve parmi elles les modifications dues à la détérioration des machines telle que l'abrasion. Ces changements progressent très lentement et peuvent être facilement traités grâce à des ajustements mineurs. Les évolutions à court terme sont dues à des modifications du patient. En effet, la connaissance sur l'apprentissage moteur en psychologie et en éducation physique montre que l'être humain modifie ces gestes entre la période d'apprentissage et le moment où la technique est bien enregistrée. Cette période d'apprentissage doit être prise en compte dans le cas de la commande d'une main ou d'un bras robotique. Tout être humain doit alors être considéré comme débutant. Il faut aussi ajouter d'autres variations physiologiques qui modifient le signal myoélectrique au cours du temps, tout comme la sueur qui peut altérer le signal au cours de l'effort physique ou même les muscles qui ne produisent plus les mêmes signaux au fur et à mesure que la fatigue arrive.

Il existe un tout autre moyen mis au point ces dernières années pour contrôler des membres bioniques. Grâce à la collaboration entre la recherche technologique et chirurgicale, des prothèses directement connectées au cerveau vont révolutionner la vie des personnes amputées ou paralysées. La connexion entre l'homme et la machine se fait directement sur le système nerveux. Ainsi, le patient est en mesure de reproduire les gestes auxquels il pense en temps réel. Cependant, l'utilisation de cette nouvelle technique est loin d'être instinctive, une adaptation de la part des utilisateurs est nécessaire. Aux Etats-Unis, la recherche sur ses neuroprothèses est focalisée sur les personnes tétraplégiques. Il est nécessaire de connecter la machine directement à la source des signaux, c'est-à-dire au niveau du cerveau. L'université de Brown a mis au point ce dispositif permettant à une personne totalement paralysée de commander par la pensée un bras robotisé. Ce dispositif est implanté dans le cortex moteur, la zone cérébrale qui contrôle les mouvements volontaires. Ces ordres sont transmis à un ordinateur qui decode les informations et les relayent à la prothèse. En 2012, plusieurs institutions, dont la Harvard Medical School et l'Agence spatiale allemande, ont collaboré pour construire un bras robotisé. Une patiente devenue tétraplégique suite à un AVC a réussi à saisir un thermos grâce à ce prototype.

Aujourd'hui, les recherches se concentrent essentiellement sur le développement de membres artificiels grâce auxquels il est possible de regagner des sensations tactiles. Le projet Epione a permis, lors d'essais cliniques, à des personnes amputées au niveau de l'avant-bras d'actionner par la pensée une main robotisée et de percevoir des sensations tactiles. Pour ce faire, le chercheur Silvestro Micera a connecté des électrodes implantées dans les fibres nerveuses des patients à la main artificielle. Toujours dans le domaine des sensations retrouvées, des chercheurs travaillent sur l'élaboration de micro-canaux artificiels qui ont pour but de reconnecter les nerfs rompus suite à une section. Ces lésions peuvent mener à la perte de sensibilité et de motricité dans un membre. Jusqu'à ce jour, les médecins utilisaient des tubes en collagène dans lesquels les extrémités des nerfs se ressoudent partiellement. Cependant les axones, composant les nerfs, ne se reconnectent pas assez vite donc ce procédé permet de retrouver une sensibilité et une motricité partielles. Les nouveaux tubes mis au point sont plus petits et permettront aux axones de se lier plus facilement.

Enfin, les chercheurs essaient de comprendre quel type d'information circule dans quelle partie d'un nerf. Personne n'est capable de dire où circulent exactement les informations relatives aux mouvements volontaires et aux différentes perceptions sensorielles. Heureusement il n'est pas nécessaire de reproduire les détails de l'anatomie humaine à la perfection pour parvenir à connecter des neuroprothèses au système nerveux. Si toutes ces recherches aboutissent, les patients amputés pourront espérer retrouver un membre extrêmement proche de leur bras ou jambe originel.

3) Devis pour la réalisation d'une prothèse

	Prix (en €)	Quantité	Prévision Total (en €)	Cout Réel (en €)	Liens vers les sites marchands
Servomoteur	7,14	5	35,70	35,70	[12]
Microcontrôleur Arduino	9,12	1	9,12	9,12	[13]
Module Bluetooth	5,8	1	5,80	5,80	[14]
Capteur musculaire	41,82	1	41,82	51,82	[15]
30 Electrodes	8,37	1	8,37	8,37	[16]
2 Résistances			0	0	
2 Transistors			0	0	
Fil de nylon			0	0	
Super glue	5	1	5	5	
Batterie	6	1	6	6	[17]
Matière 3D (Z-ABS)			25,25	35,25	
Total (en €) avec Impression 3D			133,19	153,19	
Total (en €) sans Impression 3D			101,81		
Total (en €) sans Impression 3D, Batterie et super glue			100,81		

Figure 26: Coût conception d'une prothèse

Tous les prix sont en TTC avec les frais de port. Les livraisons sont sous 10 jours ouvrés maximum.

VI. Rencontres avec des professionnels

a) Rencontre à l'hôpital de Roubaix

Le jeudi 3 mars trois membres du groupe, Paul, Victoire et François se sont rendus à l'hôpital de Roubaix pour rencontrer le docteur Labourot, responsable du service de Réadaptation et le docteur Pat. Nous étions partis à ce rendez-vous avec une quinzaine de questions qui nous semblaient pertinentes à aborder durant cette rencontre.

Les docteurs nous ont expliqué leur travail, et notamment comment se déroulent les premiers contacts avec leurs patients puis le suivi sur le long terme. Ils nous ont aussi parlé des entreprises extérieures avec lesquelles ils travaillent pour la conception des prothèses.

Nous pensions que les prothèses bioniques portées par des personnes amputées étaient nombreuses. Cependant les médecins nous ont expliqué qu'ils n'ont que de rares cas de prothèses myoélectriques pour plusieurs raisons. D'abord, la difficulté pour les patients de se projeter dans l'avenir, beaucoup ont peur de cette technologie et du travail qu'ils ont à fournir sur plusieurs mois voire même plusieurs années. En effet, ces derniers se doivent d'apprendre à contrôler des muscles dont ils n'avaient même pas conscience auparavant, par le biais de la pensée. Quand une personne est amputée au niveau du coude par exemple, elle doit apprendre à n'activer que certains muscles situés dans le bras sur lesquels sont situées les électrodes pour reproduire certains mouvements. Beaucoup de patients abandonnent car la mise en place est très compliquée et demande beaucoup d'efforts.

La plupart des personnes amputées souhaitent une simple prothèse esthétique dans un souci de bien être et d'utilité. Les patients apprennent à vivre avec leur amputation et ne veulent en aucun cas un corps étranger sur le leur tel qu'un « bras robot ».

Finalement, les deux docteurs nous ont gentiment donné les coordonnées de l'orthoprothésiste, Philippe Barbez, avec lequel ils travaillent. Ce dernier est le président de Nord Orthopédie, situé à côté du C.H.R. de Lille. C'est cette entreprise qui conceptualise et fabrique les prothèses de la majorité des amputés dans les environs. Nous avons d'ailleurs eu la chance d'aller visiter leur laboratoire mercredi 16 mars.

b) Rencontre Nord-Orthopédie

Nord-Orthopédie est un centre médical regroupant plusieurs spécialistes et techniciens réalisant des prothèses sur mesure. Monsieur Barbez nous a fait visiter les différents pôles de ses locaux. Rodolphe et Victoire ont ainsi eu la chance de suivre l'intégralité de la conception d'une prothèse. Tout d'abord, une modélisation en 3D est réalisée pour que la prothèse épouse intégralement le corps du patient. Puis, un moule en résine est imprimé, qui est une

reproduction à l'identique du patient. Les techniciens peuvent donc travailler sur ce moule et réaliser la conception de la prothèse.

Nous avons pu voir le fonctionnement de la prothèse I-Limb d'Otto Bock qui finissait d'être réglée. Première prothèse électrique à être remboursée par la sécurité sociale. Bien qu'archaïque par rapport aux nouvelles, cette prothèse nous montre que la miniaturisation permet l'intégration de tous les composants dans la main. Malgré cela, le réel souci est la transmission d'information entre l'homme et la prothèse.

Ensuite, dans une autre pièce nous avons pu découvrir des prothèses esthétiques, cela étant impressionnant par le travail minutieux et long fourni par les différents fabricants mais également par les détails, il est impossible, au premier coup d'œil de constater que c'est une main artificielle.

Pour finir, nous avons souhaité demander l'avis du Docteur Barbez sur l'innovation de notre prothèse. Il est difficile de capter les signaux musculaires car tous les patients sont différents, pour cela il faut réaliser plusieurs tests pour définir la meilleure disposition des électrodes sur le patient. Pour lui, le fait d'avoir ce type de capteur est intéressant pour les prothèses de notre type (bas cout ...) et pour des personnes qui recherchent des gestes particuliers.

VII. Présentation du prototype

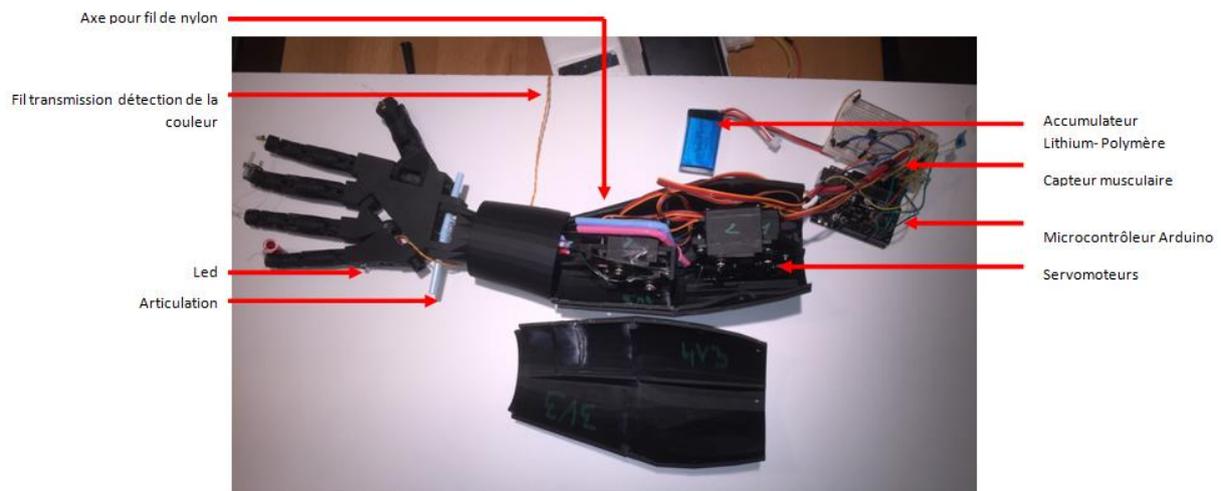


Figure 27: Annotation des différentes parties de notre prothèse

Il nous est apparu rapidement de fabriquer une prothèse pour concrétiser ce projet.

Les plans de prothèses sont trouvables en open source sur internet grâce à des particuliers de même que des tutoriels. Ces plans ont permis d'être une base solide pour définir des pistes d'améliorations possibles. Ces pistes d'améliorations peuvent se situer autant dans la partie hardware, que dans la partie software car le microcontrôleur qui permet la coordination des capteurs et des actionneurs est codé sous Arduino. Le langage Arduino permet de coder, de récolter simplement les informations envoyées par les senseurs et les servomoteurs.

Dans cette partie nous allons décortiquer la prothèse Inmoov, en particulier l'avant-bras, qui est le premier robot à taille humaine entièrement imprimé en 3D et en open source. [18]

a) Construction

1) Le microcontrôleur Arduino

Le microcontrôleur est un circuit imprimé qui ressemble à un mini-ordinateur. Grâce à ses entrées/sorties analogiques et numériques : il permet de récolter, de traiter et d'envoyer des informations sous forme de signaux électriques.

Un software est installé sur la plaquette ce qui permet une programmation dans un langage simple. Un software étant un logiciel, c'est-à-dire un ensemble d'instructions données à un ordinateur, dans notre cas, au microprocesseur.



Figure 28: Microcontrôleur Arduino

2) Servomoteur

Le servomoteur est doté d'un axe de rotation qui permet de déplacer un bras jusqu'à une certaine position puis de fermement maintenir cette position. On dit que cet axe de rotation est entravé par un système de brigade. Cela signifie qu'il peut tourner jusqu'à une certaine limite mais pas plus d'un tour complet. Le servomoteur est un système asservi en position angulaire. Cela signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera toujours une consigne d'orientation que vous lui envoyez en son entrée.

Un servomoteur se compose de :

- L'axe de rotation sur lequel on vient fixer un bras
- D'un moteur à courant continu
- Un capteur de position de l'angle (potentiomètre)
- Une carte électronique d'asservissement permettant le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur
- Un réducteur de vitesse

Les servomoteurs sont très présents dans la vie courante. Par exemple nous en retrouvons au niveau du safran des navires, des roues des voitures télécommandées etc.



Figure 29: Servomoteur

Pour notre prothèse nous avons le choix entre 2 types de servomoteur :

Type	MG995	HK15298
Couple à 6v (Kg/cm)	13	14
Vitesse (s/60°)	0.13	0.13
Dimension (L x l x h) (en mm)	40 x 20 x 36.5	26x 13 x 29
Prix (€)	7.14	17.55

Pour le projet Inmoov, il est conseillé d'utiliser les servomoteurs HK15298 parce qu'ils sont très coupleux, avec une bonne réactivité et surtout par ce qu'ils sont compacts. En effet, Le MG995 a des performances équivalentes et un prix 60% moins cher par rapport au HK15298 mais il est beaucoup plus imposant. Pour respecter notre budget, nous avons opté pour le MG995 même si cela nous contraint à repenser l'agencement de nos servomoteurs dans la prothèse.

3) Capteur musculaire

Un capteur musculaire détecte le courant musculaire créé via les contractions des muscles. Généralement, la détection des contractions musculaires est possible grâce à des électrodes posées sur différents muscle du bras. Ces électrodes transmettent le potentiel électrique en millivolt à l'appareil de mesure. En captant les différences de potentiels, ces électrodes permettent d'avoir des données précises sur les différentes impulsions électriques du corps humain.



Figure 30: Capteur musculaire

Ce courant est amplifié avec un amplificateur de précision, à grand gain, appelé bio amplificateur. Le Muscle Sensor v3 permettra de mesurer l'activité électrique filtrée et rectifiée d'un muscle et ainsi délivrer en sortie V_{s-0} Volts selon l'activité musculaire sélectionnée. V_s signifie la tension de la source d'alimentation.

Afin de mieux comprendre son fonctionnement, nous avons décidé de nous intéresser à sa structure électronique pour calculer son gain théorique et d'analyser le traitement du signal.

Principe de fonctionnement :

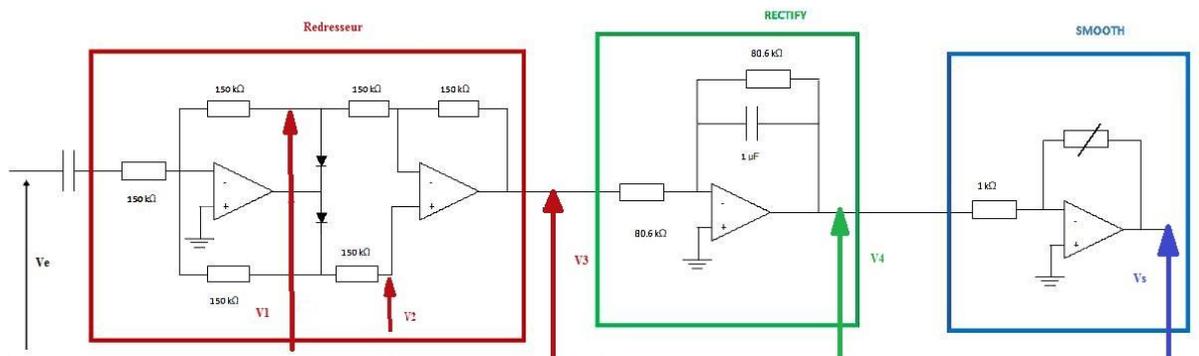


Figure 31 : Schéma électrique du capteur musculaire

La partie rouge permet d'enlever les parties négatives c'est-à-dire que cet amplifly est le rectifier, il transforme le signal en un signal redressé positif. En effet, en médecine, on s'intéresse principalement aux impulsions et a ses pics pour détecter le mouvement des muscles. Ces derniers sont au repos, c'est-à-dire $V_e=0$ ou en mouvement c'est-à-dire que $V_e>0$ en fonction de l'amplitude du mouvement.

Si le signal d'entrée vaut $+V_e$ alors D_1 fermée et D_2 ouverte :

1^{er} AOP :

$$V_{-} = \frac{V1 - V_e + V2}{3}$$

$$V_+ = 0$$

$$\varepsilon = V_+ - V_- = V_1 - V_e + V_2 = 0$$

$$V_e = (V_1 + V_2)$$

2^e AOP :

$$V_- = \frac{V_1 + V_s}{2}$$

$$V_+ = \frac{V_2}{2}$$

$$\varepsilon = V_+ - V_- = V_2 - (V_1 + V_s) = 0$$

$$V_s = V_2 - V_1$$

Donc

$$V_1 = V_e - V_2$$

$$V_s = V_2 - V_1$$

$$\Leftrightarrow V_s = 2V_2 - V_e$$

$$\text{Or } V_2 = V_e$$

$$\rightarrow V_s = V_e$$

Si le signal vaut +V_e alors D2 est fermée et D1 est ouvert :

1^{er} AOP :

$$V_- = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

$$V_+ = 0$$

$$\text{Or } \varepsilon = V_+ - V_- \Rightarrow V_e = -V_1 - V_2$$

2^e AOP :

$$V_- = \frac{V_1 + V_3}{2}$$

$$V_+ = \frac{V_2}{2}$$

$$\text{Or } \varepsilon = V_+ - V_- \Rightarrow V_3 = V_2 - V_1$$

$$\text{Donc } V_e = V_3$$

On remarque alors que ce circuit permet le redressement du signal, c'est-à-dire que le signal de sortie est égal à la valeur absolue du signal d'entrée, on appelle cela un redressement en bi-alternance.

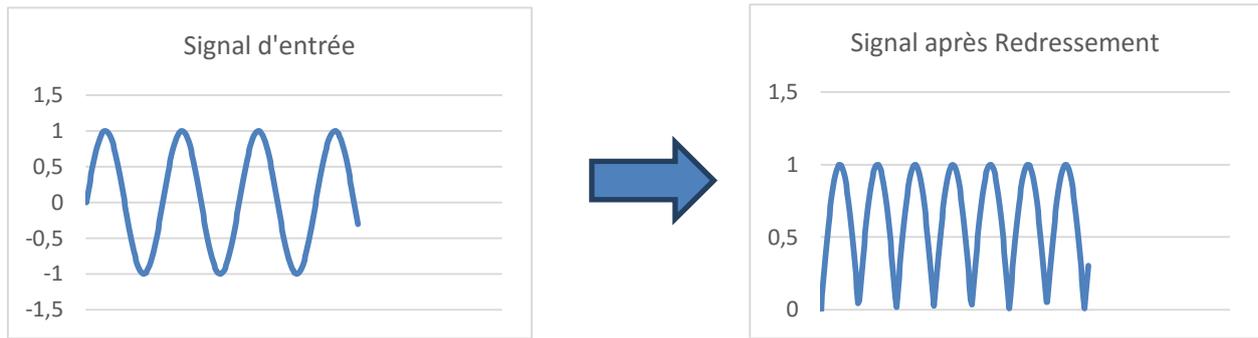


Figure 31: Signal entrée et après redressement du capteur musculaire

La partie verte sert essentiellement à diminuer les bruits, les nuisances et permet donc une acquisition d'un signal "plus propre" et plus facilement exploitable de plus, ce montage est un filtre passe-bas atténuant les variations rapides du signal.

Enfin, le Smooth donne en sortie une tension quasi constante.

Lisseur de Tension :

$$Y = \frac{1}{Z}$$

$$Y = \frac{1}{R} + j\omega C = \frac{1 + j\omega RC}{R} \quad \text{avec } R=80.6 \text{ K}\Omega \text{ et } C=1\mu\text{F}$$

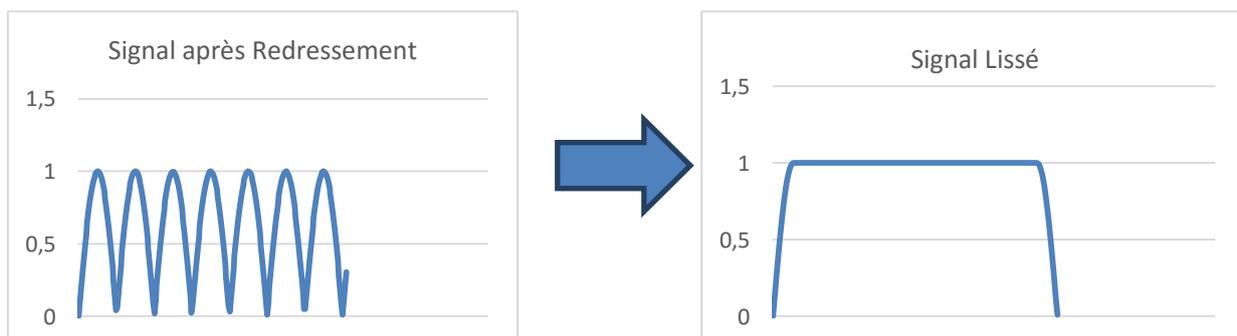
$$\text{Donc } z = \frac{R}{1 + j\omega RC}$$

$$e = i * R \Rightarrow i = \frac{V_3}{R}$$

$$V_4 = -Z * i = -Z * \frac{V_3}{R}$$

$$\text{D'où } \frac{V_4}{V_3} = -\frac{Z}{R} = -\frac{R}{R(1 + j\omega RC)} = -\frac{1}{1 + j\omega RC} \Rightarrow V_4 = -0.395 * V_3$$

L'utilisation d'un tel circuit permet de lisser le signal. Le condensateur va se charger et se décharger très rapidement permettant alors l'obtention de ce dernier.



Amplificateur :

Figure 32: Signal après redressement et lissé

$$V_4 = R * i \Rightarrow i = \frac{V_4}{R} \text{ avec } R=1\text{k}\Omega \text{ et } R_{\text{réglable}} \in [0,50] \text{ k}\Omega \text{ (par hypothèse)}$$

$$V_s = -R_{\text{réglable}} * i = -R_{\text{réglable}} * \frac{V_4}{R}$$

$$\Rightarrow \frac{V_s}{V_4} = -\frac{R_{\text{réglable}}}{R} \Rightarrow V_{s,\text{min}} = 0 \text{ et } V_{s,\text{max}} = -50 V_4$$

Conclusion :

$$V_{s,\text{max}} = (-50) * (-0,395) V_e = 19.75 V_e = 197 \text{ mV}$$

$$G(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{V_s}{V_e}\right) = 25.8 \text{ dB (à 6Hz)}$$

Cet appareil en plus du redressement, du lissage et de l'amplification du signal, permet aussi l'atténuation des perturbations magnétiques grâce à son filtre passe bas. Ce filtre permet de ne garder que les très basses fréquences, ce qui évite la transmission de signaux faussés émis par des appareils électriques et captés par les électrodes.

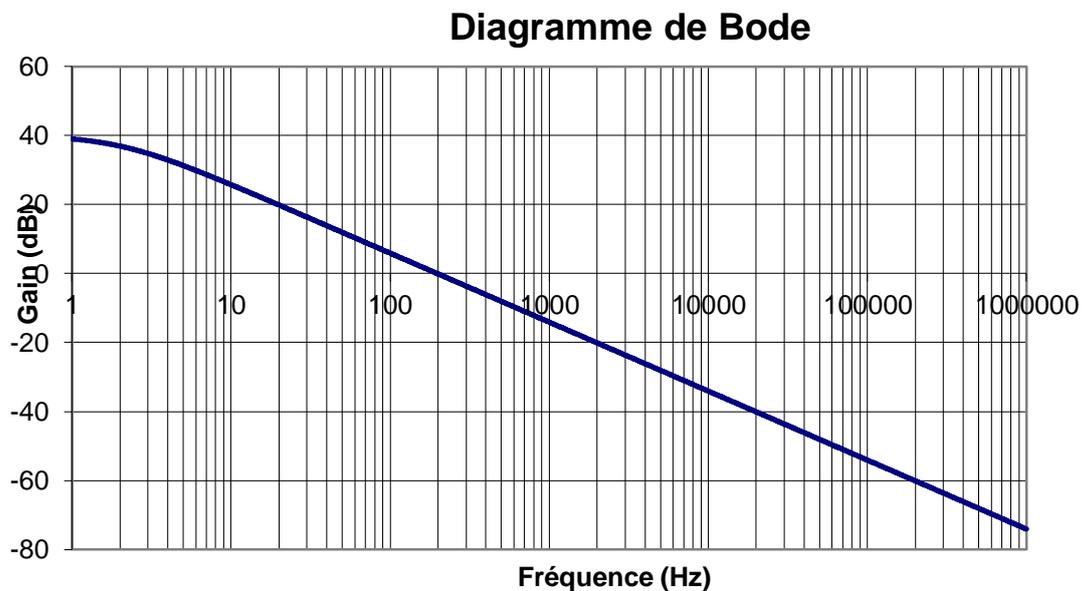


Figure 33: Diagramme de Bode

4) Les électrodes Passives

Une électrode passive est constituée d'une membrane, d'un conducteur ou d'un électrolyte et d'un câble. Lors d'une contraction musculaire, la membrane se déforme, des conceptions ioniques ont lieu, créant une faible intensité. Ce courant est alors acheminé vers le capteur musculaire grâce aux câbles.



Figure 34: Electrodes passives

5) Choix du matériau

L'impression 3D nous permet de créer une pièce réelle à partir d'une modélisation informatique.

Une fois l'impression démarrée, l'imprimante va déposer successivement de fines couches de matière afin de former l'objet. Malgré la récente démocratisation de cette technologie, on peut déjà imprimer avec beaucoup de matériau. Nous avons décidé de nous intéresser à la gamme de filament Zortrax.

	Z-ABS	Z-HIPS	Z-ULTRAT	Z-PETG	Z-PCABS
Résistance à l'impact (KJ/m²)	8	-	-	70	35
Module d'Young (GPa)	1.8	2.67	1.95	2.10	2.21
Résistance à la traction (MPa)	38	34.3	42	50	58
Température de déformation (°C) à 0.45MPa	112	83	112	70	124
Odeur	Non	Non	Non	Non	Non
Solubilité	Eau	Solvant (mais résistant à l'acétone)	Solvant	Solvant	Solvant
Application	Petite maquette, Figurine (lego)	Grande maquette, Prototypage de pièce mécanique	Prototypage de haute qualité, pièce mécanique	Endroit nécessitant une résistance au sel et à l'acide	Boitier électronique, Pièce automobile
Prix pour 1Kg (en €)	40	50	50	50	70

Figure 35: Tableau comparatif des différents matériaux possibles avec une imprimante Zortrax

Ces valeurs sont valables pour une tranche 0.2mm de matériau et en utilisant la méthode PN-EN ISO 2039-1 (ASTM D785).

Au vu de ce tableau, Le Z-ULTRAT semble répondre le mieux à nos attentes car il a une bonne résistance à la traction/compression, une température de déformation correcte et il ne craint pas l'eau. Le Z-ULTRAT et le Z-ABS possèdent des propriétés physiques relativement proches.

Pour notre projet de prothèse opérationnelle à budget modéré, nous nous tournerons sur un type de matériau appelé Z-ABS qui est un dérivé d'acrylonitrile butadiène styrène adaptable pour devenir une bonne ressource pour un système d'imprimante 3D.

Le Z-AB est un filament thermoplastique conçu spécifiquement pour la Zortrax® M200. C'est un matériau efficace et complet, disponible dans un large panel de coloris et optimisé pour rendre un travail aussi bien esthétique que performant mécaniquement.

Vendu comme Idéal pour le prototypage de pièces mécaniques et de concepts prêts à l'emploi, le Z-ABS est un matériau accessible (comptez dans les 35 € pour 800 g de produit utilisable) qui présente de bonnes propriétés mécaniques :

Un module d'élasticité de 1,8GPa qui donne un matériau assez souple et élastique et réduisant les chances de casser des parties de la prothèse à la moindre mauvaise action mécanique sur l'objet.

Une résistance à la traction de 38 MPa qui donne une résistance au produit suffisante pour une utilisation classique de la prothèse, permettant l'action de charges modérées sans risque pour l'objet ni l'utilisateur.

Le point de ramollissement Vicat donne une idée de la température nécessaire pour affecter un matériau de la sorte qu'une aiguille puisse s'y enfoncer d'un millimètre de profondeur, les tests effectués sur le Z-ABS donnent une température d'environ 112°C afin de « ramollir » le polymère, donnant une prothèse dure et assez résistante pour un domaine d'utilisation à température normale pour un être humain.

Le Z-ABS partage également d'autres propriétés physiques et chimiques avec les autres membres de la famille des polymères, ainsi jouit-il d'une bonne isolation thermique et électrique. C'est un matériau pratiquement sans odeur et insoluble dans l'eau qui possède une réactivité très faible dans les conditions ambiantes, il est donc facilement utilisable pour la réalisation d'une prothèse.

Il est également important de retenir que le choix de ce matériau pour notre prothèse ne convient pas à la création d'un produit de luxe et optimal, car en effet bien que les propriétés mécaniques soient convenables, son prix et son utilisation très accessibles pour beaucoup, y compris nous, élèves ingénieurs, le Z-ABS, comme tout polymères, possède bien évidemment ses limites mécaniques et physique.

La charge totale que pourrait subir un tel objet serait de l'ordre des 5 à 10 kilogrammes maximums (dépendant de l'épaisseur des pièces de polymères utilisées ainsi que des connectiques et pièces mécaniques ajoutées pour le montage).

S'il partage certaines qualités des polymères, le Z-ABS présente aussi les mêmes limitations en termes de résistance : les cohésions atomiques son faibles au sein du matériau, rendant une « faible » résistance mécanique ainsi qu'une faible rigidité.

Les polymères sont aussi sensibles au vieillissement et à la lumière et leur recyclage est peu efficace.

Cependant, il faut bien garder à l'esprit que notre objectif est de présenter un prototype de prothèse de main articulée dont la création, la manipulation et les possibilités apportées conviennent à une majorité pour des tâches simples et quotidiennes. Pour ces raisons, l'utilisation du Z-ABS nous a paru adéquate pour la création de la prothèse.

Il est bien évidemment concevable de créer une prothèse aux performances accrues en changeant les matériaux utilisés comme corps de l'objet afin de rechercher des propriétés de résistance, sensibilités, dureté ou encore rigidité souhaitée.

[19]

6) Batterie (Prévision)

Le matériel présenté nécessite d'être alimenté, nous allons donc calculer la puissance nécessaire pour faire un choix de batterie.

Si nous considérons qu'une journée moyenne dure 8h :

Il nous faut alors trouver une batterie qui puisse délivrer 6 Volt en continu avec une intensité heure de 9.6 Ah :

	Quantité	Intensité maximale	Total intensité	Tension maximale	Puissance (en Watt)	Puissance Totale (en Watt)
Servomoteur	5	0.1	0.5	5	0.5	2.5
Board Arduino	1	0.0456	0.0456	5.5	0.2508	0.2508
Capteur musculaire	2	0.075	0.150	5	0.375	0.375
Total			0.6206			3.1258

Figure 36: Tableau déterminant la puissance de l'accumulateur

Nombre d'heure * Intensité maximale totale = Intensité heure nécessaire

$$8 * 0.6206 = 4,9648 \text{ Ah}$$

Pour répondre à ces exigences, nous avons le choix entre les accumulateurs Lithium-Ion et Lithium -Polymère. L'accumulateur Lithium-Ion est moins cher et est principalement utilisé dans les téléphones portables. Le Lithium-Ion nécessite un boîtier métallique pour stocker l'électrolyte liquide tandis que les accumulateurs Lithium-Polymère utilisent un électrolyte gélifié ce qui permet de réaliser des batteries en plastique et demande moins de place et est donc plus léger. Par ailleurs, les gels ne sont pas volatiles contrairement aux liquides ce qui réduit considérablement les risques d'inflammation en cas d'usure de la batterie. [20]

Cependant, le problème récurrent qui est le stockage de l'énergie, nous empêche de pouvoir avoir une batterie à la hauteur de nos souhaits. Nous avons alors décidé de partir sur 2 cellules lithium-polymère de tension 3.7 V et de 3000 mAh. Le montage de ces 2 cellules en série, nous permettrons d'obtenir une tension de 6.4 V.

7) Plan du montage :

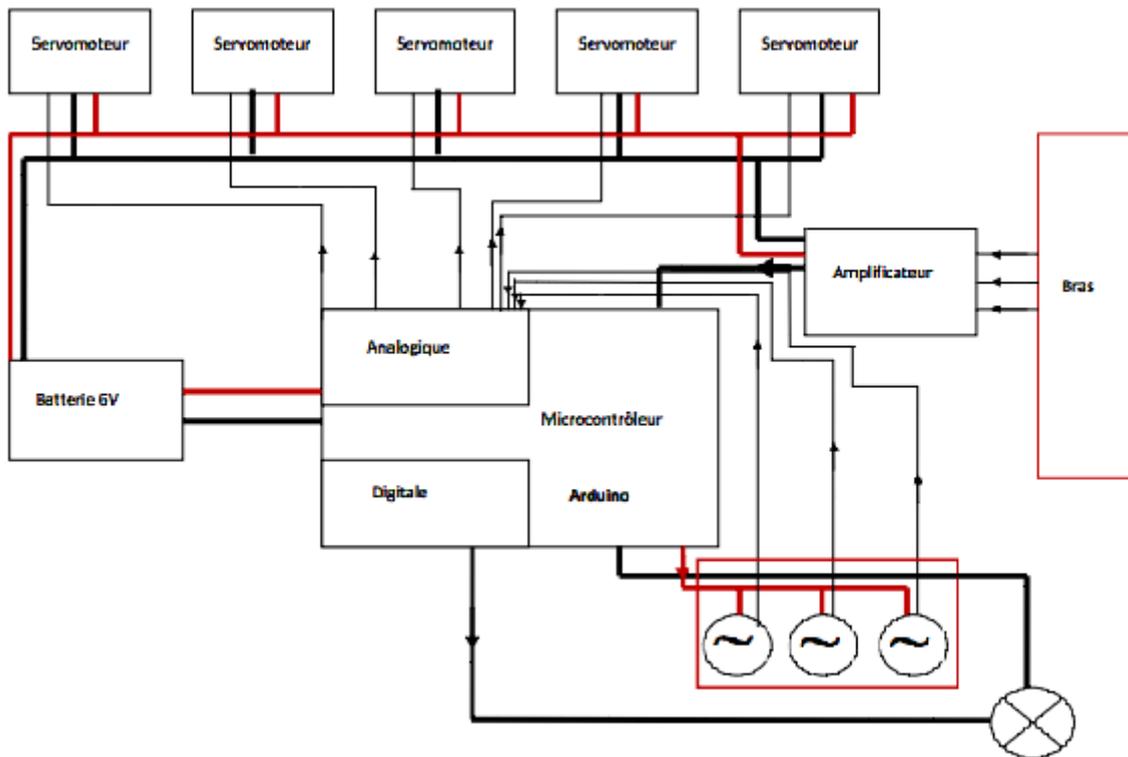


Figure 37: Plan du montage final

Le montage de notre bras est alimenté par une batterie 7,1V à l'aide d'un pont diviseur de tension, celle-ci est abaissée jusqu'à 6V assurant ainsi le fonctionnement de tout notre dispositif. Cinq servomoteurs permettant l'actionnement des phalanges sont reliés au port analogique de l'Arduino. Le signal émis par la contraction du muscle est accentué par l'amplificateur qui permet à la carte Arduino d'être lue, ce microcontrôleur a la capacité de traiter et d'envoyer les informations via des signaux électriques. Une diode ainsi que trois photorésistances faisant partie de notre innovation sont reliées au port analogique. Une description plus précise de notre amélioration est développée dans la suite du rapport.

Prévision budgétaire et du poids :

Conception du bras en 3D			
type de la pièce	masse de matière (en g)	prix en € (en Z-ABS 40€/Kg)	prix en €(en Z-ultrat 50€/Kg)
Arduino support	13	0,52	0,65
Auriculaire	9	0,36	0,45
Bolt entretoise	14	0,56	0,7
coverfinger	17	0,68	0,85
index	13	0,52	0,65
majeur	15	0,6	0,75
ringfinger	12	0,48	0,6
robcap3V2	60	2,4	3
robcap3V1	20	0,8	1
robp3V3	47	1,88	2,35
robp4V3	69	2,76	3,45
robp5V3	85	3,4	4,25
thumb	25	1	1,25
topsurface	35	1,4	1,75
wristlarge	49	1,96	2,45
wristsmall	22	0,88	1,1
Total	505	20,2	25,25

Figure 38: Coût d'impression de la prothèse

Malheureusement, ce budget prévisionnel n'a pas pu être respecté. En effet, lors de l'assemblage de la prothèse plusieurs pièces ont été cassées telles que l'index et l'annulaire. Nous avons donc dû les imprimer de nouveau ce qui a augmenté le prix de 1,00€ ce qui est relativement peu tout de même.

Cependant, cette étude de prix reste approximative car nous n'avons pas pris en compte le coût de l'alimentation électrique nécessaire à la fabrication.

Temps d'impression

Pièce	Masse en gramme	Temps en minutes
Aduino support	13	62
Auriculaire	9	63
Bolt entretoise	14	97
Coverfinger	17	88
Index	15	92
Majeur	16	107
Annulaire	13	67
Robcap3v1	23	101
Robpart2v3	62	403
Robpart3v3	47	315
Robpart4v3	73	420
Robpart5v3	85	517
Pouce	25	155
Topsurface	39	190
Wristlarge	53	318
Wristsmall	24	130
Wristle	51	348
Total	579	3473

Figure 39: Temps d'impression de la prothèse

De la même manière, ayant dû réimprimer des pièces le temps d'impression est augmenté de 199minutes. L'impression de nouveaux index et majeur ont eu qu'une faible répercussion dans le prix mais une relativement élevée dans le temps de l'impression qui est désormais de 3672 minutes. Soit 2,55 jours d'impression pour réaliser cette prothèse.

b) Action possible et innovation

1) Hardware

L'hardware peut être traduit comme "matériel libre" il définit les technologies et produits physiques développés par le biais de "ressources libres" (open-source).

Le projet Bionico Hand réalisé à partir du robot In moov permet de réaliser un unique mouvement. Il est nécessaire de reprogrammer la prothèse pour réaliser un mouvement différent c'est-à-dire que pour l'utiliser au quotidien, le patient doit être en permanence devant son ordinateur pour générer un nouveau mouvement.

L'objectif étant de réduire au maximum cet aspect contraignant de l'utilisation de cette prothèse, notre idée première fut alors un bouton. Dans ce cas, la prothèse posséderait une mémoire qui permettrait d'effectuer plusieurs mouvements en appuyant sur le bouton sans devoir les reprogrammer à chaque utilisation. Le premier frein à cette innovation est dû au nombre des mouvements. En effet, si la personne a mémorisé plusieurs positions de la main, il faudra appuyer x fois sur le bouton jusqu'à obtenir la position souhaitée. C'est à dire que la main effectue plusieurs déplacements, cela peut être relativement long et contraignant.

Avec une telle problématique, un écran semble être la solution idéale qui permet de sélectionner facilement la position. Cependant, avec un tel dispositif, le patient doit utiliser son autre main pour choisir le mouvement sur l'écran. Ce qui n'est pas toujours possible quand la deuxième main est occupée. De plus, un écran fonctionne en continue ce qui demande de l'énergie, cela réduit considérablement l'autonomie de la batterie.

Suite à cette réflexion, l'innovation choisie pour ce projet est celle de la détection de la couleur. Celle-ci présente sur aucune prothèse actuelle, elle permet d'économiser de l'énergie dû à l'absence d'écran mais également de pouvoir changer facilement de mouvement grâce à des capteurs colorimétriques sans pour autant avoir besoin de reprogrammer le mouvement à chaque fois. Par ailleurs, travailler avec des détecteurs de couleurs permet d'avoir la deuxième main libre et rendre la prothèse moins contraignante dans le quotidien.

En effet, les mouvements sont déjà programmés dans le microcontrôleur, néanmoins, il est possible de programmer de nouveau mouvement grâce à une nouvelle couleur.

Chaque couleur correspond à un duo de mouvement : celui de la contraction du muscle et celui du déplacement de la main. Il faut donc la détection de la couleur et la contraction du muscle pour que le déplacement ait lieu.

Les capteurs colorimétriques sont constitués de plusieurs photorésistances, une possédant un filtre bleu, vert et rouge.

A chaque détection du duo de mouvements, la contraction musculaire et la présence d'une couleur sous le capteur, une led blanche s'allume à l'intérieure de la prothèse et éclaire le filtre de la couleur. A l'intérieur de la prothèse, la détection de la couleur se fait grâce a la variation d'intensité aux bornes des 3 photorésistances.

Par exemple, la couleur présentée est rouge. La photorésistance rouge laisse passer plus de courant que la bleue ou la verte. Ce qui permet au microcontrôleur de reconnaître la couleur et de ce fait savoir quel mouvement réaliser.

A l'avenir, il serait judicieux de remplacer ce capteur colorimétrique par du NFC (Near Field Communication). En effet, celui-ci permettrait une plus grande fiabilité, facilité d'utilisation, ainsi qu'une universalisation du code et des actions si cette technologie devait à l'avenir être utilisée dans le domaine publique. La détection peut poser des soucis à une grande échelle,

une couleur peut déteindre au soleil, ou être sale (poignée de porte...) ce qui peut provoquer une mauvaise lecture de la couleur.

Le choix d'imprimer une prothèse noire ne s'est pas fait arbitrairement. Avec une prothèse blanche, les problèmes de scanne des couleurs auraient été multiples. Une partie de la lumière blanche aurait réverbéré sur les parties blanches entourant le capteur provoquant des prises de valeur erronées.

2) Software

Le projet In moov en particulier Bionico hand possède une base software assez intéressante. En partant de cette dernière, l'amélioration de certains fragments de ce code est nécessaire pour s'adapter au mieux à notre innovation. Dans un premier temps, il était essentiel de développer un mode debug. Dans un second temps, l'écriture d'un code plus basique pour les flux analogiques reçu par l'arduino est une étape importante pour le fonctionnement de notre innovation.

Le mode debug consiste à annuler l'action lors de problème et de réinitialiser la prothèse. Si la couleur violette est détectée alors qu'elle ne correspond à aucun mouvement, la prothèse ne sait pas quel mouvement faire. En effet, le violet étant un mélange racémique de bleu et de rouge, si ces deux photorésistances détectent la même intensité, la prothèse se replace en position initiale et attend une nouvelle demande. De même, si le mouvement demande un déplacement d'un servomoteur à 20° alors que ce dernier est déjà disposé d'un angle de 20° . Le servomoteur va d'abord se remettre en position initiale pour ensuite se déplacer de 20° sans le mode debug, le servomoteur serait orienté à 40° .

Ensuite, vient l'adaptation de notre innovation sur le codage de la prothèse. Le code en open-source de Bionico hand ne faisant pas appel aux couleurs, il a fallu inclure ce fragment de code dans notre prototype. Pour cela, nous avons ajouté des boucles permettant de reconnaître les couleurs en fonction des tensions perçues par les capteurs colorimétriques.

3) Esquisse de code pour le capteur colorimétrique

```
const int BlueSensor = A0 ;
const int RedSensor = A1 ;
const int GreenSensor = A2 ;
int RedSensorValue = 0;
int BlueSensorValue = 0;
int GreenSensorValue = 0;
int ButtonValue ;
int flag = 0;
int pos;

void setup() {
  Serial.begin(9600) ;
  // Ouvre une boite de dialogue
  //PC - Arduino a 9600 bps
  pinMode(3, OUTPUT) ;
  // Il ne peut que sortir du courant de la sortie 3 .
}

void loop() {
  ButtonValue = digitalRead(2);
  //si on appuie sur le bouton
  if (ButtonValue == HIGH) {
    // on allume la LED blanche présente sur la sortie 3
    digitalWrite(3, HIGH);

    // On lit la valeur au niveau de la photorésistance rouge, vert, bleu
    RedSensorValue = analogRead(RedSensor);
    GreenSensorValue = analogRead(GreenSensor);
    BlueSensorValue = analogRead(BlueSensor) ;

    //on envoie les valeurs à l'ordinateur
    Serial.println(BlueSensorValue);
    Serial.println(RedSensorValue);
    Serial.println(GreenSensorValue);

    ButtonValue = 0;
    flag = 1 ;
    delay(250);
  }
  // On éteint la LED blanche présente sur la sortie 3 .
  digitalWrite(3, LOW);

  //si c'est rouge on choisit la position 1
  if ( RedSensorValue > BlueSensorValue && RedSensorValue > GreenSensorValue && flag == 1 ) {
    Serial.println(" Red ");
    pos = 1 ;
    flag = 0 ;
  }
  if ( BlueSensorValue > RedSensorValue && BlueSensorValue > GreenSensorValue && flag == 1 ) {
    Serial.println(" Blue ");
  }
}
```

```

    pos = 2 ;
    flag = 0 ;
}
if ( GreenSensorValue > BlueSensorValue && GreenSensorValue > RedSensorValue &&
flag == 1 ) {
    Serial.println(" Green ");
    pos = 3 ;
    flag = 0 ;
    delay(1000) ;
}
}
}

```

c) Avantages et inconvénients

Si notre prothèse comporte plusieurs avantages, économiques et fonctionnels, elle n'en est pas parfaite pour autant, ainsi il nous a paru intéressant de relever les principaux atouts et faiblesses de notre prototype.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> → Faible coût de production de la prothèse : ≈150€ → Faibles connaissances technique demandées → L'annulaire et l'auriculaire sont montés de sorte à se replier plus indépendamment que les autres doigts, augmentant les possibilités de positionnement des doigts et donc la liberté d'utilisation. → La prothèse peut être re-paramétrée : les mouvements de la main enregistrés et correspondants à une couleur peuvent être changés depuis l'algorithme. 	<ul style="list-style-type: none"> → Faible complexité technologique de la prothèse : matériaux et connectique de qualité et résistance moyenne. → Mouvements de la prothèse limités par rapport aux mouvements naturels d'une main humaine. Ex : pas de rotation de poignet. → Capacité de portée peu importante : risque pour les liaisons entre les pièces et des connectiques électroniques et donc possible risque pour le porteur. → L'utilisation de photorésistance limite la mémoire de mouvements dans la prothèse : en ne mettant que 3 photorésistances, on ne peut reconnaître que 3 couleurs et donc n'y associer que 3 mouvements (changer de mouvements demande en réalité de remplacer une position par une autre.)

Figure 40: Tableau avantages et inconvénients

Au cours de la conception et de l'assemblage de notre prothèse, nous avons dû faire face à divers problèmes que nous n'avions pas anticipés :

La plus grosse difficulté que nous avons rencontrée lors du montage fut celle du manque de place. En effet dans certaines pièces de la prothèse, notamment l'auriculaire ou l'avant-bras, nous manquions d'espace suffisant pour passer fils et connectique électrique. Il en a résulté des pièces qui cassent, comme des photorésistances, des soudures à refaire, et des difficultés à isoler les soudures entre elles sans prendre trop de place.

Lors du montage il a fallu s'arranger sur le coup pour percer de quoi passer les fils électriques reliant les photorésistances dans l'auriculaire et faire en sorte qu'ils ne gênent pas les mouvements des doigts. Il a fallu gérer aussi l'isolation des soudures entre les pâtes des photorésistances dans un espace très confiné et non prévu à recevoir autant de connectique.

Lors de l'élaboration de notre prothèse, nous avons eu l'idée de tenter de récupérer les signaux nerveux depuis nos propres bras et de les amplifier afin de les transmettre via un logiciel et ainsi commander notre prototype. Hélas après des tests dans le Fablab d'HEI-ISA-ISEN nos essais ne furent pas concluants et nous ne sommes pas parvenus à enregistrer un signal assez satisfaisant.

VIII. Conclusion

Un projet de cette importance nécessite une bonne organisation et une planification rigoureuse. C'est pourquoi nous avons mis en pratique les notions vues en management de projet. La note de clarification, le WBS et un planning nous ont tracé le chemin à suivre d'une manière efficace. Avec une visibilité accrue et une méthodologie rigoureuse nous avons su gagner en temps et en qualité. En effet, ces derniers étaient indispensables pour nous permettre de traiter l'ensemble des matières disponibles sur lesquelles appuyer notre projet. Par exemple, l'étude des matériaux couplées aux notions de chimie nous ont permis de sélectionner les meilleurs matériaux à notre disposition. Des caractéristiques physiques intéressantes comme un module de Young particulier, une résistance à la traction ou encore une température de fusion haute, dans la perspective d'être sans danger pour l'homme ou l'environnement sont indispensables dans le cadre de notre étude. Il est évident aussi que les notions d'électronique nous ont permis une appréhension à notre niveau du fonctionnement interne de la prothèse, notamment au niveau des capteurs. A noter l'utilisation de l'informatique au travers de Java et de « la technique du flag », méthode caractéristique de programmation vue en cours.

A notre niveau, nous avons exploré les possibilités existantes dans le monde de la prothèse afin d'y apporter notre contribution. Sans les révolutionner, nous avons mis à jour des problématiques concernant les prothèses et les enjeux qui s'y rapportent. Concrètement, avec l'expérimentation, nous nous sommes rendu compte que la démocratisation de la prothèse grâce à l'imprimante 3D pourrait être freinée par des déchets importants. Une problématique qui a comme piliers l'économie, l'étude des matériaux ou encore les procédés pour l'environnement. Un recyclage des déchets permettrait de réduire le coût de fabrication ou son impact sur l'environnement de la prothèse.

Avec nos forces et nos faiblesses, la pluralité des matières a permis à chacun de s'exprimer. Dépendant les uns des autres, nous avons su créer une liaison forte, le projet nous rapprochant durant nos temps libres. Nous sommes pour ainsi dire unis comme les doigts de la main.

Sitographie et bibliographie

- [1] M. Français. [En ligne]. Available: <http://www.adjcourtage.fr/LoiBadinter.html>. [Accès le 6 Janvier 2016].
- [2] C. orthopédie. [En ligne]. Available: <http://www.chabloz-orthopedie.com/fr/orthopedie/Membres-superieurs/2>. [Accès le 20 Novembre 2015].
- [3] Ottobock. [En ligne]. Available: <http://www.opg19.fr/medias/files/ok2329-fr-01-1402phd.pdf>. [Accès le 20 Novembre 2015].
- [4] R. s. Autonomic, Interviewee, [Interview]. 04 12 2015.
- [5] M. Français, «Journal officiel du 28 juillet 2001,» Juillet 2001. [En ligne]. Available: <http://social-sante.gouv.fr/fichiers/bo/2001/01-30/a0301955.htm>. [Accès le 16 Février 2016].
- [6] «La nouvelle république,» 18 08 2015. [En ligne]. Available: <http://www.lanouvellerepublique.fr/France-Monde/Actualite/Sante/n/Contenus/Articles/2015/08/18/Impression-3D-une-prothese-de-main-pour-un-enfant-2433927>. [Accès le 25 11 2015].
- [7] tensilestrength. [En ligne]. Available: <http://www.matweb.com/reference/tensilestrength.aspx>. [Accès le 15 Janvier 2016].
- [8] S. SANCHEZ, «3dnatives.com,» [En ligne]. Available: <http://www.3dnatives.com/materiaux-impresion-3d-abs-pla-polyamides-alumide/>. [Accès le 1 Février 2016].
- [9] M. G. & BIOTTEAU, «Cours de Sciences des Matériaux».
- [10] T. bionic. [En ligne]. Available: <http://www.touchbionics.com/resources/document-library>. [Accès le 14 Décembre 2015].
- [11] H. Stéphane. [En ligne]. Available: <ftp://ftp.irisa.fr/local/caps/DEPOTS/BIBLIO2004/StephaneHuet.pdf>. [Accès le 3 Février 2016].
- [12] L. m. servomoteur. [En ligne]. Available: http://eud.dx.com/product/mg995-tower-pro-servo-gear-for-r-c-car-plane-helicopter-844148051#.Vo_5-FI1zRd. [Accès le 22 Janvier 2016].
- [13] L. m. m. Arduino. [En ligne]. Available: : <http://eud.dx.com/product/uno-r3-development-board-microcontroller-mega328p-atmega16u2-compatible-for-arduino-blue-black->

844215600#.Vo_7VF1zRc. [Accès le 22 Janvier 2016].

[14] L. m. Bluetooth. [En ligne]. Available: http://eud.dx.com/product/jy-mcu-arduino-bluetooth-wireless-serial-port-module-844104299#.Vo_7gF1zRc. [Accès le 22 Janvier 2016].

[15] L. m. c. musculaire. [En ligne]. Available: <http://www.robotshop.com/eu/fr/capteur-electrique-muscle-myoware.html>. [Accès le 22 Janvier 2016].

[16] L. m. électrodes. [En ligne]. Available: <http://www.matmedical-france.com/connexion.php>. [Accès le 22 Janvier 2016].

[17] L. m. batterie. [En ligne]. Available: <http://eud.dx.com/product/hj-replacement-7-4v-1000mah-20c-lithium-battery-for-v912-rc-quadcopter-blue-844397564#.VpABV1zRc>.

[18] «Inmoov,» [En ligne]. Available: <http://inmoov.fr/>. [Accès le 18 Décembre 2015].

[19] Zortrax. [En ligne]. Available: https://zortrax.com/materials/#cases//case_159. [Accès le 6 Janvier 2016].

[20] M. Lamelot, 08 11 2007. [En ligne]. Available: <http://www.tomshardware.fr/articles/Sony-Li-P-Li-Ion,1-20901.html>. [Accès le 20 Février 2016].

Table des illustrations

Figure 1: Organigramme du WBS	11
Figure 2: Planning de Gantt.....	12
Figure 3: Tableau analyse des risques.....	13
Figure 4: Schéma du radius et de l'ulna	16
Figure 5: Schéma muscles de la loge antérieure.....	18
Figure 6: Schémas muscles de la loge postérieure.....	19
Figure 7: Schéma vascularisation	20
Figure 8: Schéma ossature de la main.....	23
Figure 9: Schéma muscles et tendons de la main	24
Figure 10: Historique de la prothèse	26
Figure 11: Première prothèse fonctionnelle	26
Figure 12: Prothèse membre inférieur	27
Figure 13: Cuissard.....	27
Figure 14: Pied SACH.....	28
Figure 15: Genou hydraulique	28
Figure 16: Comparaison des parts de marché des différentes prothèses	32
Figure 17: Baromètre d'activité des fabricants de prothèses	32
Figure 18: Organigramme des différents types de prothèses.....	34
Figure 19: Prothèse esthétique	34
Figure 20: Prothèse mécanique.....	35
Figure 21: Prothèse myoélectrique	35
Figure 22: Tableau comparatif des prothèses myoélectriques sur le marché	36
Figure 23: Coût officiel prothèse myoélectrique.....	37
Figure 24: Maxence et sa prothèse imprimée en 3D.....	38
Figure 25: Mouvements de la main et du poignet	44
Figure 26: Coût conception d'une prothèse.....	47
Figure 27: Annotation des différentes parties de notre prothèse	50
Figure 28: Microcontrôleur Arduino.....	51
Figure 29: Servomoteur	52
Figure 30: Capteur musculaire	52
Figure 31: Signal entrée et après redressement du capteur musculaire.....	55
Figure 32: Signal après redressement et lissé	56
Figure 34: Diagramme de Bode	56
Figure 35: Electrodes passives.....	57
Figure 36: Tableau comparatif des différents matériaux possibles avec une imprimante Zortrax.....	58
Figure 37: Tableau déterminant la puissance de l'accumulateur.....	61
Figure 38: Plan du montage final.....	62
Figure 39: Coût d'impression de la prothèse	63
Figure 40: Temps d'impression de la prothèse	64
Figure 41: Tableau avantages et inconvénients	68

Vision du projet par chaque membre de l'équipe

Thomas BERTRAND

Pour notre projet PISTE de troisième année d'HEI, nous avons eu plusieurs séances de préparation lors des ateliers CREA-PISTE, où chacun a pu prendre connaissance des ses traits de personnalités (dans le cadre d'un projet) ; par exemple dans mon cas : imaginatif et explorateur. Ces profils ont été utiles pour créer des groupes hétérogènes.

Pour le choix du sujet, chacun était donc libre de choisir le sujet qui l'intéressait, pour ma part le sujet de la prothèse imprimée en 3D et à bas coût m'a directement plu, notamment parce que j'avais déjà pu travailler sur la réalisation d'objet en impression 3D en deuxième année, pour notre projet en HEI2 (et la réalisation d'un prototype de skate électrique). L'idée de refaire une étude des matériaux, des coûts, des clients potentiels, et surtout de concevoir le prototype de la prothèse m'ont amené à rejoindre ce groupe.

Néanmoins contrairement à l'an passé où le projet se faisait en petit groupe de 4 personnes, le projet PISTE représentait un réel challenge puisque le groupe était composé de 11 personnes. Il a donc fallu choisir un chef de projet, fait complètement nouveau pour moi. A l'exception du stage ouvrier, je n'avais jamais eu à travailler avec un « supérieur », et bien que le chef de projet PISTE soit un élève, c'est un nouveau mode de travail.

Le lancement du projet a été assez lent, et nous avons pu voir que travailler en groupe implique davantage de difficultés : trouver des horaires pour réunir l'ensemble de l'équipe, s'entendre sur les objectifs et les décisions de groupe, ce qui implique de faire des compromis, lorsque les choix ne font pas l'unanimité. Les décisions ont été plus difficiles à prendre qu'en groupe de 4.

Je pense que le projet aurait pu être mieux mené, en ayant eu les cours de management projet en début d'année ; même si la journée CREA-PISTE nous en a donné un aperçu. La planification a parfois été laborieuse, mais rapidement le chef de groupe a créé des sous-groupes de travail de 2 à 3 personnes, et le projet a véritablement décollé à partir de ce moment-là. De plus les réunions régulières avec notre professeur référant pour le projet PISTE, nous ont aidés dans le sens où elles apportaient un regard extérieur plus critique sur nos travaux.

Ce projet a été une bonne expérience de travail en équipe, puisque pour une fois nous n'étions pas avec des groupes faits par affinités, et que nous ne nous connaissions pas tous avant de rejoindre le groupe. Il peut y avoir des désaccords et des visions globales différentes du projet au commencement, mais la réussite a été de partager pour tous les mêmes objectifs, et d'arriver à trouver un projet qui satisfasse tous les membres de l'équipe.

Personnellement, j'ai trouvé que ce projet PISTE était assez formateur, car bien que l'on soit encore en école, ce travail en équipe m'a donné un avant-goût de ce que l'on peut avoir à faire plus tard dans le milieu professionnel en entreprise : respecter les délais même en ayant été confronté au départ d'un membre, travailler en ligne et partager nos documents (via DropBox par exemple), prendre le temps d'écouter tous les avis du groupe, et travailler en hiérarchie. Enfin le prototype a pu être réalisé malgré les difficultés économiques, et techniques, ce qui était loin d'être gagné.

François BOURREE

Un projet d'une ampleur telle que le projet piste nécessite beaucoup de temps et de travail. Le pilier fondamental pour sa réussite est alors la motivation. Il faut en premier lieu trouver un sujet qui nous intéresse afin de rendre agréable le travail et le temps qu'on lui consacre. Et c'est ici que la première difficulté s'est faite ressentir. L'intitulé original « La prothèse du futur » a résonné en moi. En effet j'ai toujours aimé l'idée de mêler science et humanitaire. J'avais le sujet mais pas de groupe. Nous étions alors seulement trois. Or la plupart des groupes avaient été construits et personne n'osait perdre une place dans un groupe constitué pour un groupe qui semblait voué à se dissoudre. Au contraire je me suis retrouvé seul pour défendre le projet. Cependant, au regard des autres sujets de projet qui s'offraient à moi, j'ai préféré demander à chercher de nouveaux membres dans l'autre groupe de travail plutôt que de me rallier à un groupe. C'est ainsi, avec une agréable surprise, que l'on a d'abord pu créer un groupe de cinq personnes. Voyant que le groupe avait de l'avenir, d'anciens membres sont revenus, et avec d'autres intéressés, on a réussi à former un groupe entier.

Le point fort est que les membres ne nous ont pas rejoints par défaut, « parce qu'ils n'avaient pas de groupe », mais qu'ils ont choisi de quitter leur zone de confort pour rejoindre un groupe dont la formation n'était pas assurée. Et c'est ici gage de la motivation dont ont fait preuve les membres et qui a été nécessaire à l'élaboration de ce projet.

Majoritairement du semestre B, les membres alors du semestre A ont alors appliqué, à mon insu, des conseils de management de projet. A savoir, que nous avons prévu les réunions à l'avance et que nous nous fixions des plans d'actions concrets pour chacun des membres. C'est alors que les journées Créa-Piste au projet piste ont pris leur sens à mes yeux. Lors du projet Spaghetti, Paul s'est avéré être un garde-côte efficace et c'est la raison pour laquelle nous l'avons choisi en tant que chef de projet. Nous avons retrouvé ainsi les profils auxquels on s'était préparé. Ainsi, Rodolphe s'est avéré être notre artisan hors pair, fabriquant la maquette chez lui avec son imprimante 3D. Il a été un véritable moteur dans la concrétisation du projet. De la même manière nous avons retrouvé des imaginatifs et des explorateurs dans des domaines variés comme la médecine ou l'électronique. J'ai pour ma part eu un rôle polyvalent. Etant classé dans la catégorie « imagitatif », j'ai pu apporter mon soutien là où le besoin s'en faisait sentir. J'ai notamment rédigé la partie narrante l'histoire de la prothèse ainsi que son environnement économique.

Un autre point fort du groupe a été son hétérogénéité et donc sa capacité à gérer le côté pluridisciplinaire du projet. Cependant certaines matières ont été moins travaillées que d'autres et à mon goût, on aurait peut-être dû intégrer plus de notions et exemples du cours dans notre projet. Il était cependant difficile d'utiliser les méthodes vues en cours dans le projet dû à sa complexité et le nombre d'hypothèses nécessaires à rendre le travail accessible aurait fossé le résultat.

A noter aussi, l'utilité tardive et diffuse des cours sur la connaissance de soi et leurs applications. En effet, cela a permis de canaliser l'énergie des membres et la bonne coordination nous a permis de travailler efficacement. De plus, cela m'a permis de gérer au mieux le peu de conflit au sein du groupe.

Au final, ce projet a été dans la continuité des projets déjà effectués, avec une complexité et une difficulté croissante. C'est un exercice qui nous a permis de joindre la théorie des cours à la pratique de l'entreprise, avec ses difficultés techniques comme humaines.

Hugo CAUSSE

Dans cette partie, je vais vous présenter mon bilan personnel quant au projet PISTE que nous avons réalisé lors de cette troisième année à HEI.

Dans un premier temps je vais vous présenter les éléments qui ont été favorables au projet. En effet, nous avons commencé dès le début de l'année à tous nous investir dans ce projet PISTE car c'était NOUS qui avons choisi notre sujet et cela a donc joué dans notre implication. Ce choix de sujet nous a été facilité par la connaissance de soi et de la journée ludique réalisée par un mini projet fait à base de spaghetti qui nous a permis de déterminer quel rôle chacun allait jouer dans ce projet PISTE.

De plus tous les membres du groupe se sont investis dans ce projet et cela a créé un enthousiasme général qui était plaisant.

J'ajouterai que notre groupe était assez hétérogène en termes de savoir et c'était d'autant plus intéressant : Paul et Alae-Eddine s'y connaissaient en anatomie, Victoire connaissait des personnes ayant accueilli une prothèse, Rodolphe savait manier son imprimante 3D. Pour ma part, je possédais des connaissances en électronique, venant de l'Isen.

Venons en désormais aux difficultés que nous avons éprouvées durant ce projet PISTE. En effet, la planification générale a été un petit peu difficile. Cela nous aurait été bénéfique d'avoir la matière management de projet au début car cette matière nous aide en ce point ci. D'autre part, il me semble que la partie résistance des matériaux n'a pas été abordée et il me semble que pour l'étude de notre prothèse cela aurait été intéressant.

Pour finir, le groupe étant composé de 10 membres dans ce projet, il a été difficile de se joindre tous en même temps et de planifier des réunions sur des créneaux horaires convenant à tous.

Je suis satisfait car le projet initial a été finalisé et cela est toujours une satisfaction sachant l'implication personnelle que chacun a mis dedans afin de le mener à bout.

Hei nous a fixé un budget de 100 euros et nous n'avons pas réussi à le maintenir. Dans un premier temps nous avons envisagé d'utiliser l'imprimante 3D d'Hei mais le devis établi était totalement hors budget. Nous avons donc sollicité Rodolphe qui avait sa propre imprimante 3D et avait des connaissances en la matière, cela nous a permis de mieux respecter le budget imparti. Notre projet a atteint la somme de 150 euros soit une participation de 5 euros supplémentaires de la part de chaque membre du groupe.

Dans l'ensemble, le projet a fasciné l'ensemble du groupe et je regrette d'avoir manqué cinq semaines pour maladie malgré mon implication à distance car ce projet m'a beaucoup plu. De plus Mme Cao nous a bien accompagnés et a été à l'écoute de nos demandes, elle a parfaitement répondu à nos requêtes quand nous rencontrions des difficultés.

Rodolphe COCKENPOT

Ce projet fut très intéressant et un bon moyen d'appliquer des connaissances acquises en cours. Malgré quelques retards, nous avons globalement respecté le planning préétabli.

Pour ma part, j'ai travaillé une bonne partie de mon temps sur les recherches et la réalisation de notre prothèse mais aussi sur l'électronique des prothèses présentes sur le marché. J'ai pu remarquer que les prothèses étaient en pleine expansion grâce à l'impression 3D.

J'ai alors proposé l'idée au groupe de créer notre propre prothèse et d'y apporter une nouveauté. Malgré les quelques réticences du groupe, nous avons décidé de faire une étude de faisabilité. Suite à cette étude, nous avons senti que cette réalisation était possible si on se base sur un projet open source.

En effet, la plus grosse barrière pour nous, était la modélisation et la planification en 3D. En dépit de quelques connaissances en Catia et sketch up, nous nous ne sentions pas capables dans le temps qui nous était donné de réaliser une esquisse 3D et un prototype fonctionnel.

Après quelques recherches sur internet, nous avons trouvé une multitude de projets open source : bionico/Inmoov, -nabling The Future, OpenHandProject, OpenBionics ... Nous les avons alors examinés, mis en exergue les avantages et les inconvénients et nous avons fini par choisir bionichand/Inmoov. Ce projet me plaît beaucoup parce que ce qu'il a été créé par une personne nécessitant ce type d'appareillage, donc il répond à un réel besoin et sans but lucratif. De plus, la conception de cette prothèse est née grâce au Fab lab de Rennes (Laboratoire de fabrication) et a continué d'être améliorée dans celui d'HEI-ISA-ISEN.

Pour la réalisation de notre prototype, je me suis vu confié l'estimation du coût de la prothèse ainsi qu'un portefeuille de 100 euros de la part de l'intégrale d'HEI. J'ai essayé dans un premier temps de rentrer dans la somme impartie mais cela fut impossible. Il nous a alors fallu supprimer un degré de liberté qui est la rotation du poignet, afin d'éviter l'achat d'un nouveau servomoteur et d'un microcontrôleur plus puissant. Malgré cela, il nous manquait encore 50 euros. J'ai alors proposé à tout le monde d'apporter 5 euros au projet afin de combler ce manque. J'ai été agréablement surpris de la confiance et de la compréhension de mon groupe qui a préféré ce financement plutôt que de réduire la qualité de notre réalisation.

A l'heure de la conception, nous avons commencé par l'impression 3D, j'ai été très surpris par les différences de coûts suivant les imprimantes. Au début, nous avions pour projet d'imprimer nos pièces au tout nouveau Fab Lab d'HEI. Je suis alors allé voir avec Victoire si une telle opération était possible ...et oui ça l'était mais au prix de 315 euros alors que je m'étais basé sur 35 euros. Vous compreniez bien qu'avec un tel prix, il nous était inconcevable de dépenser autant dans un projet piste. Pour finir, nous avons réussi à trouver un moyen pour rentrer dans nos prévisions.

Pour la construction de notre prothèse, nous avons décidé de décomposer les tâches en travaillant en petit groupe. Pendant un week-end, nous avons essayé d'avancer au maximum sur notre prothèse, et ceci a payé puisque nous avons réussi à réaliser et à finir l'articulation de la main. Ce week-end fut autant riche techniquement qu'humainement : Je me suis aperçu de la réelle motivation de mes collègues et aussi à ne pas rester arrêter sur une idée. En effet, je souviens que lors du montage d'un doigt, je voulais à tout prix ré-usiner afin de mettre du plus gros fil au niveau des articulations. J'ai donc commencé à essayer de re-forer les trous mais les pièces se cassaient sous la pression de la visseuse. C'est alors que Victoire a très justement souligné qu'il n'était pas utile de les ré-usiner et que de mettre du simple fil suffisait. Et elle avait raison ! Pour moi, cet exemple montre bien que le fait de travailler en équipe permet une efficacité et un gain de temps.

J'espère que nous allons réussir à créer notre prothèse, nous avons bien commencé mais il reste encore une grosse partie à faire : la motivation est notre moteur. Si cela venait à échouer, car il faut toujours prendre en compte cette hypothèse : ce projet m'aura permis d'acquérir de l'expérience, de cerner mes axes d'améliorations, de connaître des nouvelles personnes et tout simplement d'avoir passé de bon moment à travailler en groupe.

Aubin DUPONT

Dans le cadre de notre troisième année d'étude d'ingénieur à HEI, il nous a été demandé de réaliser un projet Piste étendu sur l'ensemble de l'année scolaire. Après quelques séances introductives ayant pour but de guider chaque élève sur son type de personnalité en travail de groupe, des sujets variés ont commencé à émerger et chaque élève a pu choisir le sujet qui l'inspirait le plus. Cela permet de créer un groupe qui, même si tous les membres ne se connaissent pas dès le départ, est directement dirigé par les mêmes motivations et cela rend les prises de décisions au sein du groupe plus simples.

Notre groupe était composé initialement de 11 membres, répartis sur les deux semestres de cours différents mis en place par HEI. Nous avons donc pu profiter de connaissances de toutes les matières de troisième année au plus tôt. Cela s'est avéré particulièrement utile pour la création du planning WBS, note de clarification, etc. Car en effet les membres qui ont commencé l'année par le semestre A ont pu partager au groupe leurs cours de management de projet. De plus, certains membres du projet sont des anciens élèves de médecine qui se sont réorientés, et leurs connaissances en anatomie ont été un atout pour un projet liant directement l'Homme à la machine.

Malheureusement nous avons dû faire face au départ d'un membre du groupe qui changea d'orientation scolaire au cours d'année, mais nous nous sommes réorganisés assez rapidement.

Une fois le chef de groupe élu, avec l'accord de chaque membre groupe, un groupe Facebook privé fut créé pour échanger nos données personnelles, partager des articles et des vidéos sur le sujet et organiser nos réunions. Puis nous avons commencé à nous répartir les différentes tâches au sein du projet au fur et à mesure du temps.

Ainsi j'ai pu travailler sur plusieurs aspects différents du projet, comme la note de clarification, les différents genres de capteurs sensoriels, les propriétés des matériaux utilisés pour le prototype et j'ai même pu participer au montage et soudure de notre propre prothèse.

J'ai trouvé vraiment intéressant de découvrir au fil de nos recherches la complexité du sujet et l'aboutissement technologique que représentent les modèles les plus développés du marché actuel. Je pense que ce projet représente beaucoup pour toutes les personnes victimes d'accidents, de guerre ou nés avec une malformation, car cela peut les aider à retrouver une autonomie, une confiance en eux et une mobilité que leur handicap a entravé.

Cette conduite de projet m'a permis de m'ouvrir l'esprit et de découvrir différentes étapes d'un projet. Je pense que le but de ce genre de travail est de proposer aux élèves ingénieurs de l'apprentissage par le concret qui change des cours plus « théoriques » en nous donnant des responsabilités, une autonomie, en nous apprenant à travailler en équipe comme le doit un

véritable ingénieur diplômé en plein monde du travail. J'aime personnellement ce concept, étant plus à l'aise dans le travail concret que dans l'apprentissage théorique.

Je considère donc ce projet Piste comme réellement formateur car il donne un avant-goût crédible d'une expérience d'ingénieur tout en nous laissant libre de faire évoluer notre sujet comme bon nous semble.

Paul ECHAIZ GUEVARA

A la création du sujet lors des journées Créa-Piste nous n'étions qu'un petit groupe à avoir été séduit par ce projet, et nous n'avions pas les membres suffisants pour que le projet soit retenu. Cependant ce sujet différait de tous les autres qui étaient plutôt axés sur le développement durable et l'écologie. Ces notions sont certes très importantes et d'actualité mais ayant déjà effectué mon projet de première année sur l'osmose inverse je souhaitais un sujet de projet Piste totalement différent qui saurait me garder motivé sur toute l'année. Après avoir démarché certains étudiants nous avons pu former un groupe complet. Ayant déjà effectué deux années de médecine auparavant c'est en voyant le sujet « de la prothèse d'aujourd'hui au bras connecté de demain » que j'ai aperçus tout le potentiel de ce dernier. Certes nous nous aventurons sur un terrain glissant car ce sujet requiert des connaissances très précises et le marché de la prothèse n'est que très peu connu du grand public. Néanmoins tout le côté humain et l'espoir un peu utopiste que notre prothèse et son innovation puisse un jour être utilisée par des gens handicapés m'ont encouragé à persévérer.

Le début de l'année a commencé par les journées Créa-Piste qui m'ont beaucoup aidé tout au long du projet. En effet le travail en groupe peut être plus ou moins difficile selon le caractère des personnes et leurs méthodes de travail et c'est notamment la journée de détermination des profils qui m'a le plus aidé. Durant les deux premières années d'études à HEI j'ignorais complètement quel était mon profil et du coup comment me comporter en séance de groupe notamment pour la rédaction où les recherches pour le rapport. Après avoir répondu au questionnaire j'apprends que je suis complètement un garde côtes : il s'agit d'une personne qui va s'assurer que la mise en œuvre se passe bien et qui va se positionner à l'endroit où le besoin se fait sentir, sa capacité d'adaptation et de communication sont ses atouts. Personnellement je trouve que ce profil me correspond totalement, je communique facilement et j'essaie toujours de trouver des compromis afin que tout le monde y trouve son compte. L'activité de construction avec les spaghettis lors d'une autre séance Créa-Piste m'a montré la nécessité d'avoir un chef à l'écoute pour savoir trancher au bon moment. C'est pourquoi à la fin ces journées et lors de la première réunion avec tous les membres du groupe je me propose de devenir chef de projet. Voyant que le projet serait long et compliqué je voulais absolument structurer les recherches et éviter les problèmes que j'avais rencontrés les années précédentes où nous avons décidé de ne pas choisir de chef ce qui donnait parfois lieu à des mésententes plutôt difficiles à régler.

Toujours fidèle à mon poste de garde côtes j'ai essayé d'épauler chaque membre dans ses recherches en étant actif sur notre groupe Facebook et en étant à l'écoute et disponible. Mes cours de médecine m'ont beaucoup aidé pour la rédaction de la partie anatomie. En ce qui concerne la réalisation de la prothèse je dois avouer que mes connaissances étaient insuffisantes c'est d'ailleurs pour cela que j'ai essayé de participer à sa conception par des

moyens détournés, notamment en allant rencontrer des professionnels de la santé ou en visitant le salon Autonomic.

Tout au long de ce projet j'ai essayé d'être le plus objectif et le plus impartial possible en répartissant le travail de la façon la plus équitable possible en accord avec les capacités de chaque membre. De plus j'ai essayé de mettre à disposition tous les outils nécessaires pour faciliter les recherches et la rédaction notamment en instaurant un dropbox et en bombardant de nombreux messages sur Facebook afin de toujours montrer mon implication et ainsi continuer à motiver l'ensemble du groupe. Je garde une très bonne expérience de chef de groupe car malgré des baisses de motivations tout à fait normales, notre groupe était sérieux et appliqué. La réalisation de la prothèse a fait passer notre projet de l'abstrait au concret et je suis actuellement absolument convaincu de la viabilité de notre idée de prothèse.

Alae-Eddine RACHIDI

Durant la troisième année HEI nous avons l'opportunité de travailler en groupe autour d'un thème commun afin d'élaborer un projet sur ce dernier.

Ce travail de groupe nous a tout d'abord été introduit au travers des journées CREA-PISTE en début d'année scolaire.

Durant ces journées nous avons travaillé en groupe autour de plusieurs thèmes :

Nous avons pu dans un premier temps créer une tour en spaghetti par groupe de 10 personnes. Cette activité était assimilée à un mini-projet car elle nécessite une certaine organisation de groupe pour pouvoir être menée à bien.

J'ai trouvé que cette activité était très intéressante car elle a permis de mettre en avant les capacités de chacun au sein d'un projet de groupe : on pouvait par exemple cerner rapidement les leaders ou les personnes plus créatives par exemple. Cette activité est d'autant plus enrichissante car qu'elle nous permettait aussi de mieux connaître nos réactions vis-à-vis d'un problème à solutionner en peu de temps et donc de pouvoir connaître nos défauts à améliorer dans les situations de travail de groupe.

Toujours durant ces journées CREA-PISTE nous avons pu élaborer un thème de projet PISTE suivant une méthodologie expliquée par les professeurs.

J'ai eu la chance de pouvoir choisir en guise de projet PISTE celui que j'avais élaboré avec mes collègues de classe ce qui m'a permis de m'investir dans un projet dont j'étais à l'origine ce qui renforce mon intérêt pour celui-ci.

De plus j'ai trouvé ce projet à la fois intéressant et enrichissant, tout d'abord parce qu'il traite d'un sujet pour lequel je porte beaucoup d'intérêt qui est celui de l'ingénierie appliquée à la santé. C'est un thème que j'ai déjà pu découvrir pendant mon passage dans le cursus médical. J'ai donc pu apporter mes connaissances et mon expérience du monde de la santé au groupe, ce qui a été bénéfique pour certaines parties du projet.

Cette expérience était tout aussi enrichissante pour moi. Tout d'abord pour l'aspect de travail de groupe. Tout au long du projet nous avons dû nous tenir à une organisation rigoureuse et au respect des délais, qui sont à mon sens des caractéristiques importantes en vue de notre future carrière d'ingénieur. Ce projet m'a aussi permis de découvrir, durant la conception de notre prothèse l'utilisation de l'imprimante 3D, qui je pense est un outil qui a beaucoup d'avenir. J'estime donc avoir eu la chance de pouvoir me familiariser avec une technologie qui sera très présente dans le futur de l'ingénieur.

Au final ce projet était une expérience très enrichissante et satisfaisante pour moi même si j'ai pu avoir quelques regrets comme celui de ne pas avoir eu la chance de rencontrer les différents médecins car les rendez-vous se faisaient souvent le jeudi après-midi pendant mes cours de cursus aménagé.

François RELOTIUS

La santé et la recherche du bien-être des hommes sont des sujets en constante évolution. Grâce au développement des nouvelles technologies et aux progrès non négligeables de la médecine, la vie des personnes handicapées est facilitée et donc plus agréable.

En tant que futurs ingénieurs, il est de notre devoir de s'intéresser à de tels sujets d'actualités qui feront partie de notre quotidien pour nombre d'entre nous.

- Le choix du sujet

Je souhaitais absolument réaliser mon projet P.I.S.T.E. avec l'un de mes camarades. Malheureusement, quelques complications ont fait que nous ne pouvions pas satisfaire cette envie. J'ai donc dû me greffer dans un groupe où je ne connaissais personne. J'étais au début réticent à l'idée de devoir m'investir dans un tel projet sans avoir à mes côtés un bon ami. N'ayant pas le choix j'ai alors choisi de rejoindre un groupe qui travaillerait sur un sujet intéressant et d'actualité.

C'est avec peu de difficultés et aucun remord que j'ai demandé à intégrer le groupe sous la tutelle de Paul, notre chef de projet. En effet, je n'ai trouvé que peu de sujets attrayants dans lequel il restait de la place et je trouvais très pertinent de lier santé et technologies. Aussi, je trouve que la robotique en général est un domaine très actuel, qui est au cœur de nombreuses controverses, et notamment au niveau de l'éthique. J'étais donc très intéressé à l'idée d'acquérir plus de connaissances en la matière.

- Bilan personnel du Travail

Au départ, mes connaissances sur le sujet n'étaient que minimales. Ce sont nos nombreuses recherches qui m'ont permis d'approfondir mon savoir technique sur ce sujet, tout en restant à un niveau de compréhension accessible. Je me suis attelé en premier lieu aux capteurs. Ce sujet a été très délicat à comprendre puis à rédiger. Je pense avoir réussi à synthétiser cette partie de manière à ce qu'elle soit compréhensible par n'importe quelle personne n'ayant aucune connaissance à ce sujet. J'ai ensuite rédigé l'introduction. Etant l'amorce même de notre sujet, nous ne pouvions pas faire cette dernière à la va-vite.

J'ai trouvé un réel plaisir à rencontrer la chef du service de réadaptation et d'un praticien du centre hospitalier de Roubaix. C'est grâce à la mère de Victoire, qui y travaille, que nous avons pu prendre rendez-vous avec eux. Lors de notre échange, qui a duré une heure, j'ai pu poser beaucoup de questions et avoir des réponses adaptées. Le côté humain qui est ressorti de cette entrevue m'a réconforté sur le choix de notre sujet, l'importance de l'évolution de la science des prothèses et m'a donné envie de participer aux autres rendez-vous que nous allions avoir.

Par ailleurs, ce projet m'a apporté des connaissances dans des domaines non scientifiques tels que la capacité à travailler en groupe ou simplement l'écoute de l'autre. En effet, lorsque des problèmes sont rencontrés, il est de notre devoir et dans notre intérêt d'écouter les propositions de nos collègues de travail pour trouver des solutions.

Le travail en binôme nous a également permis de progresser ensemble et de nous expliquer mutuellement les aspects non compris ou qui nous semblaient flous, de développer des notions de responsabilité pour assurer le bon fonctionnement du groupe de travail et instaurer un sentiment de confiance à l'égard de l'autre, chacun s'occupant d'une partie des recherches. Par ailleurs j'ai pris plaisir à travailler de cette manière, ce qui me semble primordial.

Enfin, je souhaite remercier Paul qui a très bien géré notre groupe, il nous a permis de rendre le dossier dans les temps et nous a bien motivés, également Victoire qui grâce à ses prises d'initiatives très intéressantes, a été un vrai plus dans la réalisation du projet.

- Rétrospective sur la journée Créa-Piste

Lors de cette journée, nous avons réalisé une expérience hors du commun. Nous avons vingt minutes pour réaliser l'édifice le plus haut possible par petits groupes. Pour ce faire nous avons un mètre de scotch, des spaghettis et de la ficelle.

Un micro projet comme celui-ci a fait ressortir la personnalité de chacun. Il y a ceux qui prennent les initiatives et ceux qui exécutent. Pour ma part, je pense m'être retrouvé dans ces deux aspects. Je me suis affirmé lorsque je n'étais pas d'accord avec les autres mais suis resté à leur écoute car c'est ensemble que l'on trouve les meilleures solutions aux problèmes qui se posent. Les groupes ayant réalisé les meilleurs édifices sont sans aucun doute ceux où il y avait eu une bonne répartition des tâches à accomplir.

En conclusion, ce petit exercice nous a appris à travailler en groupe et à faire attention aux idées que pouvaient apporter les autres participants.

Victoire ROUSSEL

Lors des journées Créa-piste, j'ai pu découvrir que mes traits de caractère qui ressortent le plus en équipe sont ceux d'un imaginaire et d'un explorateur. C'est-à-dire que je propose des solutions et des améliorations sans me poser de barrière mais que dans un second temps je les analyse pour savoir si elles peuvent être réalisables ou non. De plus, les journées Créa-piste m'ont permis de comprendre l'importance d'avoir un groupe varié avec des personnalités différentes mais également avec des choix de domaines divergents. Sans cela, la cohésion d'un projet ne peut pas aboutir, chaque personnalité est essentielle dans un groupe pour s'épauler mutuellement et discuter des meilleures solutions à prendre.

J'ai voulu sélectionner un sujet et non une équipe lors des journées Créa-piste. J'ai donc choisi la problématique de cette prothèse de demain, nous étions un groupe de 4 personnes en semestre B tout en sachant qu'il y avait 6 autres personnes d'un autre semestre sans savoir qui elles étaient. En découvrant les personnes restantes une semaine plus tard, il s'est avéré que je connaissais la plupart d'entre elles étant dans la même classe les années précédentes. Je me suis sentie septique vis-à-vis de la composition du groupe dû à l'absence d'atomes crochus avec certaines personnes, j'ai hésité à demander de changer de groupe. Je suis cependant restée, en réalisant que cela pourrait être un réel entraînement pour ma vie future en entreprise.

Ce sujet m'a tout particulièrement intéressée venant de médecine et voulant faire ESEA l'année prochaine. Le réel enjeu qu'il propose m'a séduite et la possibilité de réaliser un prototype encore plus.

Cependant, je n'avais aucune connaissance sur le sujet, j'ai décidé d'axer mes recherches sur internet mais également au près d'un maximum de professionnels. J'ai donc pu rencontrer l'entreprise Ottobock, lors du salon « Autonomic », avec laquelle nous avons eu un long échange et beaucoup d'explications entre les différentes prothèses myoélectriques sur le marché. Ce salon m'a permis de rencontrer Frédéric Fruentès, amputé d'un bras suite à un accident de travail et président d'une association « un bras pour une nouvelle vie » que j'ai suivi sur Facebook. De plus, j'ai pu dialoguer sur internet via le forum « Adepa », avec des personnes amputées des membres inférieurs qui m'ont expliqué l'importance du choix de matériau pour la prothèse. J'ai également pu avoir l'avis de différents professionnels lors d'entretiens avec les médecins Labourot et Pat ou encore avec l'orthoprothésiste Barbez.

J'ai eu en charge la rédaction de différentes parties, celle des comparaisons des différentes prothèses et celle de la législation où mes recherches ont pu débiter grâce aux cours donnés par l'Enseignant, Monsieur Labbée en Master 1 à la faculté libre de droit.

Cependant, j'ai pu participer à d'autres parties car chacun avait en charge la relecture du travail de quelqu'un d'autre pour vérifier le sens et la compréhension. J'ai pu développer un réel intérêt pour la partie de Rodolphe avec les Arduino, Software et Hardware.

Ce qui a malheureusement freiné notre projet est la répartition des semestres. En effet, seul un membre de l'équipe est dans le semestre A, aussi la note de clarification, le WBS et le planning ont été fastidieux et compliqué à faire sans avoir, au préalable, eu les cours.

Je fus agréablement surprise de l'entente de l'équipe et des efforts de chacun pour travailler dans une bonne ambiance et laisser ses opinions personnelles de côté.

Ce projet PISTE a été formateur pour moi sur le plan technique mais également sur le plan relationnel. Il est indispensable que chacun se sente utile et soit libre de donner son avis et le développer.

J'ai réalisé que l'ingénieur était véritablement au service du monde qui l'entoure. Ses capacités d'écoute et son adaptabilité lui permettent de prendre en compte les besoins exprimés par différents secteurs d'activité. Il va assumer un rôle de coordination entre des professionnels issus d'horizons variés.

Alexandre SERVEL

Cette troisième année a été l'occasion pour nous, élèves d'HEI de travailler par petits groupes autour d'un thème qui a abouti à un projet.

Tout d'abord je souhaiterais parler des séances créa-pistes qui nous ont permis d'élaborer les sujets de projet-piste.

Durant ces journées nous avons travaillé sur différentes thématiques variées mais ayant en commun le travail en équipe, but du projet piste.

Durant une de ces séances nous avons par exemple dû concevoir, par groupe de 10 une structure faite de spaghettis. Cette structure devait être la plus haute possible. Ce travail a permis de mettre en évidence l'importance de savoir travailler en groupe. En effet, il est important d'être à l'écoute de chacun, de communiquer pour à la fin trouver une solution adéquate au problème.

Lors d'autres séances de créa-piste, il nous a été demandé de travailler sur l'élaboration des sujets. Nous devions préalablement choisir un article scientifique sur un thème qui nous intéressait. Une fois choisi, nous avons mis en commun ces thèmes pour en faire ressortir un sujet. Notre groupe a émis l'idée de travailler sur la prothèse de main.

J'ai beaucoup apprécié ces journées créa-piste de par leurs côtés ludiques et inventifs mais aussi le fait qu'elles mettent bien en évidence l'importance du travail de groupe.

Lors du choix du projet, mon premier souhait s'est tourné vers le sujet sur lequel mon groupe et moi avons travaillé. J'ai trouvé le sujet très attrayant à ce moment de l'année. En effet, il était possible de faire une approche mathématique et anatomique sur la prothèse. J'avais également en tête qu'une maquette pouvait être réalisée pour appuyer nos propos avec l'aide d'HEI.

Les recherches et la rédaction du projet ont été réalisées dans les délais fixés par notre professeur référent Hua Cao et notre chef de projet Paul Echaiz-Guevara. Le respect du calendrier est probablement la notion la plus compliquée à réaliser mais nous avons su fournir les efforts nécessaires pour le respecter. Nous voulions nous mettre vite au travail pour ne pas manquer de temps à l'approche de la date fatidique.

Pour cela, nous avons commencé les recherches rapidement et nous avons notamment pris rendez-vous avec différents médecins pour de plus amples informations mais étant en cursus aménagé je ne pouvais y assister le jeudi après-midi.

Durant la rédaction du projet, nous avons établi que je devais aborder deux thèmes. Premièrement, les composants nécessaires à la fabrication de notre prothèse, c'est à dire les servomoteurs et les capteurs musculaires. En second lieu, j'ai rédigé une partie détaillée sur le matériau ABS que nous avons utilisé pour fabriquer notre prothèse grâce à une imprimante 3D. J'ai trouvé cette dernière très intéressante car j'y ai étudié des notions que je pourrais retrouver en 4^{ème} année.

Sur le plan personnel et général, j'ai apprécié travailler à plusieurs sur un thème commun très intéressant, échanger et solutionner les problèmes qui se sont posés. Ce projet m'a beaucoup apporté au niveau du respect d'un calendrier, du travail de groupe et de l'écoute.

Projet d'Intégration Scientifique, Technologique, Economique

Résumé du projet PISTE

Année universitaire 2015/2016

RESUME : Aujourd'hui le marché de la prothèse prend un véritable tournant : avec le développement des nouvelles technologies et notamment les innovations en matière de systèmes connectés beaucoup de chemin a été parcouru. Cependant les prothèses sont onéreuses et leur accès pour les personnes handicapées restent encore difficile. Ce rapport qui se veut totalement objectif présente dans un premier temps l'étude des prothèses de l'avant-bras aussi bien sur le plan économique que sur le plan législatif. On constate notamment qu'il reste encore des efforts à fournir pour faciliter l'intégration des personnes amputées. Dans un second temps l'étude a été poursuivie par la réalisation d'une prothèse imprimée en 3D présentant l'innovation d'effectuer des mouvements simples à l'aide de capteurs de couleurs. Ces mouvements codés en amont pourraient à longs termes faire concurrence aux prothèses myoélectriques. Ce prototype a pour but de montrer que l'accès aux prothèses peut être facilité avec un coût moindre. Ce travail de recherches très concrètes a permis à l'équipe de prendre contact avec des professionnels de la santé, mais aussi des handicapés porteurs d'une prothèse. Plus qu'un simple projet, nous avons voulu pousser la réflexion plus loin et peut-être entrouvrir des portes vers une amélioration des conditions de vie des handicapés.

ABSTRACT: Today the prostheses market is considerably evolving: thanks to the development of new technologies and especially innovations concerning connected systems a lot of progress has been made. However prostheses are expensive and it is not always easy for the disabled to get to them. In a first time, this connection which is considered as totally objective presents the study of prostheses for forearms as well financially as legally. We especially observe that effort still has to be made to help people who have been amputated to be integrated. In a second time, the study has concentrated on the creation of a prosthesis printed in 3D, which is innovative because it can execute simple gestures thanks to colored captors. These movements upstream coded could on the long term compete with myoelectric prostheses. This prototype's aim is to prove that the access to prostheses can be made easier and cheaper. This work of very active research has enabled the team to contact healthcare professionals but also disabled people equipped with a prosthesis. This is more than a mere project as we wanted to develop our goals and maybe improve the living conditions of the disabled.