

---

EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE LAUSANNE  
POLITECNICO FEDERALE DI LOSANNA  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY LAUSANNE

---

**INSTITUT D'INGENIERIE DES SYSTEMES (I 2S)**

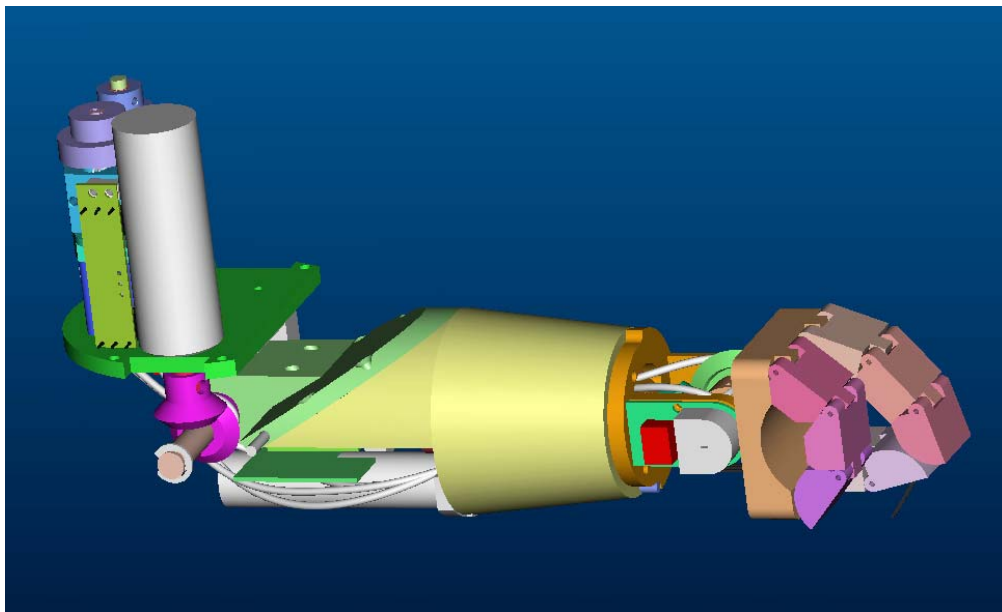
LABORATOIRE DE SYSTÈMES AUTONOMES (ASL3)  
CH-1015 LAUSANNE



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Projet de diplôme hiver 2003 - 2004

## Construction d'une main articulée pour le robot humanoïde Robota



**Candidat :** Lorenzo Piccardi

**Professeur :** Aude Billard

**Assistant :** André Guignard

**Section :** Microtechnique



## **Table des matières**

<b>1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Cahiers des charges .....</b>	<b>4</b>
2.1 Plages de mouvement.....	4
2.2 Proportions et poids.....	4
2.3 Esthétique .....	5
2.4 Capteurs.....	5
2.5 Estimation des couples dans les différentes articulations .....	5
2.5 Peau .....	7
<b>3. Catalogue des solutions .....</b>	<b>8</b>
3.1 Chaîne cinématique .....	8
3.2 Les DDL .....	8
3.2.1 1 <sup>er</sup> DDL.....	8
3.2.2 2 <sup>ème</sup> DDL.....	11
3.2.3 3 <sup>ème</sup> DDL.....	14
3.2.4 Capteurs de position.....	19
3.2.5 Les plages des différents DDL et leurs blocages .....	21
3.3 Etude sur la peau artificielle.....	22
<b>4. Choix, calculs et dimensionnement.....</b>	<b>24</b>
4.1 Choix des systèmes d'entraînement .....	24
4.1.1 1 <sup>er</sup> DDL du poignet.....	24
4.1.2 2 <sup>ème</sup> DDL du poignet .....	31
4.1.3 Ouverture et fermeture de la main.....	35
4.2 Contraintes sur la pièce BOU_CYL_MAIN .....	46
4.3 Contraintes sur la pièce POIGNET .....	48
4.4 Masses et longueurs totales .....	51
4.5 Prix des pièces à acheter.....	53
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>54</b>
<b>6. Remerciements.....</b>	<b>55</b>
<b>7. Bibliographie.....</b>	<b>56</b>
<b>8. Annexes.....</b>	<b>59</b>

## **1. Introduction**

Ce projet de diplôme a comme but le développement d'un prototype de main articulée qui aura deux degrés de liberté pour le poignet et un système de préhension ressemblant le plus possible à une main humaine. Ce système sera conçu pour être monté sur le prototype de bras mécanique déjà existant du Robot humanoïde Robota®.

Un point important dont on devra tenir compte lors de la conception sera le facteur esthétique ; l'avant-bras, le poignet et la main devront avoir une forme humanoïde.

## 2. Cahiers des charges

### 2.1 Plages de mouvement

Les plages de mouvement dans le poignet et la main sont :

Articulations du poignet :

- 1<sup>er</sup> degré de liberté 180° (Rotation du poignet)
- 2<sup>ème</sup> degré de liberté 180° (Inclinaison du poignet)

Main :

- ouverture et fermeture pour saisir les objets que Robota doit manipuler (pour la taille des objets voir §2.5)

### 2.2 Proportions et poids

Les pièces qui composent le poignet et la main seront montées sur le prototype du bras, donc les proportions doivent rester les mêmes que celle du prototype. La distance de l'axe du coude jusqu'au centre de la main fait 108mm de longueur, le poignet mesure 30mm de diamètre, la main mesure 37mm du poignet jusqu'au point de fermeture des doigts, le diamètre du cône de l'avant-bras varie de 40mm à 30mm de diamètre.

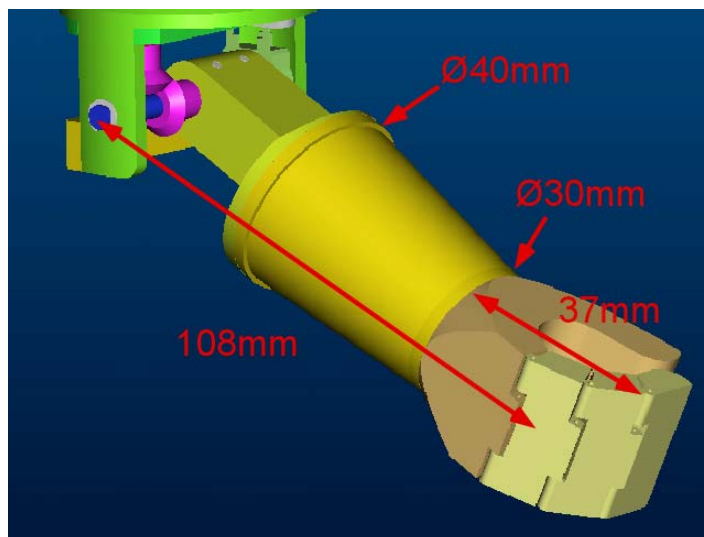


Figure 1 Proportion du prototype du bras

Le poids du système ne doit pas dépasser les 200g estimé lors de la conception du bras du prototype (Voir [6]).

### 2.3 Esthétique

La forme du système doit être le plus humanoïde possible, surtout la main ne doit pas être trop loin de la forme d'une vraie main et aussi les mouvements doivent répondre à cette condition.

De conséquence le facteur esthétique sera déterminant lors de la conception.

### 2.4 Capteurs

Dans le système on doit intégrer des capteurs absolus de position comme par exemple des potentiomètres ou des encodeurs optiques absolus, pour repérer la position des différents degrés de liberté (DDL) sans besoin de faire une calibration des DDL toutes les fois que le bras sera utilisé.

Dans la main on doit pouvoir détecter la présence d'objets.

Les capteurs seront choisis dans le but de donner une valeur absolue de la position pour les 2 DDL, pour la main l'information importante à relever sera surtout la présence d'objet.

On devra tenir compte de l'espace qui prendront les circuits des capteurs et les circuits de commande.

### 2.5 Estimation des couples dans les différentes articulations

Pour déterminer les couples nécessaires dans les articulations du poignet et dans la main on prend comme effort maximal requis, celui créé par la manipulation d'un objet de 200g avec son centre de masse à une distance de 5 cm du premier axe de rotation de la main et de 2 cm du deuxième.

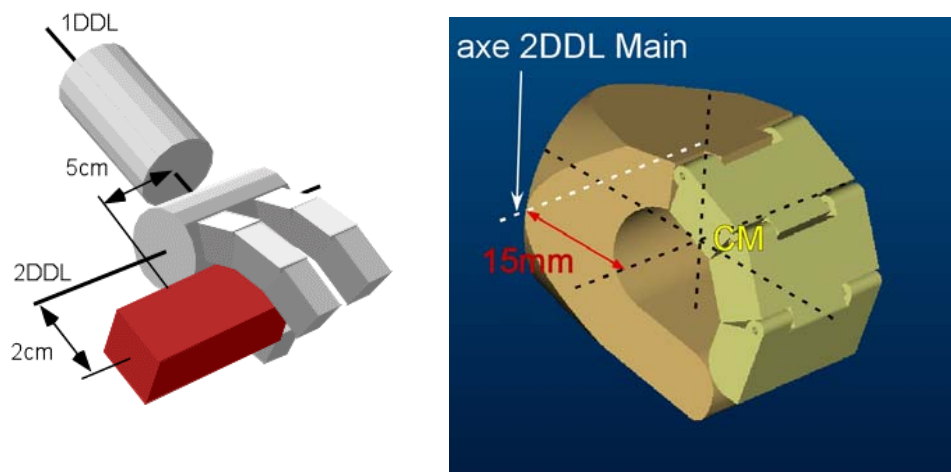


Figure 2 Objet dans la main et Centre de Masse de la main du projet précédent

Etant donné que la main est presque symétrique par rapport au premier axe de rotation, dans ce cas la masse du poignet est négligée, et donc le couple pour bouger la main vide est petit pour le premier DDL.

La distance entre l'axe du deuxième DDL et le centre de masse de l'objet à manipuler est plus petite par rapport au premier DDL à cause des proportions de la main, mais on doit en plus

soutenir le poids de la main qui a son centre de masse décalé par rapport à l'axe de rotation d'environ 15 mm si on garde plus ou moins les proportions de la main du projet précédent.

La masse de 200g est largement plus lourde par rapport à celle mesuré sur les objets que Robota aura à manipuler. On utilisant cette valeur dans les calculs, on aura ainsi une bonne marge de sécurité pour assurer le fonctionnement de la main.

Les masses des objets que Robota aura à manipuler sont :



**16.4 g**

**Ø 25mm x 50mm**



**23.8 g**

**25mm x 25mm x 50mm**



**9.9 g**

**10mm x 25mm x 50mm**



**12.2 g**

**10mm x 25mm x 75mm**



**10.4 g**

**25mm x 25mm x 25mm**

La nouvelle main va garder plus ou moins les proportions de la précédente. Donc les pièces qui pourront vraiment s'accommoder dans la main sont celles de diamètre inférieur à 15mm. La distance à main presque ouverte entre le gros doigt et le pouce est de l'ordre de 17mm et donc les objets que le prototype peut prendre sont dans cet ordre de grandeur.

Couple pour le premier degré de liberté de l'articulation du poignet :

$$M_1 = d_{CMobj} \cdot m_{obj} \cdot g = 0.05 \text{ m} \cdot 0.2 \text{ Kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cong 0.1 \text{ Nm}$$

$M_1$  : Couple dans le premier axe de l'articulation du poignet

$m_{obj}$  : Masse d'un objet (masse maximale de 200g)

$d_{CMobj}$  : Distance entre le centre de masse de l'objet et le premier axe de l'articulation du poignet (5cm)

$g$  : Constante de gravitation

Couple pour le deuxième degré de liberté de l'articulation du poignet :

$$M_2 = d_{CMMains} \cdot m_{Main} \cdot g + d_{CMobj} \cdot m_{obj} \cdot g = 0.015m \cdot 0.055Kg \cdot 10m/s^2 + 0.02m \cdot 0.2Kg \cdot 10m/s^2 \cong 0.048Nm$$

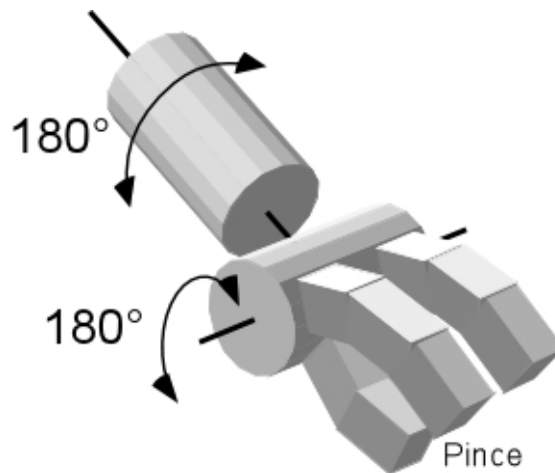
$M_2$ :	Couple dans le deuxième axe de l'articulation du poignet
$m_{Main}$ :	Masse de la main (la vieille main pesait 55g)
$m_{obj}$ :	Masse d'un objet (masse maximale de 200g)
$d_{CMMain}$ :	Distance entre le centre de masse de la main et le deuxième axe de l'articulation du poignet (15mm)
$d_{CMobj}$ :	Distance entre le centre de masse de l'objet et le deuxième axe de l'articulation du poignet (2cm)

## 2.5 Peau

Le bras et la main de Robota nécessitent d'un revêtement de peau artificiel pour avoir un aspect encore plus humain. Une étude pour choisir le matériau adapté sera faite vers la fin du projet.

### **3. Catalogue des solutions**

#### **3.1 Chaîne cinématique**



**Figure 3 Chaîne cinématique de la main**

Dans le poignet de l'être humain les degrés de liberté sont confondus dans un même point. Pour garder un comportement humanoïde du poignet du robot, on a essayé de placer les axes de rotations du poignet approximativement comme dans l'être humain. Le poignet humain est plus complexe par rapport à la simplification du modèle qu'on utilise.

On a donc comme premier DDL naturel celui de la rotation de l'avant-bras et du poignet, successivement l'inclinaison du poignet.

En dernier on a la fermeture de la main par le moyen des doigts.

#### **3.2 Les DDL**

Dans les paragraphes suivants sont expliquées l'évolution de la conception et les différentes solutions envisagées pour les différents DDL, jusqu'à arriver aux solutions finales choisies.

##### **3.2.1 1<sup>er</sup> DDL**

Le premier degré de liberté est la rotation du poignet.

La solution la plus naturelle pour ce type de mouvement serait l'utilisation d'un entraînement par moteur directement sur l'axe de rotation du poignet. Cependant, il nous faut tenir en compte de l'espace très restreint qu'on ne peut pas se permettre d'utiliser complètement pour un seul DDL.

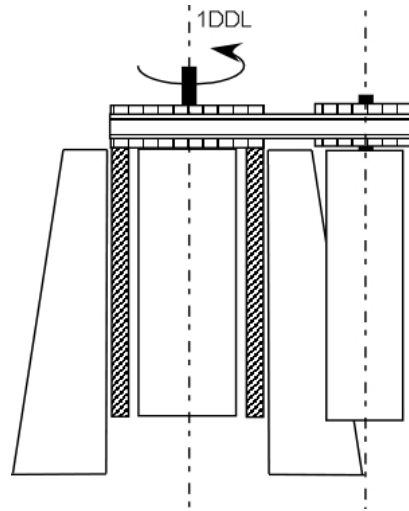
Pour n'occuper pas l'espace au centre du poignet avec un moteur et laisser l'espace pour les autres mécanismes, une possibilité c'est le décalage de l'axe du système d'entraînement. Ceci serait



réalisable par le moyen de mécanismes de transmissions comme : engrenages, courroie, câble, bande ou bielle-manivelle.

L'avantage d'une courroie c'est l'élimination du jeu par précontrainte de la courroie, mais à cause de l'entraxe nécessaire pour ce genre de mécanisme l'espace requis serait trop grande.

Pour le cas d'une bande ou un câble l'entraxe serait aussi grand.



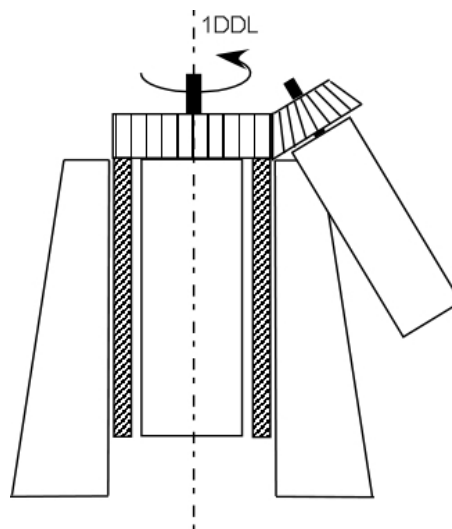
**Figure 4 Transmission par courroie**

Si on utilise des engrenages avec petit module et diamètre on arriverait à des entraxes plus petits par rapport aux autres systèmes, mais dans ce cas on serait obligé de réduire le jeu entre les engrenages par un système de précontrainte ou par une diminution de l'entraxe.

La diminution d'entraxe est la façon la plus simple pour réduire ce jeu.

La transmission par engrenages est la plus intéressante et c'est celle qu'on va utiliser dans ce DDL.

Si on utilise un engrenage à denture droite combiné avec un engrenage conique on pourrait placer le moteur incliné, suivant la forme conique du bras.



**Figure 5 Transmission par engrenage conique et cylindrique**

Ca pourrait être une solution intéressante mais pour cette configuration on n'a pas suffisamment d'espace disponible.

Avec deux engrenages à denture droite l'axe du moteur est parallèle à celui de l'axe de rotation du poignet. Pour optimiser l'espace on devrait monter à la sortie du moteur un engrenage de diamètre

petit, et celui sur l'axe du poignet plus grand, en permettant ainsi aussi un couple de sortie finale plus grande et un espace pour les autres DDL majeur.

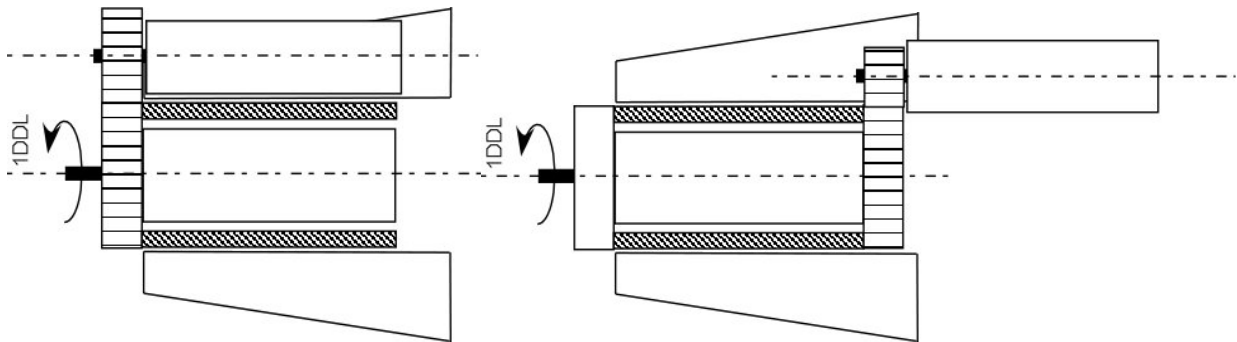


Figure 6 Transmission par engrenages droits

La solution finale choisie est celle avec engrenage droit, la position et type de moteur et réducteur ont été choisis en tenant compte de plusieurs facteurs :

Le couple requis à la sortie du moteur-réducteur, le diamètre et longueur du moteur le plus petit possible pour réussir à le placer à l'intérieur du bras, la dimension des engrenages pour optimiser la place et la réduction, garder suffisamment d'espace pour les autres mécanismes.

On placera ainsi le moteur le plus en arrière possible vers le coude.

L'entraxe entre les deux engrenages pourra être ajusté lors du montage du moteur sur l'avant-bras, en assurant ainsi presque complètement l'élimination du jeu des engranges.

L'engrenage plus grand est solidaire à tout le reste du poignet, à son intérieur sera logé le système d'entraînement du 2<sup>ème</sup> DDL. La rotation est guidée à l'intérieure de l'avant-bras grâce à un palier lisse.

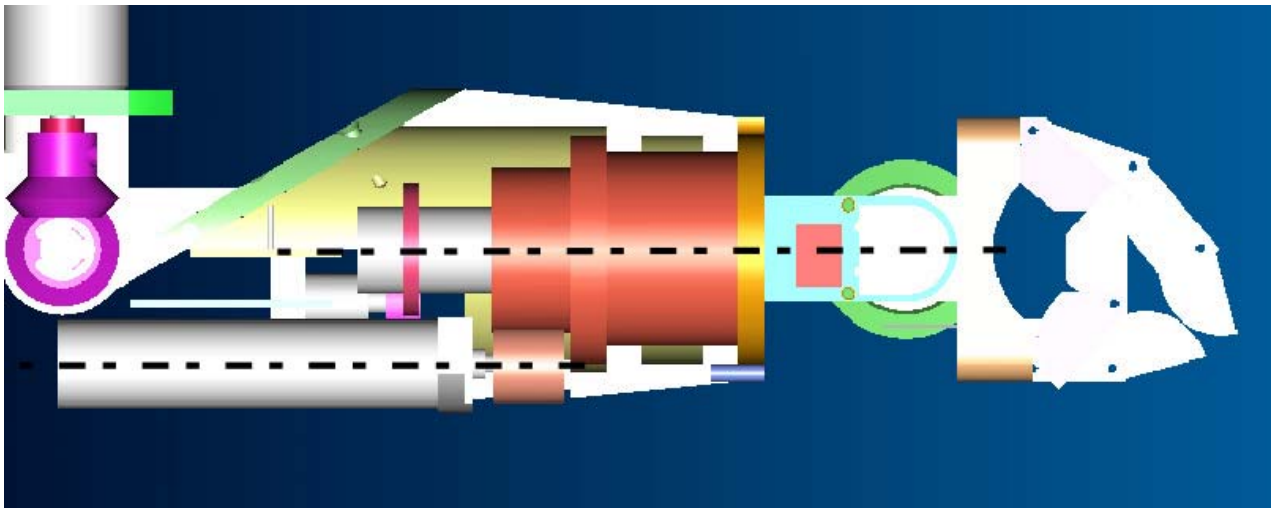


Figure 7 1<sup>er</sup> DDL solution finale

### 3.2.2 2<sup>ème</sup> DDL

Le deuxième degré de liberté est l'inclinaison du poignet.

Le premier point à décider est où placer exactement l'axe de rotation, si plus vers le centre de masse de la main ou plutôt vers la jonction du poignet.

Du point de vue esthétique il faudrait mettre l'axe près de la jonction du poignet, ce qui est plus similaire à ce qu'on a dans le poignet humain. Quand la main est inclinée, avec une configuration comme celle de la main humaine, on perdrait de l'espace à la jonction du poignet qui serait occupé par la main.

Avec l'axe de rotation placé vers le centre de masse de la main, l'inclinaison du poignet s'avère moins encombrante.

Ainsi on a choisi de placer l'axe entre la jonction du poignet et le centre de masse de la main, on réduisant ainsi en partie le couple nécessaire au niveau de l'axe (distance entre axe de rotation et objet dans la main le plus petit possible) et en même temps gardant le plus possible l'anatomie humaine. L'inclinaison de la main ne prendra comme ça pas trop de place et le mouvement restera suffisamment humain et naturel.

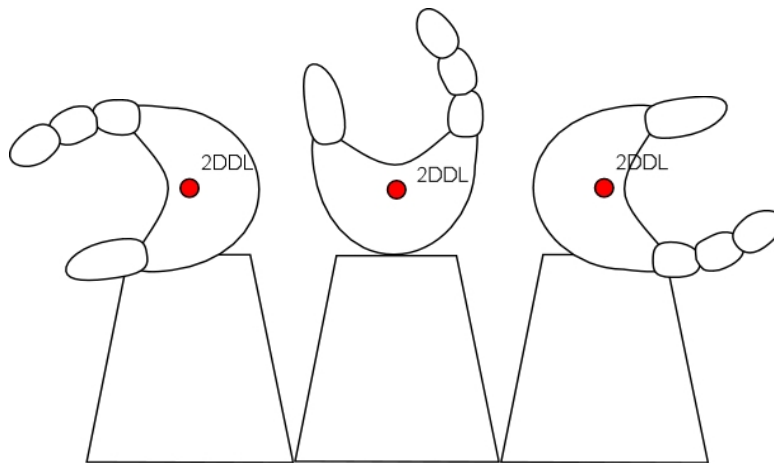


Figure 8 Position de l'axe du 2<sup>ème</sup> DDL plus vers le centre de masse de la main

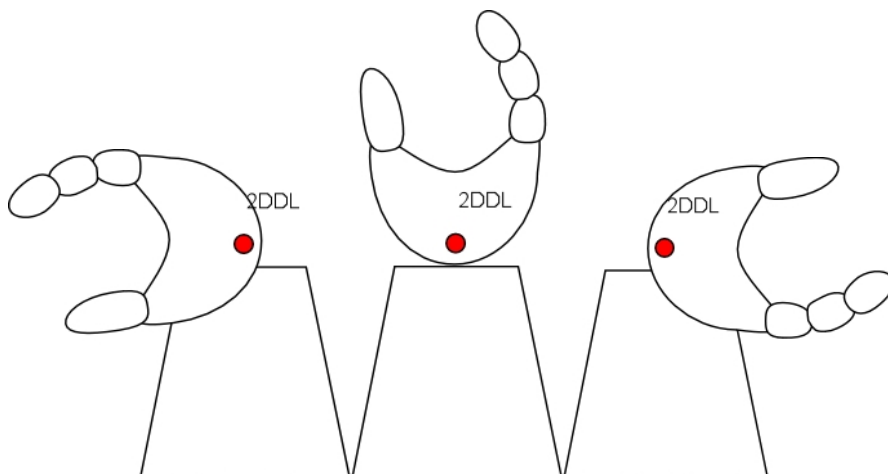


Figure 9 Position de l'axe du 2<sup>ème</sup> DDL plus vers la jonction du poignet

Pour ce degré de liberté un entraînement direct sur l'axe n'est pas possible, l'espace pour un moteur le long de l'axe étant insuffisant.

Ainsi on est obligé de trouver un mécanisme qui transmet jusqu'à cet axe le mouvement circulaire nécessaire.

Ceci serait réalisable par le moyen de différents mécanismes, comme des engrenages coniques, un engrainage droit plus un engrenage assiette, un système bielle-manivelle, une courroie, une visse sans fin avec engrenage cylindrique à denture hélicoïdale.

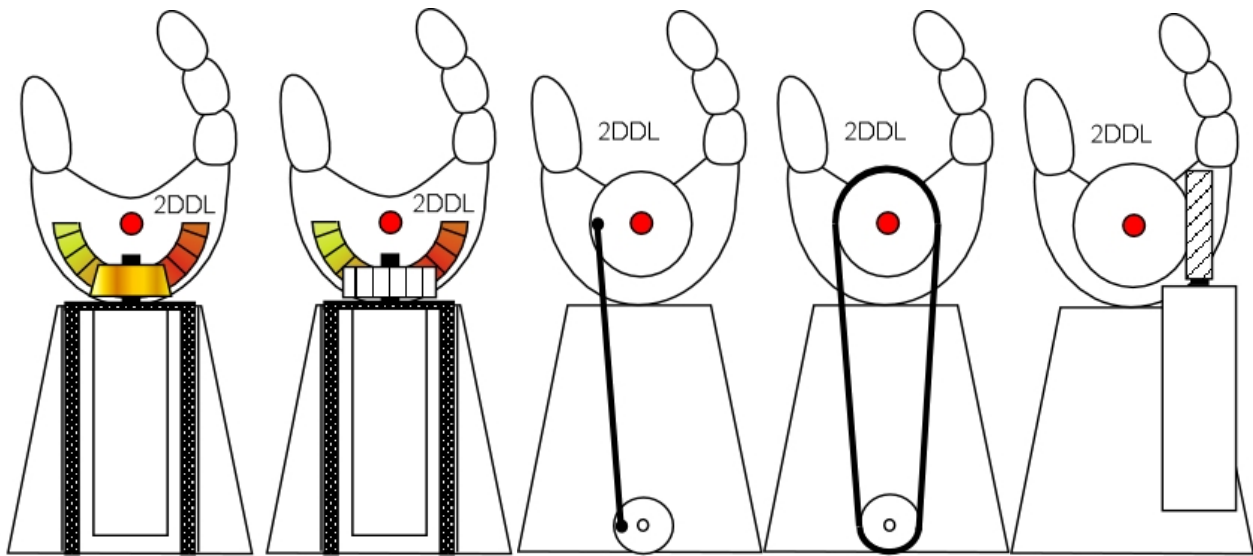


Figure 10 Différents mécanismes de transmission pour le 2<sup>ème</sup> DDL

Pour un système avec courroie on devrait placer le moteur parallèlement à l'axe de sortie ce qui n'est pas possible à cause de la longueur trop grande du moteur (~50mm) qui le ferait sortir latéralement du bras (~Ø40mm).

Pour un système bielle-manivelle on aurait ce même problème.

Avec un moteur linéaire on pourrait entraîner le système bielle manivelle sans sortir latéralement du bras, mais des moteurs linéaires suffisamment petits et puissants intégrables dans l'avant-bras on n'en a pas trouvé dans le commerce.

Des engrenages coniques où engrenage droit plus engrenage assiette ont le même avantage de transmettre le couple entre deux axes concurrents à 90°, ce qui permettrait de placer le moteur perpendiculairement à l'axe du 2<sup>ème</sup> DDL et parallèlement à celui du 1<sup>er</sup> DDL.

Pour rendre les deux DDL indépendants l'un de l'autre on doit fixer le moteur sur la main, ainsi quand on fait tourner la main sur son 1<sup>er</sup> axe, le moteur du 2<sup>ème</sup> DDL tourne avec la main.

Pour cette solution on doit trouver un moteur de diamètre suffisamment petit et court pour être installé à l'intérieur de l'avant-bras et plus précisément à l'intérieur de l'engrenage du 1<sup>er</sup> DDL, en laissant aussi de l'espace pour les différents câbles qui doivent aller jusqu'à la main.

Clairement plus un moteur est petit en diamètre plus il sera long à cause des étages de réduction nécessaire pour avoir un couple de sortie suffisant. On doit donc trouver le compromis idéal pour le cas étudié.

Aussi pour un système à vis sans fin avec engrenage cylindrique à denture hélicoïdale on a l'avantage de transmettre le couple entre deux axes concurrents à 90°, dans ce cas on a en plus un décalage entre les axes, correspondant plus ou moins au rayon de l'engrenage. Dans notre cas on n'a pas assez d'espace pour un moteur décalé.

La solution finale choisie est celle avec engrenages coniques.

Pour éliminer le plus possible le jeu entre les engrenages coniques, on pourra lors du montage ajuster l'engrenage conique sur l'axe du moteur pour diminuer l'entraxe.

La position des engrenages a été choisie dans le but de diminuer le plus possible le jeu prévu par le constructeur, qui est de 0.2 fois le module.

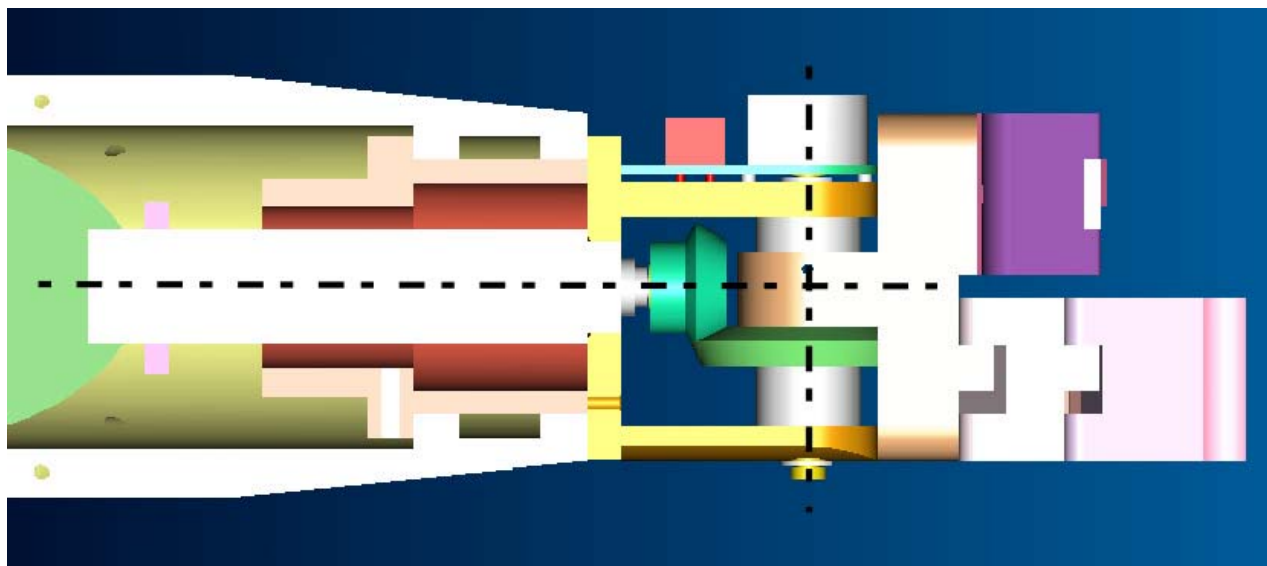


Figure 11 2<sup>ème</sup> DDL solution finale

### 3.2.3 3<sup>ème</sup> DDL

La préhension de la main est le mécanisme où on doit faire le plus d'attention au niveau esthétique. La position des doigts et leur mouvement doit ressembler le plus possible à celui de l'être humain, en gardant en même temps une prise des objets suffisamment efficace.

Comme première chose on a réduit le nombre de doigts de la main par rapport à ceux de la main humaine. Etant l'espace très restreint pour la motorisation des doigts, c'est plus sage de réduire le plus possible leur nombre. Trois doigts ont l'avantage de donner trois points de contact sur un objet, ce qui rend la prise plus stable.

La direction de fermeture des trois doigts doit être choisie dans le but de satisfaire en même temps la contrainte esthétique et l'efficacité de la préhension des objets. Pour tenir des objets dans la main d'une façon stable il faut avoir une surface de contact entre doigts et objets la plus grande possible. Une configuration avec doigts en parallèle, maximise la surface de contact pour des objets simples comme des cylindres. Pour des doigts qui se ferment avec des directions pas parallèles on a une surface de contact mineur contre des pièces comme le cylindre, mais c'est la configuration plus efficace pour des pièces sphérique ou avec des formes moins simples.

Les pièces que Robota aura à manipuler sont plutôt simples, comme des cylindres ou des pièces rectangulaires. Pour ce genre de pièces la configuration à doigts parallèles est la meilleure.

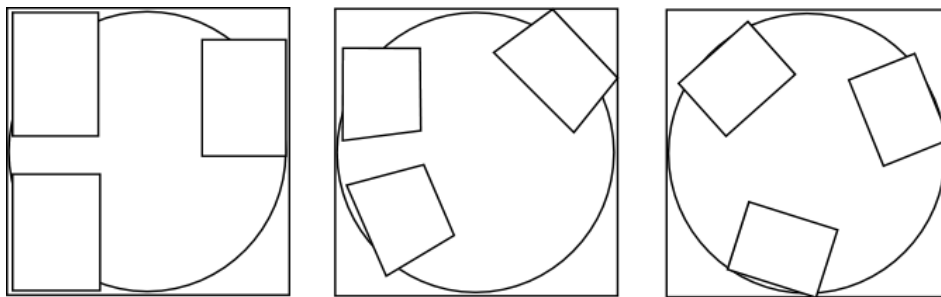


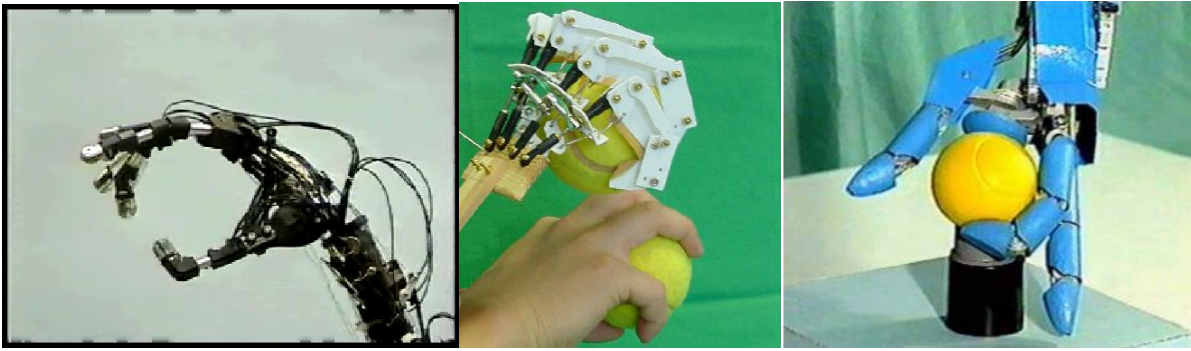
Figure 12 Vue depuis le haut de différentes configurations de 3 doigts

On regardant ce qui existe déjà, on s'aperçoit que toutes les mains robotiques humanoïdes ont la taille d'une main adulte, et les systèmes pour les entraîner sont souvent très compliqués et demandent beaucoup d'espace.

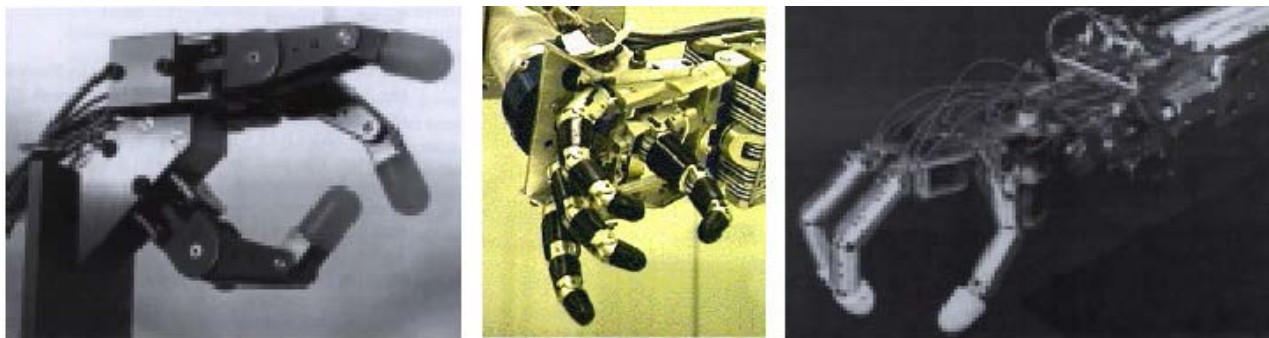
La Main de Salisbury est un cas très intéressant de main humanoïde (Figure 14, et lien Internet dans la Bibliographie), ses trois doigts ont plusieurs DDL, un doigt possède 3 DDL qui sont entraînés avec 4 câbles par un total de 12 moteurs pour entraîner toute la main. Les manipulations possibles pour cette main sont surprenantes.

Une autre main intéressante est actionnée par des polymères électroactifs (EAP) (Figure 13), (Voir liens Internet dans la Bibliographie et livres [13] et [14] pour plus d'informations) c'est une solution très intéressante mais encore domaine de recherche donc pas applicable pour notre cas.

L'avantage de la technologie avec polymères électroactifs est que le comportement et les caractéristiques des polymères sont très similaires à celles des muscles biologiques. Donc s'adaptent particulièrement bien aux applications de robotique humanoïde. L'espace prit par ce type d'actionneur est plus petit comparé à celui des motorisations plus courantes. Un désavantage de ces polymères c'est la complexité de leur contrôle dû à la caractéristique non linéaire de leur comportement quand ils sont actionnés. L'évolution de ce type de technologie serait à suivre et à tenir en compte pour les développements futurs de Robota.



**Figure 13 Mains humanoïdes existantes (Robotic hand with EAP actuators, Tuat Karlsruhe humanoid hand, Main II de l'université de Bologna)**

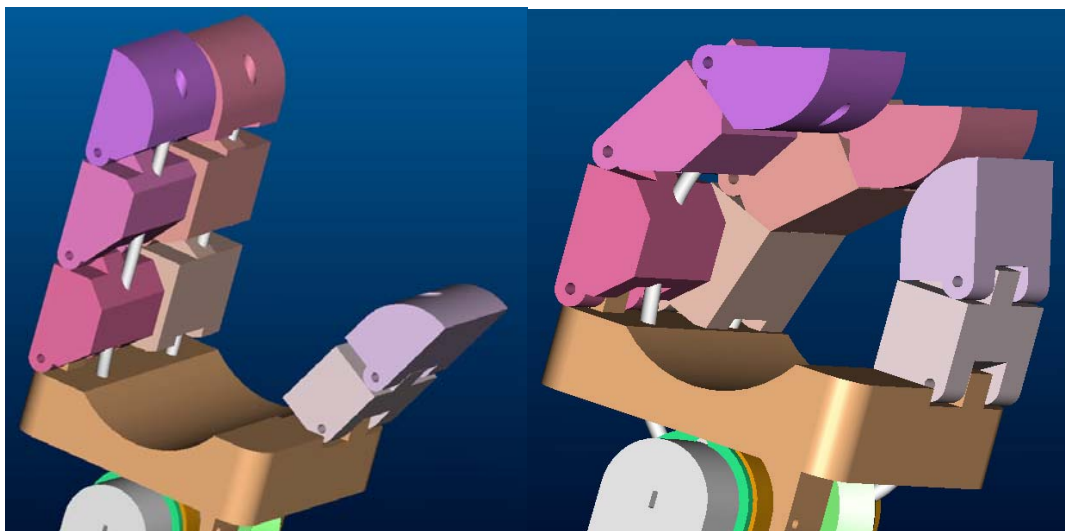


**Figure 14 Stanford/JPL Hand (Main Salisbury), Utah/MIT Hand, Hitachi LTD Hand**

Dans l'ordre de grandeur de la main de ce projet on trouve souvent plutôt des pinces et pas des mécanismes ressemblant à la main humaine. Ce n'est pas facile d'intégrer des mécanismes compliqués dans un espace restreint comme celui de la main de Robota.

Le choix final pour la configuration des doigts de la main est celui où les doigts ont une direction de fermeture parallèle.

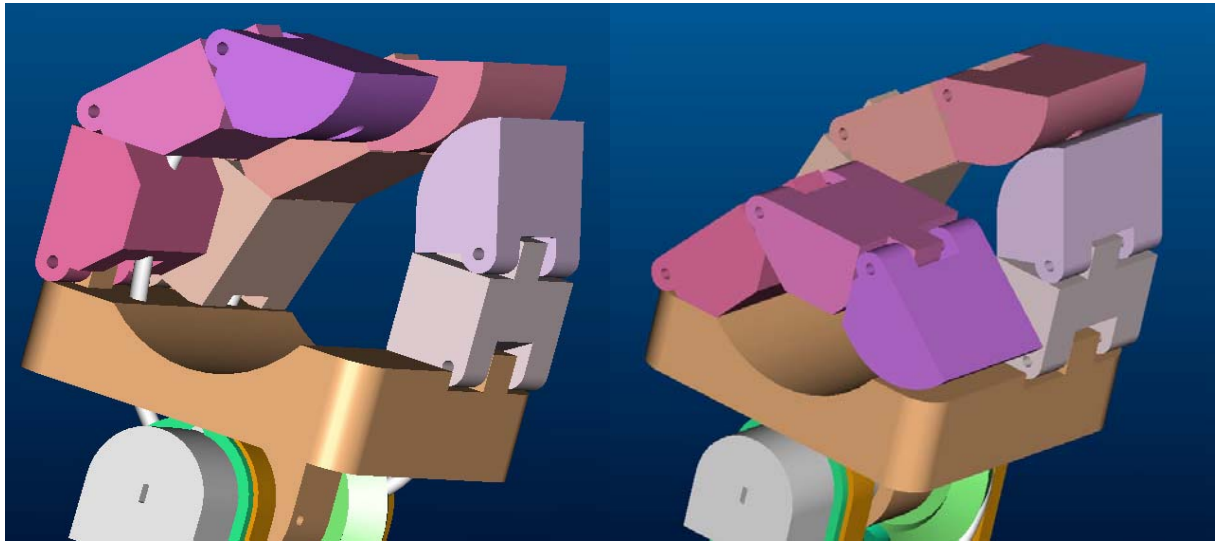
Le premier doigt et le pouce se ferment ensemble et les bouts des doigts se touchent en fin de mouvement, ceci permet de prendre des objets minces comme par exemple une feuille de papier. Des objets de l'ordre de 15 mm de diamètre peuvent être pris avant que les deux doigts se touchent.



**Figure 15 Main, et fermeture Pouce - Doigt1**



Le troisième doigt rend la préhension de l'objet plus stable, et permet la prise des objets de diamètre inférieure qui ne peuvent pas être pris par le premier doigt et le pouce.



**Figure 16 Fermeture du Doigt2**

On va garder le mécanisme de fermeture développé dans le projet précédent [6] pour le pliage des doigts.

Le principe s'inspire des tendons de la main humaine : au moyen d'un câble on plie le doigt.

Le câble est fixé à la pointe du doigt, et il glisse à l'intérieur des phalanges et du poignet. La pointe du doigt se plie en premier, suivie successivement par les autres phalanges.

Les trois doigts se plient de façons distinctes ; les courses nécessaires aux câbles pour fermer la main ne sont donc pas les mêmes pour les différents doigts.

D'autres solutions pour entraîner les doigts pouvaient être de type hydraulique ou pneumatique, mais ce genre de solution nécessitent des pompes qui s'avèrent trop encombrantes pour être intégrées à l'intérieur de Robota. On aurait pu fermer la main par le moyen d'électroaimant, mais on avait le problème de l'échauffement de la bobine qui aurait fondu le futur revêtement plastique de la peau.

On ne peut pas se permettre d'utiliser trois motorisations séparées par doigt à cause du manque d'espace dans l'avant-bras. Mais à cause de ça les doigts ne pourront pas être indépendants entre eux.

Une possibilité pour tirer les câbles serait de les entraîner par le moyen d'un moteur linéaire, mais le problème c'est qu'on ne trouve pas de moteurs linéaires suffisamment puissants et petits intégrables dans le bras.

Une autre solution serait d'utiliser un moteur et de convertir le mouvement de rotation en un mouvement linéaire par le moyen d'une vis et un écrou. Avec ce genre de mécanisme on a l'avantage de pouvoir garder la position de l'écrou où seraient fixés les câbles sans besoin d'utiliser le moteur en continu, grâce à l'irréversibilité caractéristique des systèmes vis-écrou (rendement inférieure au 50%). Le moteur dans ce cas doit être suffisamment puissant pour tirer les trois câbles. Avec cette solution on ne peut pas arrêter la fermeture des doigts indépendamment l'un de l'autre.

On a cherché plusieurs solutions permettant de plier les doigts l'un après l'autre pour donner un mouvement de fermeture plus séquentiel des doigts par le moyen d'une seule motorisation.



On s'est aussi aperçu qu'on pouvait fermer les doigts tous en même temps, mais qu'on aurait du arrêter de les entraîner à des instants différents à cause des courses distinctes des câbles.

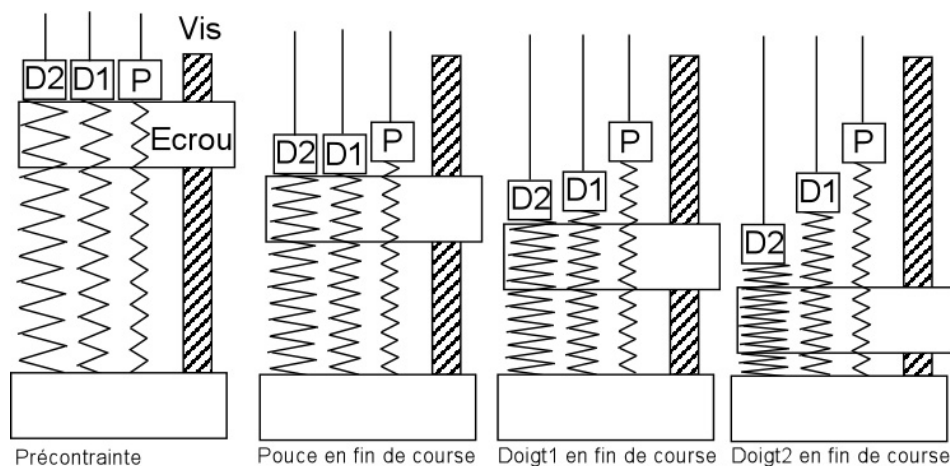
Pour les deux cas on nécessite de trouver un mécanisme qui rende les doigts pratiquement indépendants entre eux, mais qu'en même temps nécessite d'un système d'entraînement commun aux trois doigts.

Une solution qui rende la motorisation des doigts presque indépendante est celle où l'on choisit trois ressorts différents par doigts.

Ils seront choisis par rapport aux forces et courses requises par les trois différents doigts.

Ce sont les ressorts qui entraînent les doigts avec une force plus grande au début de la fermeture (main ouverte) et plus faible en fin de course.

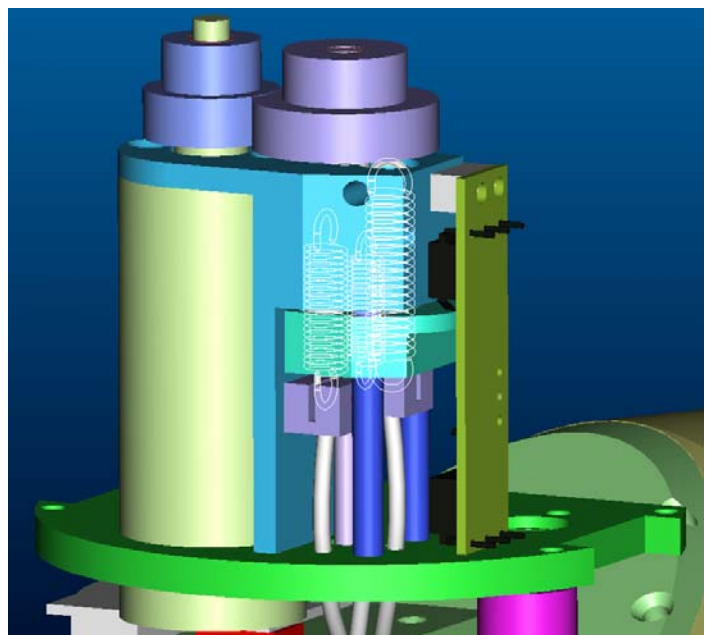
L'extension des ressorts sera faite par le système vis-écrou. L'écrou donnera la précontrainte aux ressorts jusqu'à ouvrir la main, en déplaçant l'écrou les ressorts vont commencer à se raccourcir en tirant les câbles, une fois les différents doigts arrivés en fin de course les ressorts resteront en tension en fournissant la force nécessaire à garder la main fermée et l'objet en place.



**Figure 17 Schéma de fonctionnement du système tire-câbles par ressorts**

Ce système a l'avantage de donner une caractéristique adaptative à la préhension des objets, c-à-d que les doigts s'adaptent à la forme de l'objet présent dans la main. De plus, en cas de besoin on peut sortir l'objet de la main en contrecarrant la force de fermeture des doigts jusqu'à l'élongation maximale des ressorts, étant l'allongement des ressorts possible sans besoin de déplacer l'écrou.

Pour ouvrir la main on doit déplacer l'écrou en donnant ainsi à nouveau la précontrainte aux ressorts pour les futures fermetures ; les doigts se rouvrent grâce à des petits ressorts de torsion placés dans les différents axes présents entre les phalanges des doigts, ces ressorts doivent être assez puissants pour pouvoir vaincre les différentes forces de frottement des câbles. Ne connaissant pas à priori les grandeurs des forces de frottement des câbles, on ne peut pas prévoir la force nécessaire au ressort de torsion pour vaincre ces frottements et rouvrir la main. Pour cette raison les ressorts seront choisis lors du montage.



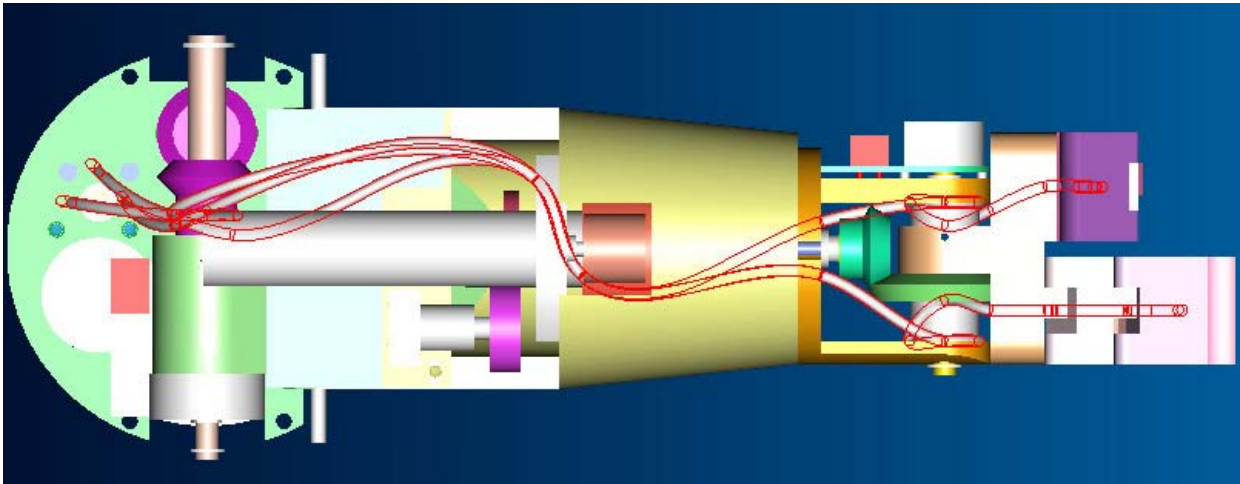
**Figure 18 Système tire-câbles**

Pour toutes ces solutions la motorisation ne peut pas être intégrée près du poignet, l'espace dans le poignet étant déjà prit par les deux autres DDL.

A cause de ça on est obligé de trouver un autre emplacement pour la motorisation. Dans la partie supérieure du bras il y aurait suffisamment d'espace pour le système. On placera donc le système tire-câbles à côté des moteurs qui entraînent le coude et la rotation humérale. On diminuera ainsi aussi l'influence de son poids, étant plus près aux moteurs du haut du bras.

Pour pouvoir tendre les câbles et les garder indépendants des mouvements du coude et des deux DDL du poignet, on va profiter du même système qui existe dans les freins des bicyclettes.

On guide les câbles à l'intérieur de trois gaines flexibles (sous forme de ressort) du système tire-câbles jusqu'aux doigts. On doit choisir la route plus efficace où faire passer les câbles en tenant compte des différents mouvements du bras, dans le but de minimiser les pliages des gaines et leur changement de longueur.



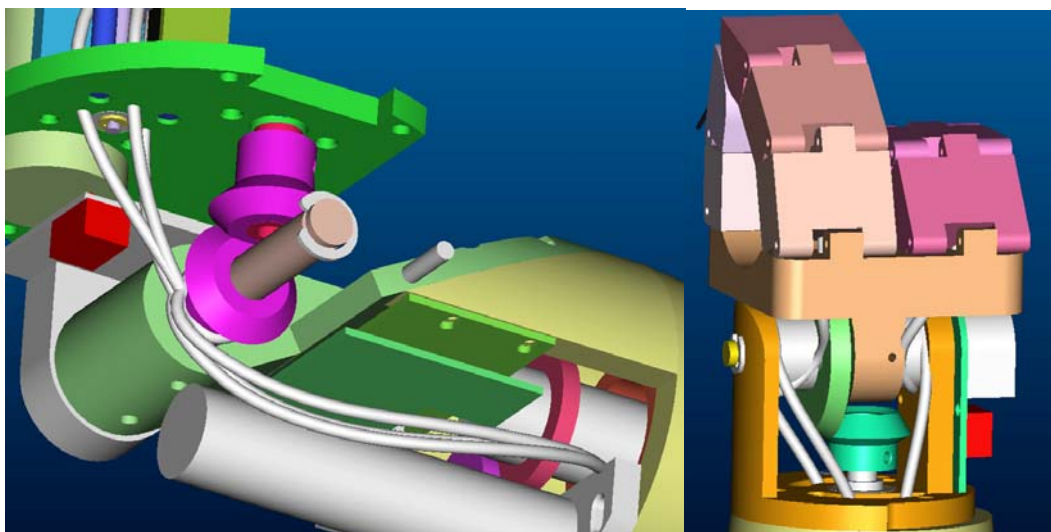
**Figure 19** Route où passent les câbles et leurs gaines

Pour fixer la gaine tire-câble (ressort avec fil de  $\varnothing 0.25\text{mm}$ ) on a d'un côté un filetage M1.4 où on « visse » la gaine sur une profondeur de 3mm ; le pas du M1.4 est de 0.25mm, donc on a 12 spires vissées dans le filetage.

De l'autre côté on enfle la gaine dans un trou de 1.4 mm de diamètre avec serrage pour une profondeur de 5mm.

Les câbles (en acier  $\varnothing 0.36$ ) seront soudés aux petits cubes où sont fixés les ressorts, c'est la solution qui nécessite moins d'espace et on a testé que la soudure tient sur une pièce en laiton.

On a soudé le fil sur un petit cylindre en laiton, puis on a essayé la tenue en traction de la soudure, le fil a cassé et la soudure a tenu. Le câble en acier supporte jusqu'à 103N de force de traction.



**Figure 20** Route où passent les câbles et points de fixations

Par rapport à la main conçue dans le projet précédent [6] qui avait un unique gros doigt et pouvait prendre un nombre de pièces limitées, la main avec trois doigts pourra s'adapter à la forme des pièces qu'on veut prendre, et donc saisir des pièces plus complexes. La forme de la main à trois doigts a été conçue pour avoir un aspect le plus humain possible.

### 3.2.4 Capteurs de position

Pour les différents degrés de libertés on nécessite d'une mesure de position absolue, pour permettre une mesure de déplacement lors des mouvements passifs.

Les deux rotations du poignet nécessitent des capteurs angulaires.

Des capteurs optiques requièrent trop d'espace donc ne sont pas adaptés à notre cas.

Des capteurs à effet Hall sont intéressants comme solution du fait de leurs petite taille et faible prix; avec aimant cylindrique la plage de mesure serait de  $180^\circ$ .

Les potentiomètres sont des capteurs absolus (plage  $270^\circ$ ). Ils ne coûtent pas chère et sont de dimensions raisonnables.

Pour le 2<sup>ème</sup> DDL le choix est tombé sur un potentiomètre placé directement sur l'axe de rotations qui incline le poignet. L'axe de rotation est solidaire à la main et quand on plie le poignet on entraîne le potentiomètre qui détecte ainsi l'inclinaison (Voir Figure 21).

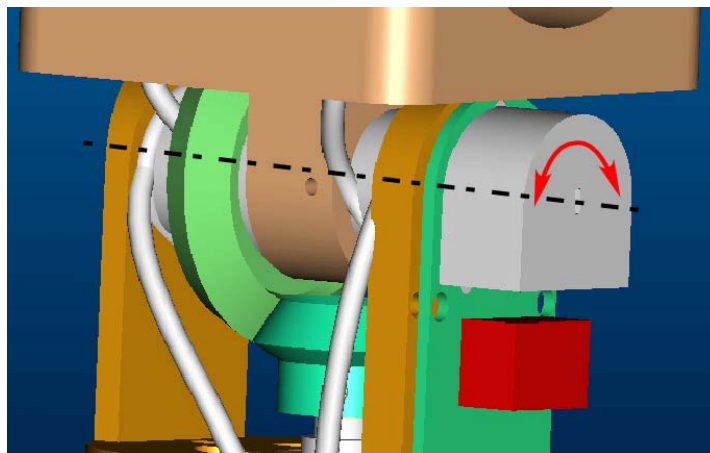


Figure 21 Potentiomètre dans le 2<sup>ème</sup> DDL

Pour le 1<sup>er</sup> DDL trouver une position où mettre un capteur n'a pas été facile. On ne pouvait pas mettre un capteur directement sur l'axe, parce que la place était déjà prise par le moteur du 2<sup>ème</sup> DDL.

Finalement on fixera un potentiomètre directement sur le circuit de commande des moteurs de l'avant-bras décalé par rapport à l'axe de rotation. La rotation sera transmise jusqu'au potentiomètre par des engrenages cylindriques, l'un fixe sur la carcasse du moteur du 2<sup>ème</sup> DDL et l'autre sur le potentiomètre (Voir Figure 22).

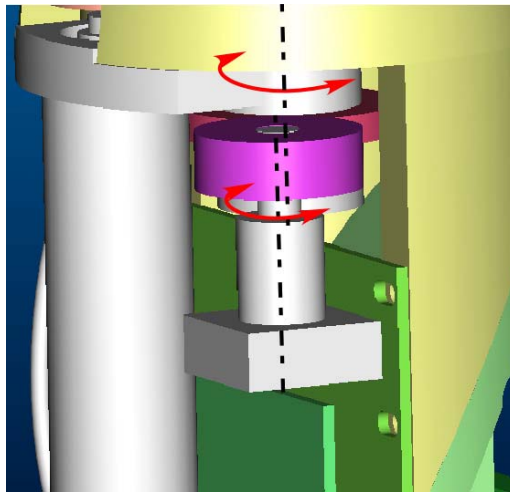


Figure 22 Potentiomètre dans le 1<sup>er</sup> DDL

Pour détecter la prise d'objet dans la main on intègre plusieurs capteurs dans la main et dans le système tire-câbles.

On moule directement des aimants dans la pointe des DOIGT1 et DOIGT2, un capteur à effet Hall dans la pointe du POUCE et dans la paume de la main.

Dans le système tire-câbles, on détecte les deux fins de course par le moyen de deux petits microrupteurs superminiature (Voir Figure 23 à gauche et Annexe VI).

Quand la main est ouverte on reçoit seulement le signal de l'un des microrupteurs dans le système tire-câbles.

Quand on ferme la main on peut détecter quand les DOIGT1 et POUCE ou le DOIGT2 et la paume de la main se touchent.

Lorsque la main est fermée et qu'aucun objet n'a été pris, tous les capteurs donnent un signal.

Si un objet est dans la main, alors le capteur dans la paume ne détecte pas l'aimant, même chose pour le capteur dans le pouce.

Si l'objet est petit, le POUCE détecte l'aimant du DOIGT1, et celui du capteur de la paume ne détecte rien.

Les capteurs Hall commenceront à repérer les aimant depuis une distance d'environ 6 mm, on pourra ainsi détecter si nécessaire la distance entre les DOIGT1 et POUCE ou DOIGT2 et paume vers la fin du mouvement de préhension. La caractérisation du capteur Hall a été faite dans le projet précédent [6].

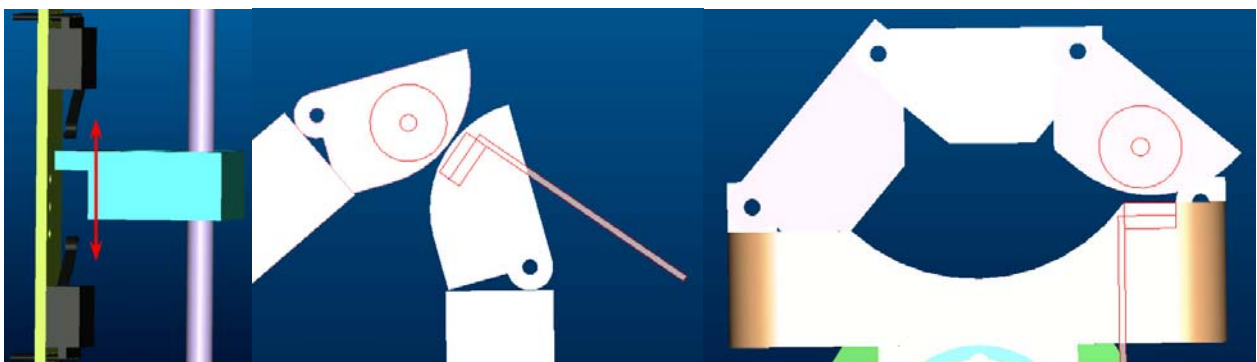


Figure 23 Système de détection de la fin de course par microrupteurs, Capteur Hall et aimants dans les doigts et le poignet

Au début une recherche sur des capteurs de pression tactile a été faite.



Un capteur intéressant avait été trouvé mais son intégration dans le système était trop compliquée à cause du changement de forme des doigts lors de la fermeture de la main, qui nécessitait une flexibilité dans la connexion du capteur, qui finalement était trop rigide. De plus avec ce capteur on aurait pu détecter seulement la force au bout des doigts et pas sur toute la surface du doigt, ce qui réduisait l'utilité d'un tel capteur.

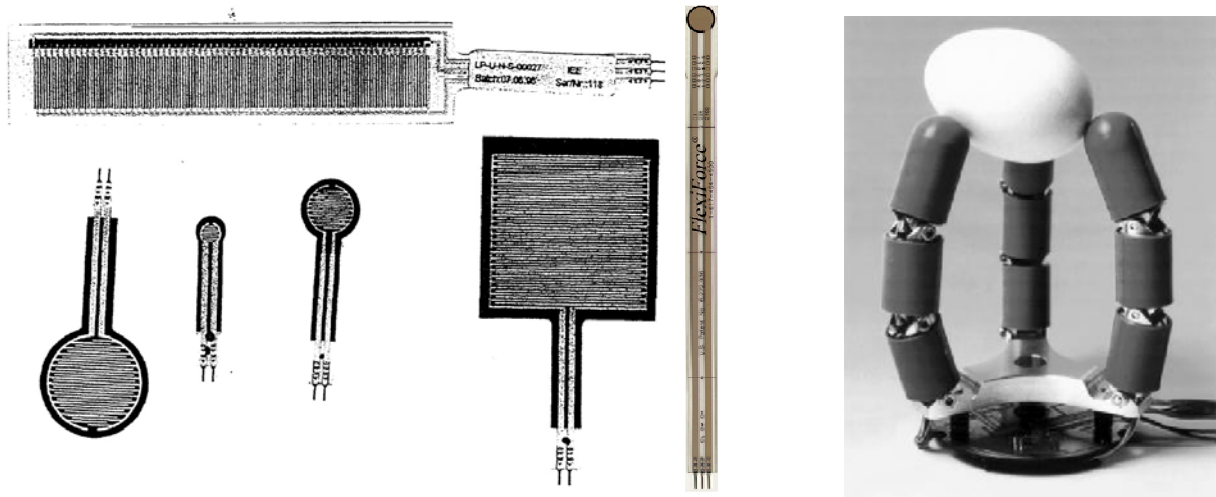


Figure 24 Capteurs de force, DLS tactile sensor prototype

Si les doigts étaient plus grands un système tactile serait plus intéressant, mais dans une petite main comme celle de ce projet c'est plus important de connaître la position de fermeture que la pression de contact dans les doigts.

On a ainsi décidé de prendre plutôt des capteurs Hall.

### 3.2.5 Les plages des différents DDL et leurs blocages

Les plages des 2 premiers DDL dans la conception finale correspondent exactement à celles qu'on a illustrées dans le cahier des charges.

Pour les doigts on a des plisages différents, donnés par la géométrie des différentes phalanges, on le voit bien dans la figure 25.

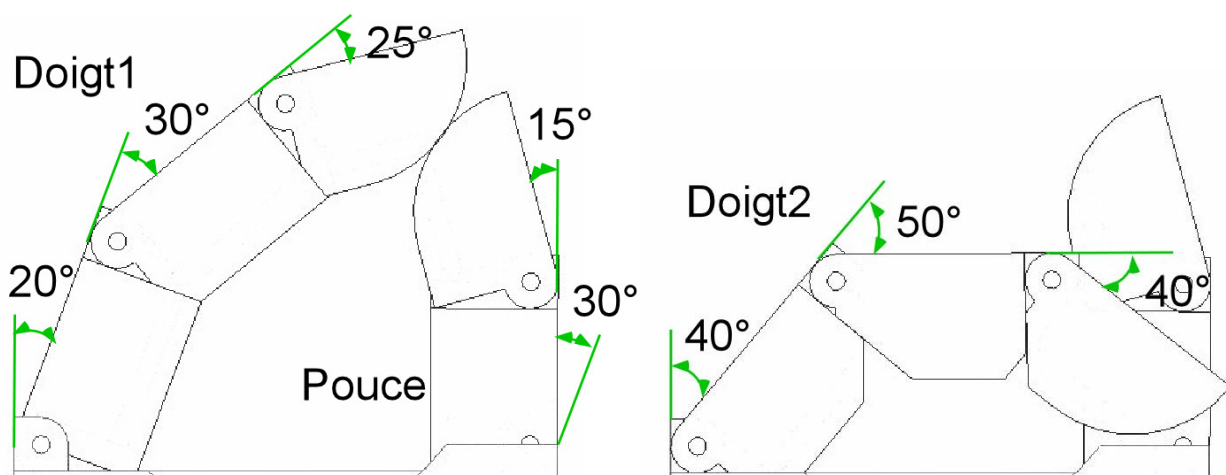


Figure 25 Plages angulaires des phalanges

Par rapport au bras du projet précédent le DDL du coude aura maintenant une plage de  $102^\circ$ , donc  $8^\circ$  en moins. Cette diminution est causée par la nouvelle forme de l'avant-bras. De plus le blocage de ce DDL est maintenant fait par des goupilles, on a donc changé en partie la pièce TUBEDDL du projet précédent pour s'adapter au nouvel avant-bras (Voir Figure 26 à gauche).

Le blocage des DDL du poignet est fait par une goupille pour le 1<sup>er</sup> DDL (Figure 26 en haut à droite) et par le blocage mécanique entre le poignet et le bout de l'avant-bras quand la main est pliée pour le 2<sup>ème</sup> DDL (Figure 26 en bas à droite).

Les doigts se plient jusqu'à leur fin de course naturelle, dictée par la géométrie des phalanges qui donnent une caractéristique de fermeture unique aux différents doigts. Le système tire-câbles détecte sa fin de course grâce aux microrupteurs et peut ainsi arrêter son mouvement quand il reçoit le signal.

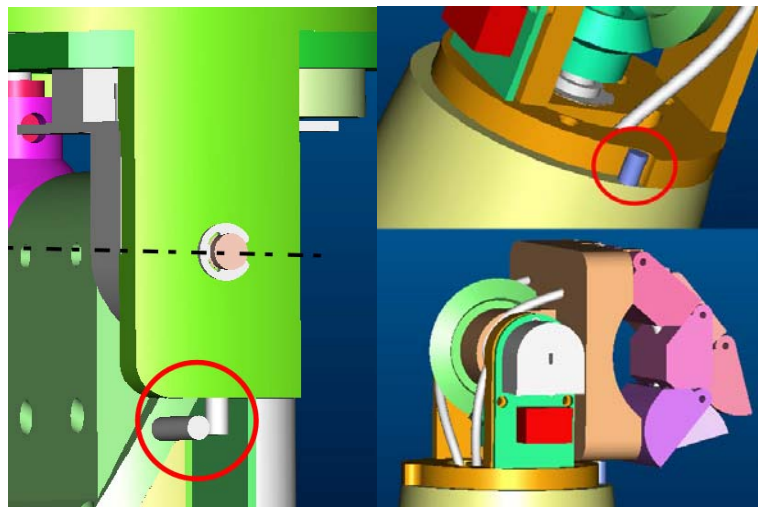


Figure 26 Butées mécaniques dans les différents DDL

### 3.3 Etude sur la peau artificielle

Pour donner un aspect plus humain au bras de Robota, il est nécessaire de trouver une peau artificielle à placer sur toute la mécanique du bras.

Les matériaux les plus adaptés sont les polymères thermoplastiques comme le caoutchouc. Une autre possibilité envisageable serait l'utilisation de tissu de la couleur de la peau.

Le Latex est un matériau très intéressant en raison de ses bonnes propriétés élastiques. D'autres polymères pourraient être utilisés dans le but de revêtir le bras. Ainsi, les silicones ou le polyuréthane (PUR) avec une dureté SHORE A<sup>1</sup> autour de la valeur 20, donc très mou, pourrait être le bon choix.

Ces matériaux peuvent prendre la forme désirée grâce au moulage : on coule ou on injecte le polymère à l'état liquide à l'intérieur d'un moule de la forme désirée. Après durcissement du matériau, on peut sortir la pièce du moule (la peau dans notre cas).

La fabrication d'un moule pour la peau du bras demanderait la création d'une maquette du bras du prototype à mettre à l'intérieur du moule, qui à son tour aurait la forme extérieure du bras. Le polymère serait ensuite coulé entre ces deux pièces en créant ainsi un « gant » avec l'aspect extérieur d'un bras et l'intérieure avec la forme du prototype du bras.

<sup>1</sup> échelle qui donne la dureté du matériau, 100 correspond à la dureté maximale et 0 celle minimale

Une solution beaucoup plus intéressante dérive de la mise en œuvre des pellicules de Latex. On doit fabriquer un bras de forme extérieure désirée dans une matière comme le bois, le plâtre ou encore en céramique. Cette maquette est ensuite trempée dans du Latex liquide. On sort ensuite le bras et on laisse sécher le Latex. On trempe à nouveau le bras pour y déposer la couche suivante de matériau. On suit cette procédure de stratification plusieurs fois jusqu'à l'obtention de l'épaisseur de la peau désirée.

Pour donner la couleur peau au Latex, il suffit de mélanger les bons colorants au Latex liquide (Voir Annexe IX).

Une autre méthode possible serait de fabriquer des portions de peau séparées pour les différentes parties du bras : une par doigt, une pour la main, une pour l'avant-bras, une pour la partie supérieure du bras. Aux articulations, on mettrait du tissu de couleur peau ou de la peau en polymère en forme d'accordéon.

La méthode la plus simple pour fabriquer cette peau, et qu'on a choisit d'utiliser, est la stratification du Latex, qui ne nécessite pas de fabriquer un moule. Cette technique donne un matériau plus résistant par rapport au Latex coulé.

Comme bras à tremper, en alternative à la construction d'une maquette en bois, on peut utiliser le bras d'une poupée avec les bonnes proportions du prototype ou celui d'un mannequin. Pour une maquette du bras en plâtre, l'avantage serait que le plâtre adsorbe en partie le liquide ce qui accélère le durcissement de la peau et donc tout le processus de fabrication.

La peau aura pour tâche outre le fait d'améliorer l'esthétique du bras, d'augmenter le frottement au niveau des doigts, ce qui permettra de tenir plus solidement les objets dans la main.

## 4. Choix, calculs et dimensionnement

### 4.1 Choix des systèmes d'entraînement

#### 4.1.1 1<sup>er</sup> DDL du poignet

A cause de l'espace très restreint l'une des premières contraintes à satisfaire dans le choix du moteur sera sa dimension. Le moteur devra être de diamètre petit et de longueur très courte en gardant des performances suffisantes.

Couple à assurer (Voir page 6)

$$M_1 = 0.1Nm.$$

#### Choix du moteur

Maxon RE10 0.75W (cf. page 52 [4] (Nr. Com. 256091) ou Annexe VIII)

Couple permanent de  $M_{p1} = 0.8mNm$

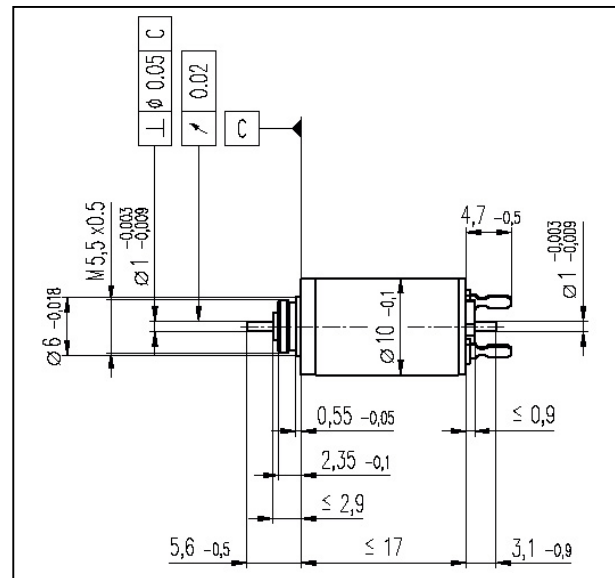


Figure 27 Moteur RE10

#### Choix du réducteur

Réducteur GP10A 256:1 (cf. page 177 [4] (Nr. Com. 218418) ou Annexe VIII)

On prend comme référence le couple intermittent maximal admissible de sortie du réducteur

$$M_{max1} = 0.2Nm$$

Le couple à la sortie du système moteur-réducteur est de

$$M_{out1} = \eta_1 \cdot i_1 \cdot M_{p1} = 0.65 \cdot 256 \cdot 0.8mNm = 0.133Nm \leq 0.2Nm$$

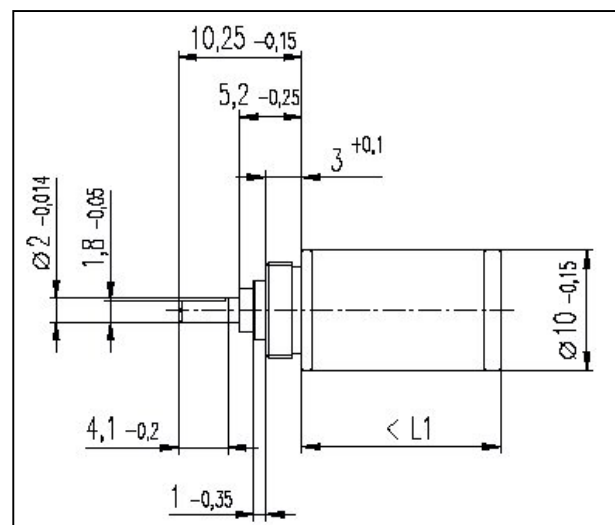


Figure 28 Mot + Réd + Enc (L1=20.4, Ltot=43.1)

Ce couple est donc supporté par le réducteur.



Dimensionnement des engrenages cylindriques du 1<sup>er</sup> DDL

A cause de l'espace restreint disponible dans l'avant-bras, on pose comme dimension des engrenages :

$$\begin{aligned}\text{Diamètre primitif du petit pignon :} & \quad d_1 = 8mm \\ \text{Diamètre primitif de la roue :} & \quad d_2 = 18mm \\ \text{Module :} & \quad m = 0.5mm\end{aligned}$$

On se basant sur ces données on trouve les valeurs suivantes (d'après [1] page 6.88)

$$\text{Nombre de dents du pignon :} \quad z_1 = \frac{d_1}{m} = \frac{8mm}{0.5mm} = 16$$

$$\text{Nombre de dents de la roue :} \quad z_2 = \frac{d_2}{m} = \frac{18mm}{0.5mm} = 36$$

$$\text{Rapport de réduction} \quad i_{engr1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{36}{16} = 2.25$$

$$\text{Entraxe :} \quad a_{th} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{8mm + 18mm}{2} = 13mm$$

$$\text{Pas primitif :} \quad p = m \cdot \pi = 0.5mm \cdot \pi \cong 1.57mm$$

$$\text{Angle de pression :} \quad \alpha = 20^\circ$$

$$\begin{aligned}\text{Diamètre de tête théorique :} \quad d_{a1} &= d_1 + 2 \cdot m = 8mm + 2 \cdot 0.5mm = 9mm \\ d_{a2} &= d_2 + 2 \cdot m = 18mm + 2 \cdot 0.5mm = 19mm\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Diamètre de pied théorique :} \quad d_{f1} &= d_1 - 2.5 \cdot m = 8mm - 2.5 \cdot 0.5mm = 6.75mm \\ d_{f2} &= d_2 - 2.5 \cdot m = 18mm - 2.5 \cdot 0.5mm = 16.75mm\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Saillie} \quad h_{a1} &= m = 0.5mm \\ h_{a2} &= m = 0.5mm\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Creux} \quad h_{fa1} &= 1.25 \cdot m = 0.625mm \\ h_{fa2} &= 1.25 \cdot m = 0.625mm\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Diamètre de base} \quad d_{b1} &= d_1 \cdot \cos \alpha = 8mm \cdot \cos 20^\circ = 7.51mm \\ d_{b2} &= d_2 \cdot \cos \alpha = 18mm \cdot \cos 20^\circ = 16.91mm\end{aligned}$$

Calcul du déport

Quand le nombre de dents des engrenages est petit ( $<17$ ) il y a risque d'interférence sur les dents. Les constructeurs ont donc développé le déport de denture pour résoudre ce problème.

Selon [1] page 6.96 on a

$$z_1 + z_2 = 52 \geq 34 : \text{ système sans variation d'entraxe possible}$$

On a donc les déports suivants sur le pignon et la roue

$$x_1 = \frac{17 - z_1}{17} = \frac{17 - 16}{17} = 0.06 \qquad x_2 = -x_1 = -0.06$$

On a donc un déport positif pour le pignon et un déport négatif sur la roue de même valeur.

Pour le bon fonctionnement de l'engrenage, il est indispensable d'avoir un certain jeu entre les dents des deux roues, pour ainsi éviter les risques de serrage (page 6.105 [1]).

Pour le module de 0.5, le jeu radial correspond, selon l'ouvrage de référence, à:

$$j_r = 0.08mm$$

le jeu entre les dents est donc

$$j_n = j_r \cdot \sin \alpha = 0.08 \cdot \sin 20^\circ = 0.027mm$$

Pour les engrenages ne nécessitant pas une grande précision et ne tournant pas à des vitesses élevées, on admet un jeu radial d'environ 1.5 fois les valeurs qu'on vient de calculer, on a donc :

$$j_r = 0.08mm \cdot 1.5 = 0.12mm$$

$$j_n = 0.027mm \cdot 1.5 = 0.0405mm$$

Le vide au fond de la dent est de

$$c = 0.25 \cdot m + \frac{j_r}{2} = 0.25 \cdot 0.5mm + \frac{0.12mm}{2} = 0.185mm$$

Vu que l'engrenage a déjà été déporté, le déport supplémentaire donnant le jeu est effectué seulement sur la roue et pas sur le pignon. On obtient, donc :

$$\Delta x_2 = -\frac{j_r}{2 \cdot m} = -\frac{0.12mm}{2 \cdot 0.5mm} = -0.12mm$$

$$\text{nouveau } x_2 = x_2 + \Delta x_2 = -0.06mm - 0.12mm = -0.18mm$$

On peut maintenant calculer le reste des valeurs de page 6.88 de [1]

Diamètre primitif de taillage

$$d_{taille1} = d_1 + 2 \cdot x_1 \cdot m = 8mm + 2 \cdot 0.06mm \cdot 0.5 = 8.06mm$$

$$d_{taille2} = d_2 + 2 \cdot x_2 \cdot m = 18mm + 2 \cdot (-0.18mm) \cdot 0.5 = 17.82mm$$

Diamètre de tête de taillage:

$$d_{a,taille1} = d_{a1} + 2 \cdot x_1 \cdot m = 9mm + 2 \cdot 0.06mm \cdot 0.5 = 9.06mm$$

$$d_{a,taille2} = d_{a2} + 2 \cdot x_2 \cdot m = 19mm + 2 \cdot (-0.18mm) \cdot 0.5 = 18.82mm$$

Diamètre de pied de taillage :

$$d_{f,taille1} = d_{f1} + 2 \cdot x_1 \cdot m = 6.75mm + 2 \cdot 0.06mm \cdot 0.5 = 6.81mm$$

$$d_{f,taille2} = d_{f2} + 2 \cdot x_2 \cdot m = 16.75mm + 2 \cdot (-0.18mm) \cdot 0.5 = 16.57mm$$

Hauteur de dent

$$h_1 = h_{a1} + h_{f1} = 0.5mm + 0.625mm = 1.125mm$$

$$h_2 = h_{a2} + h_{f2} = 0.5mm + 0.625mm = 1.125mm$$

Calculs des tolérances d'après pages 6.106-6.107 de [1]

Comme nous avons un module  $m=0.5mm$ , la qualité sera de 9.

$$d_1 = \left( d_{taille1} - \frac{0.1}{2} \right)^{\pm 0.05} = (8.06 - 0.05)^{\pm 0.05} = 8.01^{\pm 0.05} mm$$

$$d_{a1} = \left( d_{a,taille1} - \frac{0.1}{2} \right)^{\pm 0.05} = (9.06 - 0.05)^{\pm 0.05} = 9.01^{\pm 0.05} mm$$

$$d_{f1} = \left( d_{f,taille1} - \frac{0.1}{2} \right) = (6.81 - 0.05) = 6.76mm$$

$$d_2 = \left( d_{taille2} - \frac{0.1}{2} \right)^{\pm 0.05} = (17.82 - 0.05)^{\pm 0.05} = 17.77^{\pm 0.05} mm$$

$$d_{a2} = \left( d_{a,taille2} - \frac{0.1}{2} \right)^{\pm 0.05} = (18.82 - 0.05)^{\pm 0.05} = 18.77^{\pm 0.05} mm$$

$$d_{f2} = \left( d_{f,taille2} - \frac{0.1}{2} \right) = (16.57 - 0.05) = 16.52mm$$

### Contrainte de flexion pour les dents des engrenages cylindriques

Le couple maximal qui sort du moteur est de 0.133Nm, on trouve une force tangentielle sur la dent du petit pignon de

$$P = \frac{2 \cdot \text{Couple}}{d} = \frac{2 \cdot 0.133Nm}{8 \cdot 10^{-3}m} = 33.25N$$

$d$  : Diamètre primitif du petit pignon

La contrainte de flexion dans la dent est de

$$\sigma = \frac{P \cdot \cos \alpha \cdot 5}{m \cdot b} = \frac{33.25N \cdot 5}{0.5 \cdot 10^{-3}m \cdot 8 \cdot 10^{-3}m} = 41.56MN/m^2$$

$\alpha$  : Angle de pression, pour simplifier on prend  $\cos \alpha = 1$  qui est toujours plus grande que la valeur réelle, donc est une marge de sécurité en plus dans le calcul

$m$  : Module de l'engrenage

$b$  : Longueur de la dent

La contrainte admissible pour des engrenages en Laiton est de 50 MN/m<sup>2</sup> avec un bon facteur de sécurité.

$$\Rightarrow \sigma \leq \sigma_{\max}$$

De plus ce calcul est fait en se basant sur le couple maximal qui sort du moteur, ce couple déplace des objets beaucoup plus lourds que les 200g considérés en début du projet, et ces 200g sont déjà plus grands par rapport à la masse des objets que Robota doit manipuler normalement.

De ce fait le couple que le moteur doit fournir et que les engrenages doivent supporter est beaucoup plus petit.

Donc les dents de ces engrenages supportent les contraintes estimées au début du projet.

### Rendement des engrenages cylindriques

Le rendement des engrenages cylindriques à denture droite est calculé en se référant à la page 6.131 de [1].

$$1 - \eta_{engr1} = \frac{2 \cdot \mu \cdot (\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2})}{\sin 2\alpha} = \frac{2 \cdot 0.2 \cdot (\frac{1}{16} + \frac{1}{36})}{\sin(2 \cdot 20^\circ)} \cong 0.056$$

$$\Rightarrow \eta_{engr1} \cong 94.4\%$$

$\mu :$	Coefficient de frottement, 0.2 pour le Laiton - Laiton
$\alpha :$	Angle de pression
$z :$	Nombre de dents des engrenages

### Couple de sortie finale

En tenant compte de tous les étages de réduction on a donc à la sortie du système le couple final :

- $M_{out1finale} = \eta_{engr1} \cdot i_{engr1} \cdot M_{out1} = 0.944 \cdot 2.25 \cdot 0.133 Nm = 0.282 Nm$

On assure ainsi le couple de 0.1 Nm requis au début.

Avec ce couple on arriverait à déplacer des objets de

$$\frac{0.282 Nm}{0.05m \cdot 10m / s^2} = 0.564 Kg = 564 g$$

à une distance de 5 cm de l'axe de rotation.

### Vitesse de sortie du système

La vitesse du système est limitée par le réducteur. La vitesse maximale conseillée est de 8000tr/min  
La vitesse maximale à la sortie du système en tenant compte de tous les étages de réductions est donc de :

$$\omega_{tot1} = \frac{\omega_1}{i_1 \cdot i_{engr1}} = \frac{8000 tr / min}{256 \cdot 2.25} = 13.89 tr / min = 83.34^\circ / s$$

Cette vitesse est suffisante pour le 1<sup>er</sup> DDL.

### Choix de l'encodeur

Pour un tour du moteur on a  $256 \cdot 2.25 = 576$  tour du 1<sup>er</sup> DDL. Si on prend un encodeur à 16 impulsions on se retrouve avec 9'216 impulsions par tour, ce qui est largement suffisant.

On a  $\frac{9'216 \text{impulsion}}{360^\circ} = 25.6 \text{impulsion} / ^\circ$ .

### Réversibilité du 1<sup>er</sup> DDL

Comme dans le projet précédent [6] on aimerait pouvoir bouger les articulations à la main. Pour que ceci soit possible le système doit être réversible, ce qui veut dire qu'il doit avoir un rendement supérieur à 50%.

Le rendement total du système est de

$$\eta_{tot1DDL} = \eta_1 \cdot \eta_{engr1} = 0.65 \cdot 0.944 = 0.6136 = 61.36\%$$

Donc il est réversible.

### Couple pour bouger le système à la main

Pour bouger cette articulation à la main on doit vaincre le moment cinétique du moteur causé par son inertie et son moment de frottement.

Pour calculer ce couple on a besoin du moment de frottement du moteur, de son inertie, et des rendements, frottements et inerties des différents étages de réduction. On négligera ici les inerties et moments de frottements des étages de réduction.

On tiendra ainsi en compte seulement le moment du frottement du moteur rapporté à la sortie pour avoir un ordre de grandeur du couple requis pour commencer à bouger l'articulation à la main. Après il y aura aussi les inerties qui vont freiner le mouvement.

Le moment de frottement du moteur on le trouve avec les paramètres du moteur donnés par le constructeur.

$$M_R = k_M \cdot I_0 = 5.68 \cdot 10^{-3} \text{ Nm/A} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 4.5 \cdot 10^{-5} \text{ Nm} = 0.045 \text{ mNm}$$

où  $k_M$  est la constante de couple du moteur  
 $I_0$  est le courant à vide

La réduction totale des deux étages de réductions est de

$$i_{tot1} = i_1 \cdot i_{engr1} = 256 \cdot 2.25 = 576$$

Le rendement total est de

$$\eta_{tot1DDL} = 61.36\%$$

On trouve ainsi le moment nécessaire à vaincre le moment de frottement.

$$M_{main1} = \frac{M_R \cdot i_{tot1}}{\eta_{tot1DDL}} = \frac{0.045 \text{ mNm} \cdot 576}{0.6136} = 42.24 \text{ mNm}$$

#### 4.1.2 2<sup>ème</sup> DDL du poignet

Comme pour le 1<sup>er</sup> DDL l'espace très restreint donne l'un des premiers critères pour le choix du moteur. Le moteur devra être de diamètre petit et de longueur très courte en gardant des performances suffisantes.

Couple à assurer (Voir page 7)  $M_2 = 0.048Nm$ .

##### Choix du moteur

Maxon RE10 0.75W (cf. page 52 [4] (Nr. Com. 256091) ou Annexe VIII)

Couple permanent de  $M_{p2} = 0.8mNm$

##### Choix du réducteur

Réducteur GP10A 256:1 (cf. page 177 [4] (Nr. Com. 218418) ou Annexe VIII)

On prend comme référence le couple intermittent maximal admissible de sortie du réducteur

$$M_{\max 2} = 0.2Nm$$

Le couple à la sortie du système moteur-réducteur est de

$$M_{out2} = \eta_2 \cdot i_2 \cdot M_{p2} = 0.65 \cdot 256 \cdot 0.8mNm = 0.133Nm \leq 0.2Nm$$

Ce couple est donc supporté par le réducteur.

##### Choix des engrenages coniques

On n'a pas besoin d'un autre étage de réduction parce que le système moteur-réducteur donne déjà un couple suffisant à satisfaire le couple requis dans le 2<sup>ème</sup> DDL.

Mais à cause de la nécessité de ramener le couple sur un axe à 90 degrés par rapport à la sortie du moteur-réducteur, et à cause de la position choisie pour l'axe de rotation du 2<sup>ème</sup> DDL, le choix d'engrenages coniques avec des dimensions différentes s'impose. On aura donc une augmentation du couple qui pourra supporter ce DDL.

On a donc les deux engrenages coniques avec les caractéristiques principales suivants :

Diamètre primitif :  $d_1 = 10mm$  ,  $d_2 = 20mm$

Module :  $m = 0.5mm$

Nombre de dents:	$z_1 = 20, z_2 = 40$
Rapport de réduction :	$i_{engr2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{40}{20} = 2$
Angle de pression :	$\alpha = 20^\circ$
Longueur de la dent :	$b = 3mm$

Voir pages 182 et 186 [9]

### Contrainte de flexion pour les dents des engrenages coniques

Le couple requis dans ce DDL est de 0.048mNm, on trouve une force tangentielle sur la dent de l'engrenage de :

$$P = \frac{2 \cdot \text{Couple}}{d} = \frac{2 \cdot 0.048Nm}{10 \cdot 10^{-3}m} = 9.6N$$

$d$  : Diamètre primitif de l'engrenage

La contrainte de flexion dans la dent est de

$$\sigma = \frac{P \cdot \cos \alpha \cdot 5}{m \cdot b} = \frac{26.6N \cdot 5}{0.5 \cdot 10^{-3}m \cdot 3 \cdot 10^{-3}m} = 32MN / m^2$$

$\alpha$  : Angle de pression, pour simplifier on prend  $\cos \alpha = 1$  qui est toujours plus grand que la valeur réelle, donc est une marge de sécurité en plus dans le calcul

$m$  : Module de l'engrenage

$b$  : Longueur de la dent

La contrainte admissible pour les engrenages en Laiton est de 50 MN/m<sup>2</sup> avec un bon facteur de sécurité.

$$\Rightarrow \sigma \leq \sigma_{\max}$$

De plus on a encore un bon facteur de sécurité dû au fait que la masse des objets que Robota normalement doit manipuler est moins grande par rapport à celle prise comme référence, et donc le couple que le moteur doit fournir et que les engrenages doivent supporter est plus petit.

Donc les dents de ces engrenages supportent cette contrainte.



Rendement des engrenages coniques

Le rendement des engrenages cylindriques à denture droite est calculé en se référant à la page 6.131 de [1].

$$1 - \eta_{engr2} = \frac{2 \cdot \mu \cdot (\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2})}{\sin 2\alpha} = \frac{2 \cdot 0.2 \cdot (\frac{1}{20} + \frac{1}{40})}{\sin(2 \cdot 20^\circ)} \cong 0.047$$

$$\Rightarrow \eta_{engr2} \cong 95.3\%$$

$\mu$  : Coefficient de frottement, 0.2 pour le Laiton - Laiton  
 $\alpha$  : Angle de pression  
 $z$  : Nombre de dents des engrenages

Couple de sortie finale

En tenant compte de tous les étages de réduction on a donc à la sortie du système le couple final :

$$\bullet \quad M_{out2\,finale} = \eta_{engr2} \cdot i_{engr2} \cdot M_{out2} = 0.953 \cdot 2 \cdot 0.133 Nm = 0.253 Nm$$

On assure ainsi le couple de 0.048 Nm requis.

Vitesse de sortie du système

La vitesse du système est limitée par le réducteur. La vitesse maximale conseillée est de 8000tr/min  
 La vitesse maximale à la sortie du système en tenant compte de tous les étages de réductions est donc de :

$$\omega_{tot2} = \frac{\omega_2}{i_2 \cdot i_{engr2}} = \frac{8000tr/min}{256 \cdot 2} = 15.625tr/min = 93.75^\circ/s$$

Cette vitesse est suffisante pour le 2<sup>ème</sup> DDL.

Choix de l'encodeur

Pour un tour du moteur on a  $256 \cdot 2 = 512$  tour du 2<sup>ème</sup> DDL. Si on prend un encodeur à 16 impulsions on se retrouve avec 8'192 impulsions par tour, ce qui est largement suffisant.

On a  $\frac{8192impulsion}{360^\circ} = 22.75impulsion/^\circ$ .

### Réversibilité du 2<sup>ème</sup> DDL

Comme dans le projet précédent [6] on aimerait pouvoir bouger les articulations à la main. Pour que ceci soit possible le système doit être réversible, ce qui veut dire qu'il doit avoir un rendement supérieur à 50%.

Le rendement total du système est de

$$\eta_{tot2DDL} = \eta_2 \cdot \eta_{engr2} = 0.65 \cdot 0.953 = 0.612 = 61.2\%$$

Donc il est réversible.

### Couple pour bouger le système à la main

Comme pour le premier DDL le moment de frottement du moteur on le trouve avec les paramètres du moteur donnés par le constructeur :

$$M_R = k_M \cdot I_0 = 5.68 \cdot 10^{-3} Nm / A \cdot 8 \cdot 10^{-3} A = 4.5 \cdot 10^{-5} Nm = 0.045mNm$$

où  $k_M$  est la constante de couple du moteur  
 $I_0$  est le courant à vide

La réduction totale des deux étages de réductions est de

$$i_{tot2} = i_2 \cdot i_{engr2} = 256 \cdot 2 = 512$$

Le rendement total est de

$$\eta_{tot2DDL} = 61.2\%$$

On trouve ainsi le moment nécessaire à vaincre le moment de frottement du moteur.

$$M_{main2} = \frac{M_R \cdot i_{tot2}}{\eta_{tot2DDL}} = \frac{0.045mNm \cdot 512}{0.62} = 37.16mNm$$

### 4.1.3 Ouverture et fermeture de la main

#### Système tire-câbles

Les doigts de la main sont tous différents. Les phalanges ont été conçues de sorte que les doigts aient des comportements différents lors de la fermeture de la main.

Ce qui reste similaire sont les proportions. Les phalanges principales sont toutes de longueur 15 mm, les phalanges de la pointe des doigts de 12-13 mm.

Les câbles, qui passent à l'intérieur des doigts comme des tendons, permettent le pliage ou la contraction des doigts. Quand ils sont tirés avec une force de 4 N, ils créent une force de fermeture de presque 2 N par doigts.

Moment créé par la traction du fil avec une force de 4N

$$M_{fil} = (5.5 - 1.5)mm * 4N = 16mNm$$

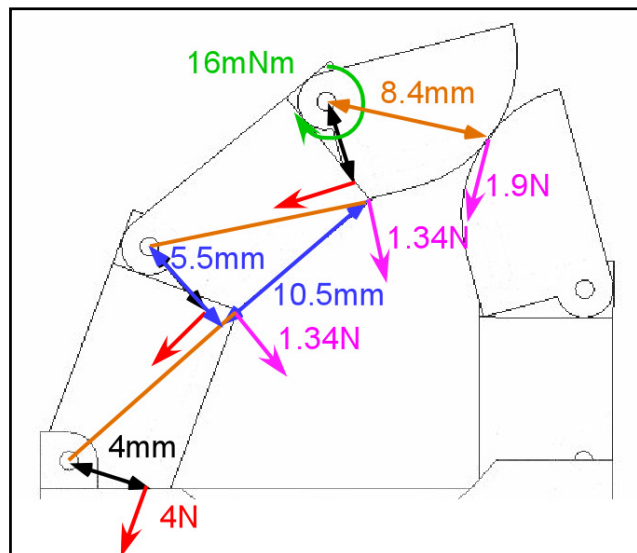


Figure 29 Forces de fermeture dans les phalanges

Forces tangentielles au bout des phalanges :

Phalange 1 et 2

$$F_{p1} = \frac{M_{fil}}{\sqrt{5.5^2 + (15 - 1.5 - 3)^2}} = \frac{16mNm}{11.85mm} = 1.34N$$

Phalange 3

$$F_{p2} = \frac{M_{fil}}{8.4mm} = \frac{16mNm}{8.4mm} = 1.9N$$

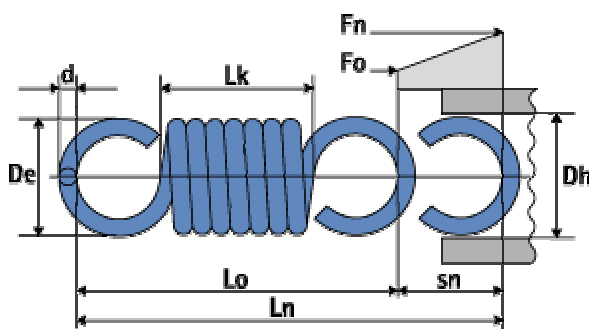
Comme précédemment mentionné pour ouvrir la main quand on relâche le câble, on a prévu l'espace pour des ressorts de torsion.

À cause des différents frottements présents entre les phalanges et entre fil et phalanges, c'est difficile de prévoir les efforts précis nécessaires aux ressorts de torsion pour ouvrir la main. Donc lors du montage on devra essayer différents types de ressort pour trouver les meilleures dimensions de diamètre et nombre de spires.

Comme on a déjà dit, on est obligé de tirer ces câbles avec une seule motorisation. Donc, si on doit tirer 3 câbles avec une force de 4N par câble, on doit tirer au total 12 N.

Finalement en ayant choisi de tirer les câbles au moyen de ressorts, on doit assurer que la force donnée par un ressort soit de 4 N quand le doigt est complètement plié.

En connaissant la course nécessaire aux différents câbles pour plier les doigts, et en choisissant ainsi les ressorts les plus adaptés par doigt, on peut retrouver la force qu'on a quand un doigt n'est pas plié, ce qui donne ainsi la force maximale que le moteur aura à donner pour précontraindre les ressorts et ouvrir la main.



$d$  = diamètre du fil, en mm

$De$  = diamètre extérieur, en mm

$Dh$  = diamètre minimal de l'alésage, en mm

$Lo$  = longueur libre, en mm

$Lk$  = longueur du corps, en mm

$R$  = raideur en N/mm

$Ln$  = longueur maximale sous charge  $F_n$

$sn$  = flèche sous charge  $F_n$ , en mm

$F_o$  = tension initiale, en Newton

$F_n$  = charge maximale à  $Ln$ , en Newton

Doigt	$d$	$De$	$Dh$	$Lo$	$Lk$	$R$	$Ln$	$sn$	$F_o$	$F_n$	no. art.	Prix
<b>Pouce</b>	0.40	3.00	3.75	12.00	8.40	0.637	22.90	10.90	0.600	7.543	04/7/2	7.00
<b>Doigt 1</b>	0.50	3.50	4.40	15.20	10.00	1.066	25.51	10.31	0.980	11.970	05/7/1	6.00
<b>Doigt 2</b>	0.56	3.92	4.91	17.00	11.20	1.390	29.18	12.18	1.380	18.310	06/1/1	5.00

Table 1 Choix des ressorts pour les différents doigts

Les doigts commencent à se plier tous en même temps. Le pouce qui a la course la plus courte s'arrêtera en premier, suivi du Doigt1 et en dernier du Doigt 2.

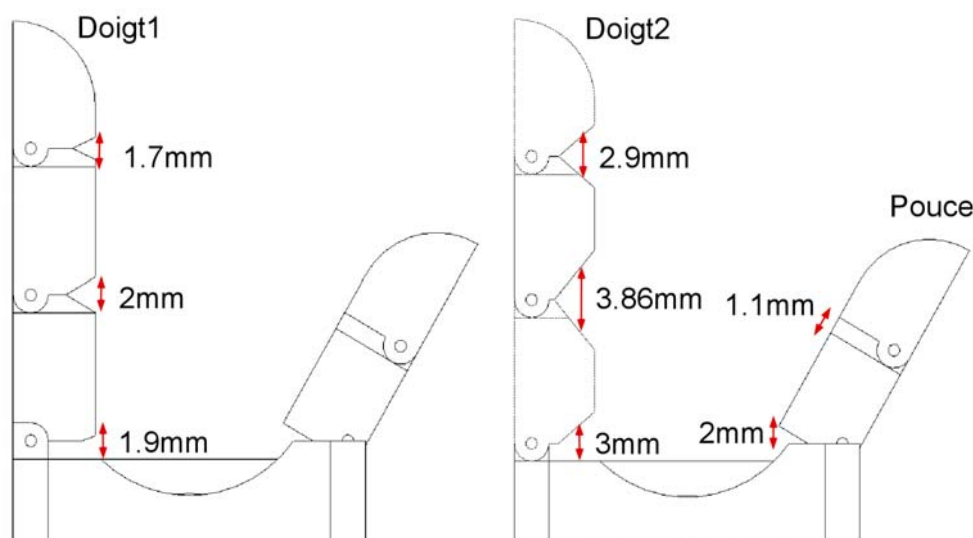


Figure 30 Course des câbles dans les différents doigts

Les courses  $sn_{final}$  sont de :

Pouce	$1.1mm + 2mm = 3.1mm$
Doigt1	$1.7mm + 2mm + 1.9mm = 5.6mm$
Doigt2	$2.9mm + 3.86mm + 3mm = 9.76mm$

La construction du tire-câbles permet un allongement maximal sous charge  $Ln_{max}$  pour les 3 ressorts de, respectivement :

Pouce	$21.9mm$
Doigt1	$24.5mm$
Doigt2	$28.45mm$

On trouve ainsi la flèche maximale  $sn_{max} = Ln_{max} - L_0$

Pouce	$21.9 - 12 = 9.9mm$
Doigt1	$24.5 - 15.2 = 9.3mm$
Doigt2	$28.45 - 17 = 11.45mm$

La Force maximale qu'on devra donner par ressort est  $Fn_{max} = F_0 + R \cdot sn_{max}$

Pouce	$0.6N + 0.637N / mm \cdot 9.9mm = 6.9N$
Doigt1	$0.98N + 1.066N / mm \cdot 9.3mm = 10.89N$
Doigt2	$1.38N + 1.39N / mm \cdot 11.45mm = 17.29N$

La Force à doigt plié sera de  $Fn_{plié} = F_0 + R \cdot (sn_{max} - sn_{final})$  :

Pouce	$0.6N + 0.637N / mm \cdot (9.9mm - 3.1mm) = 4.93N$
Doigt1	$0.98N + 1.066N / mm \cdot (9.3mm - 5.6mm) = 4.92N$
Doigt2	$1.38N + 1.39N / mm \cdot (11.45mm - 9.76mm) = 3.72N$

Clairement la force à doigt plié est seulement la force en fin de course. Pendant le pliage, la force varie entre la valeur maximale et celle de fin de course en suivant la loi du ressort.

Ce qui signifie qu'un objet dans la main sera tenu plus solidement s'il est grand.

### Couple requis dans la vis du système tire-câbles

Finalement on connaît la force maximale de traction qu'on devra atteindre avec la vis.

On fait une vis sans fin en acier avec filetage M2 et la pièce TIRE\_RESSORT en laiton (écrou), on se référant à [1] page 3.40 on trouve les couples nécessaires de serrage et desserrage de la vis sans fin.

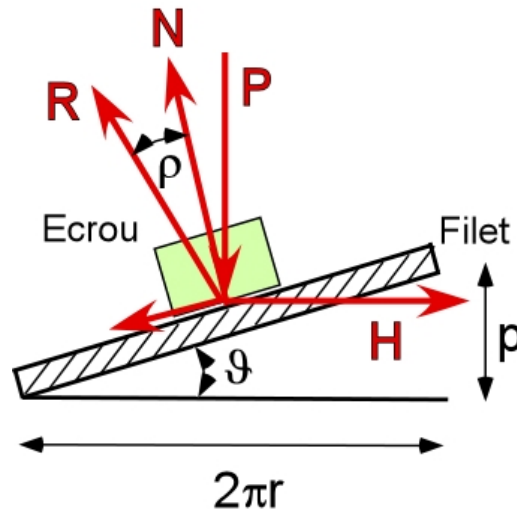


Figure 31 Filet de vis déroulé (Ecrou qui glisse sur le filetage)

$$M_{\text{serrage}} = r.H = r \cdot P \cdot \tan(\theta + \rho)$$

$$M_{\text{deserrage}} = r.H = r \cdot P \cdot \tan(\theta - \rho)$$

$r$  : Rayon de la vis. Pour une vis M2, il est de  $1.74\text{mm} / 2 = 0.87\text{mm}$

$H$  : Force tangentielle à la vis dans un plan perpendiculaire à son axe

$P$  : Force de serrage dans l'axe de la vis (force de traction maximale du système tire-câbles)

$\theta$  : Angle du filetage de la vis, dépend du pas de la vis et de son diamètre

$\rho$  : Angle de frottement, dépend des matériaux en contact.

Le pas d'une vis M2 avec filetage à pas normal (DIN 13-1) est de 0.4mm.

On trouve l'angle du filetage suivant :

$$\theta = \arctan\left(\frac{\text{pas}}{2\pi r}\right) = \arctan\left(\frac{0.4\text{mm}}{2\pi \cdot 0.87\text{mm}}\right) = 4^\circ.18$$

Pour acier-laiton on a le coefficient de frottement  $\mu = 0.18$  (frottement sec),  $\mu = 0.08$  (graissé).

L'angle de frottement est  $\rho = \arctan(\mu)$ , donc :

$$\rho = 10^\circ.2 \text{ (frottement sec)}$$

$$\rho = 4^\circ.57 \text{ (graissé).}$$

La force de traction maximale du système est

$$P = 6.9N + 10.89N + 17.29N = 35.08N$$

Pour avoir une marge de sécurité en plus on pose une force de traction de 40N.

Ainsi on trouve finalement :

$$M_{serrage} = 0.87 \cdot 10^{-3} m \cdot 40N \cdot \tan(4^{\circ}.18 + 10^{\circ}.2) = 8.92 \cdot 10^{-3} Nm = 8.92mNm$$

$$M_{deserrage} = 0.87 \cdot 10^{-3} m \cdot 40N \cdot \tan(4^{\circ}.18 - 10^{\circ}.2) = -3.67 \cdot 10^{-3} Nm = -3.67mNm$$

Le couple requis dans la vis est donc égal ou supérieur à environ 0.01Nm.

### Tenue du filetage en cisaillement

Le pas d'une vis M2 avec filetage à pas normal (DIN 13-1) est de 0.4mm.

La longueur du taraudage dans la pièce TIRE\_CABLES est de 5mm.

Le filet fait donc  $\frac{5mm}{0.4mm} = 12.5$  tours

La longueur du filet est donc de

$$12.5 \cdot 2\pi \cdot r = 12.5 \cdot 2\pi \cdot 0.87mm \cong 68mm$$

La contrainte de cisaillement est calculée à l'aide de [2].

La force  $T$  due à la traction maximale des câbles, est de 40N.

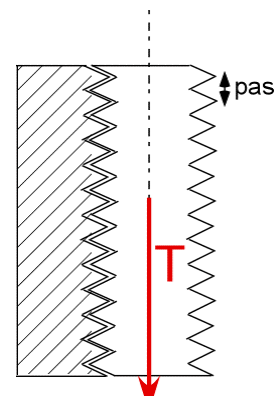
$$T = 40N$$

$$\tau = \frac{T}{S} = \frac{40N}{68 \cdot 10^{-3} m \cdot 0.4 \cdot 10^{-3}} = 1470588N/m^2 = 1.4MPa$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{1.4MN/m^2}{42.6 \cdot 10^9 Pa} = 3.28 \cdot 10^{-5} rad$$

$$\text{où } G = \frac{E}{2(1 + \mu)} = \frac{124 \cdot 10^9 Pa}{2(1 + 0.34)} = 46.2 \cdot 10^9 Pa$$

avec	$\tau$	contrainte de cisaillement
	$T$	effort Tranchant
	$S$	surface (section)
	$\gamma$	angle de glissement
	$G$	module de glissement
	$E$	module d'élasticité ( $E = 124GPa$ )



**Figure 32**  
Contrainte de cisaillement sur la vis

$\mu$  coefficient de poisson ( $\mu = 0,34$ )  
(valeurs pour le laiton)

Pour le laiton :  $\sigma_{\max traction} = 440 - 510 MPa$   
 $\tau_{\max} = 20\% \sigma_{\max traction} = 88 MPa$

Et on a :

$$\tau = \frac{4}{3} \frac{force}{surface} = \frac{4}{3} \cdot 1.4 MPa = 1.86 MPa < 88 MPa \Rightarrow \mathbf{OK!}$$

### Tenue de la vis en traction

La section résistante de la vis est calculée suivant DIN 13-28 (Voir [8] page 112), selon la formule

$$A_s = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2. \text{ La charge de rupture de la vis est égale à celle d'une tige lisse de diamètre } \frac{d_2 + d_3}{2}.$$

Pour une vis M2 avec pas normal on a

$$d_2 = 1.74 mm \text{ et } d_3 = 1.509 mm$$

$$\text{Donc } A_s = \frac{\pi}{4} \left( \frac{1.74 mm + 1.509}{2} \right)^2 = 2.07 mm^2$$

La force de traction sur la vis est de 40N. On trouve ainsi la contrainte de traction sur la vis.

$$\sigma = \frac{F}{A_s} = \frac{40 N}{2.07 \cdot 10^{-6} m^2} = 19323671 N / m^2 = 19 MPa$$

Pour une vis de qualité 5.8 (Voir [7] page 124) on a :

Charge de rupture à la traction  $R_m = 500 N / mm^2 = 500 MPa$

Et la Limite apparente d'élasticité  $R_{eL} = 400 N / mm^2 = 400 MPa$

$$\sigma = 19 MPa \leq 400 MPa \Rightarrow OK!$$

La contrainte de traction est beaucoup plus petite par rapport à la limite élastique, donc la vis tient.



### Tenue du Segment d'arrêt sur l'axe tire-câbles

La contrainte de cisaillement sera calculée à l'aide de [2].

La section résistante du segment d'arrêt est de moitié sa circonférence fois sa hauteur.

La force est celle due à la traction maximale des câbles, donc de 40N.

$$T = 40N$$

$$\tau = \frac{T}{S} = \frac{40N}{\frac{\pi \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} m}{2} \cdot 0.3 \cdot 10^{-3}} = 56588424 N/m^2 = 56.6 MPa$$

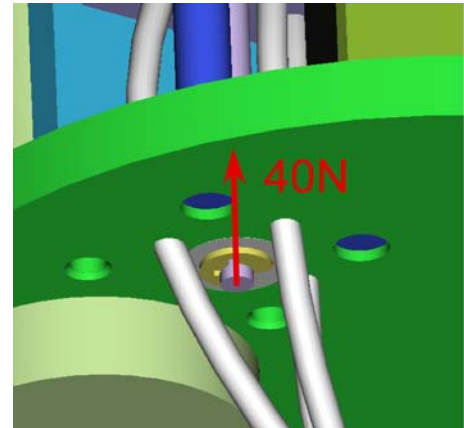


Figure 33 Contrainte sur le Segment d'arrêt

avec  $\tau$  contrainte de cisaillement  
 $T$  effort Tranchant  
 $S$  surface (section)

Pour l'acier à ressort 460 ...580 HV30 (Voir [8] page 138 et 165) :

$$\sigma_{\max traction} = 1500 MPa$$

$$\tau_{\max} = 20\% \sigma_{\max traction} = 300 MPa$$

Et on a :

$$\tau = \frac{4}{3} \frac{force}{surface} = \frac{4}{3} \cdot 56.6 MPa = 75.4 MPa < 300 MPa \Rightarrow \text{OK!}$$

### Rendement de la vis

Le rendement de la vis dépend des angles de frottement et du plan incliné. On le trouve grâce à [1] page 3.30 :

$$\eta_{vis} = \frac{\tan \theta}{\tan(\theta + \rho)} = \frac{\tan 4^{\circ}.18}{\tan(4^{\circ}.18 + 10^{\circ}.2)} \cong 28.5\%$$

### Choix du moteur

Comme mentionné précédemment, dans l'avant-bras on n'a pas l'espace pour loger le système tire-câbles, et donc on doit le ramener dans le bras à côté des moteurs qui entraînent le coude et la rotation humérale.

Les dimensions sont donc limitées par l'espace restant dans le bras en tenant aussi compte de l'espace requis par les circuits de contrôle.

Le choix final est tombé sur :

Faulhaber 1516 009SR (cf. page 44 [5] ou Annexe VIII)

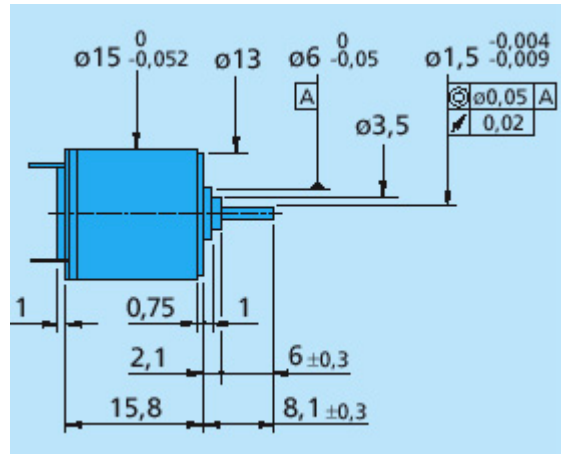


Figure 34 Moteur 1516 SR

Couple permanent de  $M_{p3} = 0.8mNm$

### Choix du réducteur

Réducteur planétaire 15A 28:1 (cf. page 102 [5] ou Annexe VIII)

On prend comme référence le couple intermittent maximal admissible de sortie du réducteur

$$M_{\max 3} = 0.2Nm$$

Le couple à la sortie du système moteur-réducteur est de

$$M_{out3} = \eta_3 \cdot i_3 \cdot M_{p3} = 0.77 \cdot 28 \cdot 0.8mNm = 17mNm \leq 0.2Nm$$

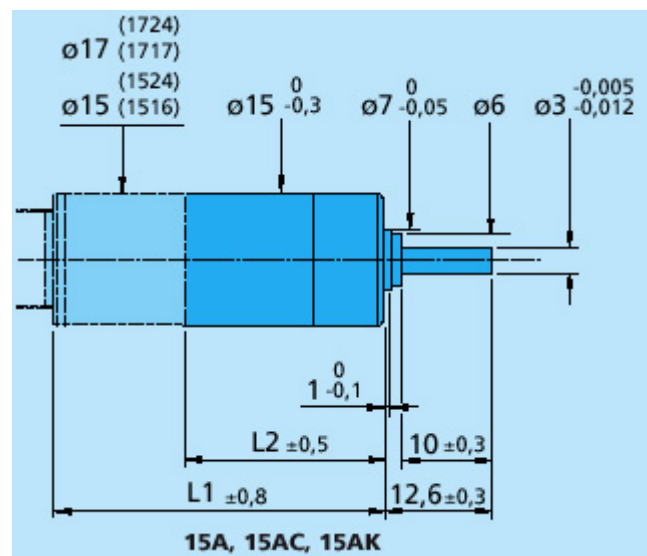


Figure 35 Mot + Réd (L1 = 33.5, L2 = 18.4)

Ce couple est donc supporté par le réducteur.

### Choix des engrenages cylindriques

Comme pour le choix du moteur l'espace pour des engrenages est limité, on ne peut pas les prendre de diamètre trop grand.

On a donc pris les deux engrenages cylindriques avec les caractéristiques principales suivantes :

Diamètre primitif :

$$d_1 = 10mm, d_2 = 14mm$$

Module :	$m = 0.5mm$
Nombre de dents:	$z_1 = 20, z_2 = 28$
Rapport de réduction :	$i_{engr3} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{28}{20} = 1.4$
Angle de pression :	$\alpha = 20^\circ$
Longueur de la dent :	$b = 4mm$

Voir page 116 [9]

### Contrainte de flexion dans les dents des engrenages cylindriques du système tire-câbles

Le couple maximal donné par le moteur-réducteur est de 17mNm, on trouve une force tangentielle sur la dent de

$$P = \frac{2 \cdot \text{Couple}}{d} = \frac{2 \cdot 0.017 N.m}{10 \cdot 10^{-3} m} = 3.4 N$$

$d$  : Diamètre primitif du pignon

La contrainte de flexion dans la dent est de

$$\sigma = \frac{P \cdot \cos \alpha \cdot 5}{m \cdot b} = \frac{3.4 N \cdot 5}{0.5 \cdot 10^{-3} m \cdot 4 \cdot 10^{-3} m} = 8.5 MN / m^2$$

$$\Rightarrow \sigma \leq \sigma_{\max}$$

$\alpha$  : Angle de pression, pour simplifier on prend  $\cos \alpha = 1$  qui est toujours plus grand que la valeur réelle, donc est une marge de sécurité en plus dans le calcul

$m$  : Module de l'engrenage

$b$  : Longueur de la dent

La limite de flexion pour le POM est de 10 MN/m<sup>2</sup> avec un bon facteur de sécurité.  
Les dents de ces engrenages en POM tiennent.

### Rendement des engrenages cylindriques

Le rendement des engrenages cylindriques à denture droite est calculée on se référant à la page 6.131 de [1].

$$1 - \eta_{engr3} = \frac{2 \cdot \mu \cdot (\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2})}{\sin 2\alpha} = \frac{2 \cdot 0.4 \cdot (\frac{1}{20} + \frac{1}{28})}{\sin(2 \cdot 20^\circ)} \cong 0.107$$

$$\Rightarrow \eta_{engr3} \cong 89.3\%$$

$\mu$  : Coefficient de frottement, 0.4 pour le POM-POM

$\alpha$  : Angle de pression

$z$  : Nombre de dents des engrenages

### Couple de sortie finale sur la vis

Le couple final sur la vis est de:

- $M_{out3\,finale} = \eta_{engr3} \cdot i_{engr3} \cdot M_{out3} = 0.893 \cdot 1.4 \cdot 17mNm = 21mNm = 0.021Nm$

On assure ainsi le couple de 0.01 Nm nécessaire à la vis pour tirer les câbles.

### Vitesse du système

La vitesse est limitée par la vitesse maximale admissible du réducteur de 5000 tr/min.

La vitesse de rotation de la vis après les étages de réduction du réducteur et des engrenages est de

$$\omega_{vis} = \frac{\omega_3}{i_3 \cdot i_{engr3}} = \frac{5000tr/min}{28 \cdot 1.4} = 127.55tr/min = 765.3^\circ/s$$

La vitesse linéaire correspond à un déplacement équivalent au pas de la vis par tour.

On a donc une vitesse linéaire maximale de

$$v_3 = \omega_3 \cdot p = 127.55tr/min \cdot 0.4mm = 51.02mm/min = 0.83mm/s$$

La course nécessaire à la fermeture complète de la main est de 9.76mm.

Le temps pour fermer la main est de :

$$t = \frac{sn_{finalDoit2}}{v_3} = \frac{9.76mm}{0.83mm/s} = 11.76s$$

**Remarque :** La vitesse de fermeture est assez lente, c'est pour ça qu'on a mit en annexe le dimensionnement d'une autre vis avec un pas plus grande qui va permettre une fermeture plus

rapide. C'est une vis plus compliquée à faire parce que pas normalisée. Il faut, en effet, créer les outils d'usinage expressément pour l'usinage de cette vis.

### Choix de l'encodeur

Pour un tour du moteur on a  $28 \cdot 1.4 = 39$  tour de la vis. Si on prend un encodeur à 64 impulsions on se retrouve avec 2'496 impulsions par tour, ce qui est largement suffisant.

On a  $\frac{2'496 \text{impulsion}}{0.4 \text{mm}} = 6'240 \text{impulsion/mm}$ .

### Irréversibilité du système tire-câbles

Si le rendement total du système est inférieur à 50% le système est irréversible.

Le rendement de la vis est déjà inférieur à cette valeur. Donc, le système est irréversible. L'élongation des ressorts pourra être ainsi gardée constant sans besoin d'alimenter le moteur en continu.

Le rendement total du système est plus précisément de

$$\eta_{\text{tot3DDL}} = \eta_3 \cdot \eta_{\text{engr3}} \cdot \eta_{\text{vis}} = 0.77 \cdot 0.893 \cdot 0.285 = 0.193 = 19.3\%$$

### Calcul de la longueur des gaines ressort guide-câbles

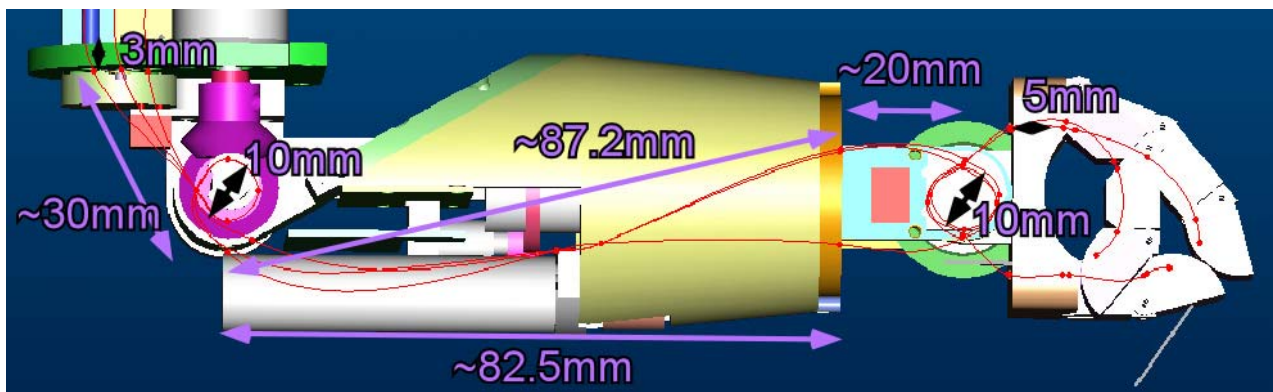


Figure 36 Mesures pour calculer la longueur des gaines ressort

$$L_{\text{max}} = 3\text{mm} + 30\text{mm} + 1.5\text{tour} \cdot (\pi \cdot 10\text{mm}) + 87.2\text{mm} + 20\text{mm} + 1.5\text{tour} \cdot (\pi \cdot 10\text{mm}) + 5\text{mm} = 239.45\text{mm}$$

Pour avoir une bonne marge, on aura besoin d'un ressort long 250mm.

Le fil du ressort est de 0.25mm de diamètre, le diamètre du ressort est de 1.4mm.

La fixation du côté système tire-câbles se fait par vissage dans un trou taraudé M1.4 (pas de 0.25mm) pour une profondeur de 3mm, donc on a 12 spires vissées dans ce filetage.

Du côté main la fixation est faite dans un trou de  $\varnothing 1.4\text{mm}$  de profondeur 5mm avec du serrage.

Le câble qui passe dans la gaine est en acier, son diamètre est de 0.36mm, il peut soutenir jusqu'à 103N de charge (Voir [12] page 17).

#### 4.2 Contraintes sur la pièce BOU\_CYL\_MAIN

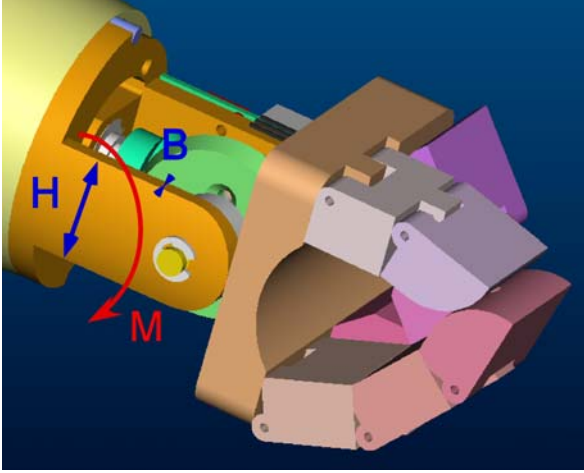


Figure 37 Contrainte sur la pièce BOU\_CYL\_MAIN

Cette pièce est soumise à une contrainte de flexion. On va la calculer à l'aide de [2].  
Nous avons donc :

$$\sigma = \frac{yM}{I} = \frac{6 \cdot 10^{-3} m \cdot 0.048 Nm}{4.32 \cdot 10^{-10} m^4} = 666666.7 \frac{N}{m^2} = 0.67 MPa$$

où  $y = \frac{H}{2} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{2} = 6 \cdot 10^{-3} m$

$$M = 16 \cdot 10^{-3} \cdot 10 m / s^2 \cdot 300 \cdot 10^{-3} Kg = 0.048 Nm \quad \text{exagéré}$$

$$I = \frac{BH^3}{12} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot (12 \cdot 10^{-3})^3}{12} = 4.32 \cdot 10^{-10} m^4$$

avec

I	l'inertie d'une poutre carrée
M	le moment
y	la demi hauteur H/2
B	largeur de la section rectangulaire de la poutre
H	hauteur de la section rectangulaire de la poutre

Les bouts de cette pièce sont deux. Donc, la contrainte est divisée par deux. Nous obtenons donc que la contrainte de flexion est beaucoup plus petite que la contrainte maximale qui est de 10 MPa (POM)  $\Rightarrow$  OK !

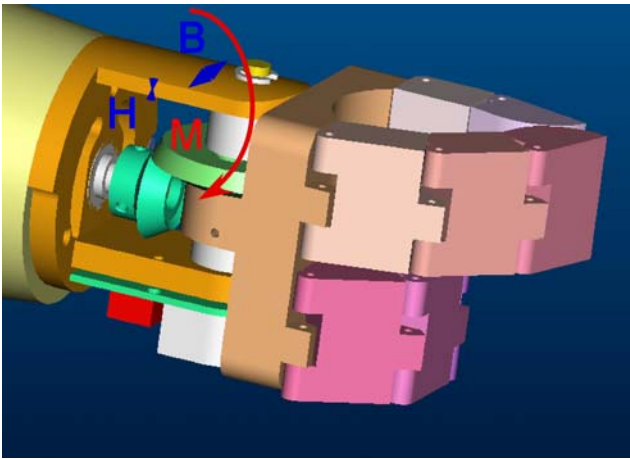


Figure 38 Contrainte dans l'autre position sur la pièce BOU\_CYL\_MAIN

Dans l'autre position on a

$$\sigma = \frac{yM}{I} = \frac{1.5 \cdot 10^{-3} m \cdot 0.048 Nm}{2.7 \cdot 10^{-11} m^4} = 2666666.67 \frac{N}{m^2} = 2.67 MPa$$

où  $y = \frac{H}{2} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} = 1.5 \cdot 10^{-3} m$

$$I = \frac{BH^3}{12} = \frac{12 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 10^{-3})^3}{12} = 2.7 \cdot 10^{-11} m^4$$

avec

I	l'inertie d'une poutre carrée
M	le moment
y	la demi hauteur H/2
B	largeur de la section rectangulaire de la poutre
H	hauteur de la section rectangulaire de la poutre

Les bouts de cette pièce sont deux. Donc, la contrainte est divisée par deux. Nous obtenons donc que la contrainte de flexion est beaucoup plus petite que la contrainte maximale qui est de 10 MPa (POM)  $\Rightarrow$  OK !

### 4.3 Contraintes sur la pièce POIGNET

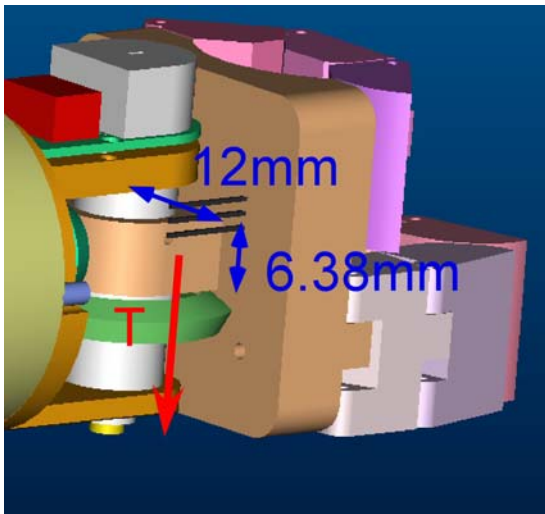


Figure 39 Contrainte de cisaillement sur la pièce POIGNET

La contrainte sur le poignet est une contrainte de cisaillement. On va la calculer à l'aide de [2]. La force est celle due au poids du poignet plus un objet, on l'estime à 300g en exagérant pour avoir un facteur de sécurité supplémentaire dans le calcul.

$$T = 0.3Kg \cdot 10m/s^2 = 3N$$

$$\tau = \frac{T}{S} = \frac{3N}{6.38 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^{-3} m^2} = 39184.9 N/m^2 = 0.039 MPa$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{0.039 \cdot 10^6 Pa}{8.89 \cdot 10^8 Pa} = 4.38 \cdot 10^{-5} rad$$

$$\text{où } G = \frac{E}{2(1 + \mu)} = \frac{2.4 \cdot 10^9 Pa}{2(1 + 0.35)} = 8.89 \times 10^8 Pa$$

avec  $\tau$  contrainte de cisaillement

$T$  effort Tranchant

$S$  surface (section)

$\gamma$  angle de glissement

$G$  module de glissement

$E$  module d'élasticité ( $E = 2.4GPa$ )

$\mu$  coefficient de poisson ( $\mu = 0,35$ )

(valeurs pour l'ABS, le matériaux est du Polyuréthane qui ressemble beaucoup à l'ABS)

$$\text{Pour l'ABS : } \sigma_{\max traction} = 41 - 45 MPa$$

$$\tau_{\max} = 20\% \sigma_{\max traction} = 9 MPa$$

Et on a :



$$\tau = \frac{4}{3} \frac{\text{force}}{\text{surface}} = \frac{4}{3} \cdot 0.039 \text{ MPa} = 0.52 \text{ MPa} < 9 \text{ MPa} \Rightarrow \text{OK!}$$

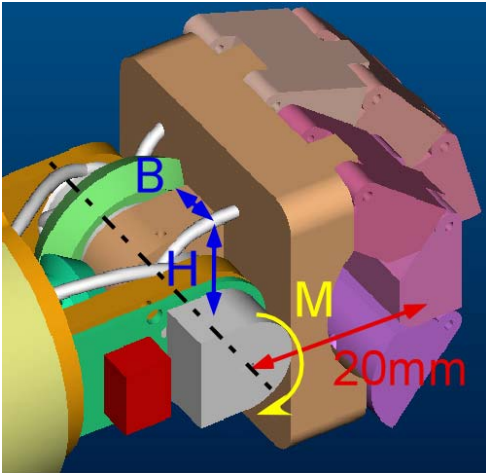


Figure 40 Contrainte de flexion sur la pièce POIGNET

Cette pièce est soumise aussi à une contrainte de flexion. On va la calculer à l'aide de [2].  
Nous avons donc :

$$\sigma = \frac{yM}{I} = \frac{6 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0.06 \text{ Nm}}{9.18 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4} = 392156.86 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0.4 \text{ MPa}$$

où  $y = \frac{H}{2} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{2} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$M = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 300 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} = 0.06 \text{ Nm} \quad \text{exagéré}$$

$$I = \frac{BH^3}{12} = \frac{6.38 \cdot 10^{-3} \cdot (12 \cdot 10^{-3})^3}{12} = 9.18 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

avec

I	l'inertie d'une poutre carrée
M	le moment
y	la demi hauteur H/2
B	largeur de la section rectangulaire de la poutre
H	hauteur de la section rectangulaire de la poutre

Nous obtenons donc que la contrainte de flexion est beaucoup plus petite que la contrainte maximale qui est de 9 MPa (ABS)  $\Rightarrow$  OK !

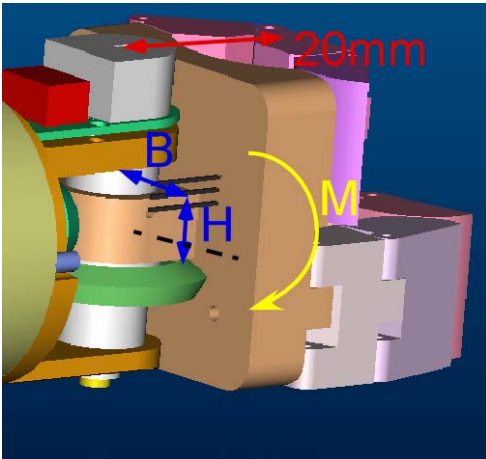


Figure 41 Contrainte de flexion dans l'autre position sur la pièce POIGNET

Dans l'autre position on a

$$\sigma = \frac{yM}{I} = \frac{3.19 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0.06 \text{ Nm}}{2.59 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4} = 738996.14 \text{ N/m}^2 = 0.74 \text{ MPa}$$

où  $y = \frac{H}{2} = \frac{6.38 \cdot 10^{-3}}{2} = 3.19 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$I = \frac{BH^3}{12} = \frac{12 \cdot 10^{-3} \cdot (6.38 \cdot 10^{-3})^3}{12} = 2.59 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

avec

I	l'inertie d'une poutre carrée
M	le moment
y	la demi hauteur H/2
B	largeur de la section rectangulaire de la poutre
H	hauteur de la section rectangulaire de la poutre

Nous obtenons donc que la contrainte de flexion est beaucoup plus petite que la contrainte maximale qui est de 9MPa (ABS)  $\Rightarrow$  OK !

#### 4.4 Masses et longueurs totales

Dans le calcul de la masse totale on n'a pas tenu compte du poids des câbles, des vis, des circlips, des goupilles, des ressorts, des capteurs, des circuits et des aimants.

PIECE MECHANIQUE	MATIERE	Poids	
SUPPORT_MOTEUR_V2	Aluminium	10.73	g
MOTEUR_TIRE_CABLES	(Moteur+Red.)	18	g
BLOQUE_RESSORTS_V2	Aluminium	5.14	g
TIRE_RESSORTS	Laiton	25.77	g
PIGNON_TIRE_CABLES	POM	0.63	g
ROUE_TIRE_CABLES	POM	1.2	g
DOUILLE_MOTEUR_TIRE_CABLES	Laiton	0.37	g
DOUILLE_AXE_TIRE_CABLE	Laiton	0.29	g
AXE_TIRE_CABLE_V2	Acier Inox	0.1	g
FIXE_RESSORT_CABLE_POUCE	Laiton	0.7	g
FIXE_RESSORT_CABLE_DOIT1	Laiton	0.7	g
FIXE_RESSORT_CABLE_DOIT2	Laiton	0.66	g
CALE_TIRE_CABLES	POM	0.06	g
AXE4DDL	Acier Inox	7.3	g
COUDE_AVANT_BRAS_P1	Aluminium	10.12	g
COUDE_AVANT_BRAS_P2	Aluminium	8.42	g
AVANT_BRAS_CONE	POM	17.95	g
MAIN_SUPPORT_MOTEUR_1DDL	Aluminium	1.56	g
MOTEUR_AVANT_BRAS_10MM	(Moteur+Red.)	2x 15.2	g
ENGRENAGE_MAIN	Laiton	2.6	g
CYL_INT_MAIN_P1	Laiton	12.8	g
CYL_INT_MAIN_P2	POM	4.17	g
BOU_CYL_MAIN	POM	3.91	g
ENGRENAGE_COM_MAIN	Laiton	2.61	g
DOUILLE_ENGR_CON_MAIN	Laiton	0.4	g
ENGRANAGE_COM_MAIN 2	Laiton	5.28	g
CYL_POIGNET_1	POM	0.42	g
CYL_POIGNET_2	POM	0.24	g
CYL_POIGNET_3	POM	0.1	g
AXE_POIGNET	Acier Inox	0.15	g
POIGNET	PUR	6.28	g
POUCE_PHALANGE1	POM	1.17	g
POUCE_PHALANGE2	PUR	0.83	g
PHALANGE1	POM	1.45	g
PHALANGE1_B	POM	1.43	g
PHALANGE2	PUR	0.83	g
PHALANGE_SECONDAIRE1	POM	1.32	g
PHALANGE_SECONDAIRE1_B	POM	1.31	g
PHALANGE_SECONDAIRE2	PUR	0.89	g
ENGR_CAPTEUR_MAIN_1	POM	0.55	g
ENGR_CAPTEUR_MAIN_2	Laiton	1.66	g

Poids système tire câbles (partie supérieure)	64.35	g
Poids ensemble avant-bras (partie inférieure)	126.15	g
Poids Total	190.5	g

Le poids du système est dans les dimensions qu'on devait respecter (200g). De plus le système tire-câbles se trouvant dans la partie supérieure du bras nécessite un couple plus faible pour le soulever par rapport à s'il était dans l'avant-bras. De plus, son poids ne devra pas être soutenu par le moteur du coude.

L'ensemble avant-bras a un poids inférieur à la limite qu'on s'était imposé dans le cahier des charges. Donc le moteur du coude n'aura aucune difficulté à l'entraîner.

La longueur de l'avant-bras, du centre de rotation du coude jusqu'au centre de la main, est de 108 mm, et jusqu'au point de prise entre Pouce et Doigt1 de 130 mm. (Voir Figure 42).

Le diamètre du cône de l'avant-bras varie comme dans le prototype (Voir §2.2).

Les proportions sont donc pratiquement les mêmes que pour l'avant-bras du projet précédent. On a donc respecté les vieilles proportions et donc aussi celles humaines. On peut ainsi bien intégrer cet avant-bras dans le premier prototype du bras.

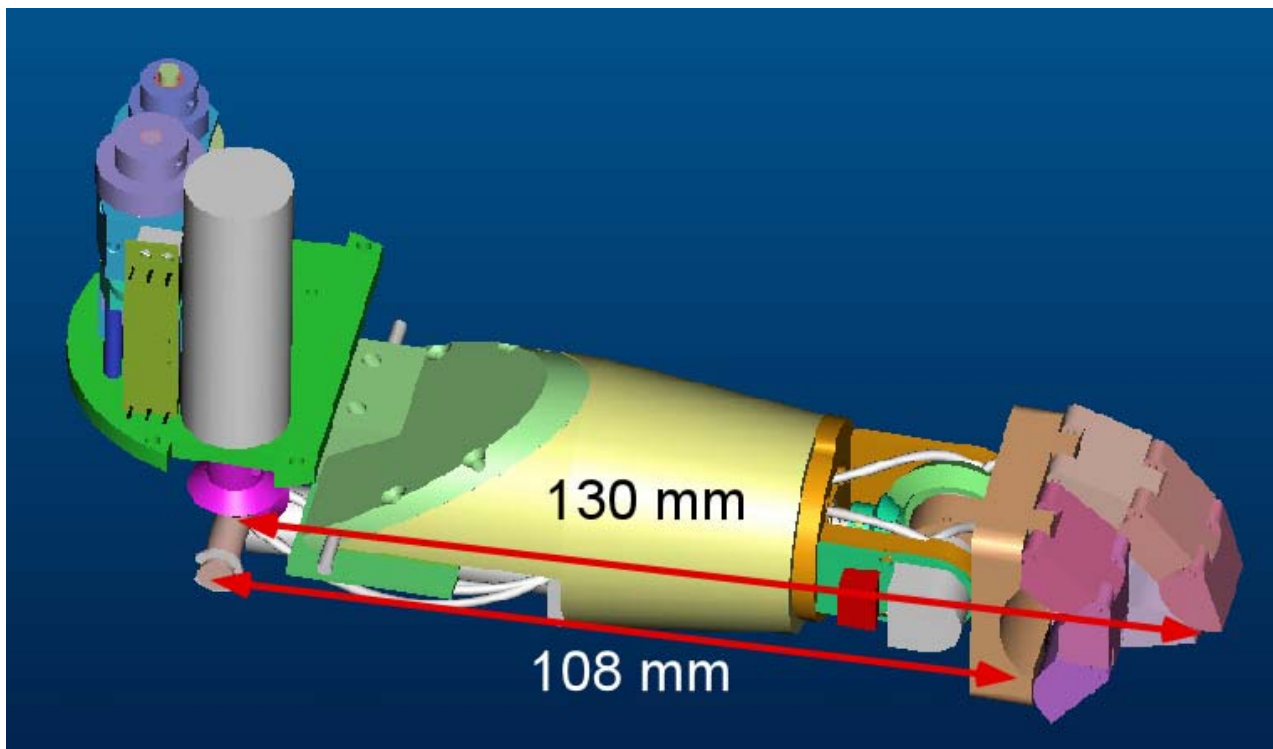


Figure 42 Longueurs du bras

#### 4.5 Prix des pièces à acheter

Dans le tableau suivant, on peut voir les pièces à acheter chez différents producteurs.

DDL	Moteur	Réducteur	Encoder	Engrenages (cfr.[10])	Capteurs et autres (cfr.[11])	Total
<b>1</b>	Maxon RE10 N.article 256091	GP10A 256 :1 N.article 218418	Codeur Digital MR N.article 201933	2 Engrenages, un en POM l'autre en Laiton N.article 291 021 00 261 028 00 Maedler	Potentiomètre Farnell Bourns 3310C 10 kΩ	
<b>Prix (CHF)</b>	<b>50.80</b>	<b>136.90</b>	<b>50.20</b>	<b>13.50+11.09</b>	<b>1.66</b>	<b>264.15</b>
<b>2</b>	Maxon RE10 N.article 256091	GP10A 256 :1 N.article 218418	Codeur Digital MR N.article 201933	2 Engrenages coniques en laiton N.article 350 260 00 et 350 261 00 Maedler	Potentiomètre Type PT 10Lv 10kΩ horizontal	
<b>Prix (CHF)</b>	<b>50.80</b>	<b>136.90</b>	<b>50.20</b>	<b>16.49+23.92</b>	<b>0.85</b>	<b>279.16</b>
<b>3</b>	Faulhaber 1516 A 009 SR	15A 28:1	IE2-64	2 Engrenages en POM N.article 29102000, 29102800 Maedler	2 Switch 2 Aimant 2 Capteur Hall UGN 3 Ressorts Durovis 2 Roulement à bille RMB	
<b>Prix (CHF)</b>	<b>34.50</b>	<b>17.50</b>	<b>55</b>	<b>7.86+13.0</b>	<b>2x3.70+2x2.60+2x3.00+ 7.00+6.00+5.00+9.00+8.00</b>	<b>181.46</b>
<b>Total pour la main (CHF)</b>						<b>724.77</b>

## **5. Conclusion**

Le but de ce projet de diplôme a été la conception de la mécanique d'un prototype de main robotique à 3 degrés de liberté pour le robot humanoïde Robota. Cette main devait pouvoir être montée sur le prototype du bras mécanique à 4 degrés de liberté de Robota. Donc sa taille devait être proportionnelle à celle de ce bras.

La main a été conçue en donnant beaucoup d'importance au facteur esthétique qui est très important pour que la future Robota soit le plus semblable possible à une poupée qu'à un robot. On ne peut pas se permettre d'avoir de dépassement de moteurs ou d'autres mécanismes qui donneraient un aspect plus robotique à la poupée.

Une première phase a été la recherche des solutions déjà existantes de mains robotiques dans le but de reprendre les solutions plus intéressantes. La plus part des mains humanoïdes existantes sont trop grandes par rapport à l'ordre de grandeur de la main de Robota et possèdent plusieurs DDL au niveau des doigts, ce qui rend plus complexe et aussi très encombrant leurs systèmes d'entraînement.

Après cette recherche on est passé à la phase de conception et dimensionnement à laquelle on a consacré une bonne partie du temps; on a cherché à trouver plusieurs solutions pour les différents degrés de liberté. On a commencé à dimensionner les premières pièces. On a fait le choix des actionneurs et des capteurs. L'autre grande partie du temps a été consacré aux dessins 3D et 2D.

On a utilisé comme outil dans la création des dessins techniques 3D et 2D le logiciel Pro Engineer. En parallèle avec la conception on a fait des corrections sur le prototype du bras de Robota, surtout au niveau des circuits des capteurs (Les pièces modifiées sont dans les annexes). En fin de projet on a fait une recherche de matériaux plastique pour recouvrir le bras.

Les résultats principaux qui sortent de ce projet sont résumés ainsi.

On a développé une main avec 3 degrés de liberté intégrable dans le prototype du bras de Robota en respectant ses proportions. Une attention particulière a été donnée aux formes de l'avant-bras et surtout de la main, qui ressemble à une main humaine même si seulement avec trois doigts. Les articulations ont été placées de façon à ce qu'on puisse recréer des mouvements les plus possibles humains et en même temps efficaces pour la manipulation d'objets.

La main est capable de saisir plusieurs objets. La prise d'objets possède une caractéristique adaptative grâce aux ressorts qui entraînent les différents doigts.

On a fait très attention à l'optimisation de l'espace et du poids, le système tire-câbles qui ferme les doigts a été placé à l'intérieur de la partie supérieure du bras, en diminuant ainsi son influence sur le couple des moteurs du haut du bras. On se retrouve ainsi avec un avant-bras plus léger par rapport à ce qu'on avait prévu au début. Les 2 DDL du poignet et leurs motorisations ont été bien intégrées à l'intérieure de l'avant-bras.

Les capteurs ont aussi été intégrés dans le système. De l'espace pour les circuits de commande a été prévu dans l'avant-bras et le bras.

Tous les systèmes d'entraînement des DDL ont été surdimensionnés pour avoir une marge de sécurité en plus.

On a choisi le Latex comme matériau de fabrication de la peau qui recouvrira le bras et la main en raison de ses caractéristiques élastiques et de la simplicité de son modelage sous forme de membrane par la méthode de stratification.

La contribution de ce projet de diplôme à l'ensemble du projet Robota fut d'augmenter les manipulations possibles du prototype du bras, et, du même coup, les possibilités de gestualité qui sont très importantes pour l'interaction homme-robot.

## **6. Remerciements**

Je tiens à remercier mon assistant André Guignard pour m'avoir mis à disposition son temps et son expérience pendant ces mois, F. Guenter pour la collaboration dans l'intégration des circuits de commandes dans le prototype du bras du projet précédent.

Je tiens également à remercier Prof. W. Maeder, pour les explications du logiciel Pro-Engineer, M. G. Perrenoud pour les conseils sur les dessins mécaniques, M.G. Vaucher pour les conseils sur les circuits des capteurs, et Prof. A. Billard pour sa disponibilité et ses précieux conseils.

Je souhaite enfin bonne chance à toute l'équipe Robota ® pour la suite du projet.

*Lorenzo Piccardi*

## 7. Bibliographie

- [1] Prof. R. Clavel                    **Composants de la microtechnique pour la section microtechnique**, Polycopié, 1er cycle Département de microtechnique, Institut de systèmes robotiques EPFL, Février 1999.
- [2] Profs. T. Gmür, M. Del Pedro, J. Botsis  
   **Mécanique des structures**, Polycopié, Département de génie mécanique, Laboratoire de mécanique appliquée et d'analyse de fiabilité, EPFL, Mars 2001.
- [3] Profs. Ph. Béguelin, H.H. Kausch, J. Hilborn  
   **Introduction aux matières plastique pour ingénieurs micro techniciens**, Polycopié, Département des matériaux, Laboratoire des polymères, EPFL, Mars 1999.
- [4] MAXON MOTOR AG    **Entraînement et systèmes de haute précision**, Sachseln 2003/04.
- [5] FAULHABER                    **Servosistemi miniaturizzati**, FAULHABER Group 2003 - 2004.
- [6] Lorenzo Piccardi & Matteo Calzascia  
   **Construction d'un bras mécanique pour le robot humanoïde Robota**, Projet de semestre été 2002-2003, EPFL.
- [7] Commissions romandes de mathématique, de physique et de chimie  
   **FORMULAIRE ET TABLES**  
   Edition du Tricorne, Genève 1996.
- [8] Société suisse des constructeurs de machines  
   Extrait des normes pour écoles techniques Association suisse de normalisation, Zürich 1997.
- [9] MÄDLER                    **Eléments d'entraînement et pièces normalisées, Engrenages et moteurs réducteurs**, Mädlar 2003
- 10] DISTRELEC                    **Le catalogue pour l'électronique**, Distrelec 2003
- [11] FARNELL in one                **Composants électroniques, électromécaniques & d'automatisme, câbles, connectique, énergie**, Farnell Juin 2003
- [12] CarlStahl                    **TechnoCables**, Edition N°3
- [13] Yoseph Bar-Cohen            **Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles**, SPIE The International Society for Optical Engineering 2001
- [14] Yoseph Bar-Cohen            **Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)**, SPIE The International Society for Optical Engineering 2002

**Remarque :** C'est possible de trouver les publications de l'EPFL sur le site <http://ppur.epfl.ch>.



**Liens Internet :****Robot Hand**

<http://www.cc.gatech.edu/gvu/people/faculty/nancy.pollard/grasp.html>  
<http://www-2.cs.cmu.edu/~nsp/projects/hands/hands.html>  
<http://www.ai.mit.edu/people/jks/jks.html>  
<http://www.piaggio.ccii.unipi.it/robotics/robresearch/wholearm.html>  
<http://www.androidworld.com/prod01.htm>  
[http://www.humanoid.rise.waseda.ac.jp/booklet/kato\\_1.html](http://www.humanoid.rise.waseda.ac.jp/booklet/kato_1.html)  
[http://www.industrial-robots.com/Robot\\_Types/androids.htm](http://www.industrial-robots.com/Robot_Types/androids.htm)  
<http://www.inel.gov/adaptiverobotics/humanoidrobotics/armcontrol.shtml>  
[http://vesuvius.jsc.nasa.gov/er\\_er/html/robonaut/robonaut.html](http://vesuvius.jsc.nasa.gov/er_er/html/robonaut/robonaut.html)  
<http://www-robotics.cs.umass.edu/facilities.html>  
<http://www-arts.sssup.it/Cyberhand/introduction/biomechand.htm>

**Muscles artificiels, main**

<http://ndaaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/EAP-recipe.htm>  
<http://ndaaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/memica/memica.htm>  
<http://ndaaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/EAP-web.htm>  
<http://www.jpl.nasa.gov/technology/features/muscles.html>  
<http://ndaaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/aa-hp.htm>  
<http://www.erg.sri.com/automation/actuators.html>  
<http://www.environmental-robots.com/products.htm>

**Capteurs**

<http://www.piher-nacesa.com/product.htm>  
<http://www.newark.com/product-details/text/CD121/4149.html>  
<http://www.farnell.com/>  
[http://www.megatron.fr/composants/position/sensofoil/sensofoil\\_f.php](http://www.megatron.fr/composants/position/sensofoil/sensofoil_f.php)  
[http://www.tekscan.com/flexiforce/specs\\_flexiforce.html](http://www.tekscan.com/flexiforce/specs_flexiforce.html)  
<http://www.distrelec.ch/cgi-bin/supply.storefront/Home?language=04>  
<http://www1.ch.conrad.com/>  
<http://www.honeywell.ch/>  
[http://www.fgp-instrumentation.com/force/miniature\\_fr.dim?l=fr](http://www.fgp-instrumentation.com/force/miniature_fr.dim?l=fr)  
<http://www.sensorsmag.com/articles/0998/thi0998/main.shtml>

**Moteurs**

<http://www.minimotor.ch/>  
<http://www.maxonmotor.ch>  
[http://www.arsape.ch/arsape\\_uk/index\\_e.html](http://www.arsape.ch/arsape_uk/index_e.html)  
[http://www.thomsonind.com/Entry\\_Pages/Portescap.htm](http://www.thomsonind.com/Entry_Pages/Portescap.htm)  
<http://www.tollo.com/>  
<http://www.dienerprecisionpumps.com/frameset.htm>

**Engrenages**

<http://www.hpceurope.com>

**Roulement à bille**

<http://www.rj-international.fr/roulements-mini.htm>

## Interrupteurs

<http://www.matsushita.ch/ac/de/news.html?/home/www/eu/ac/de/products/switch/switch.htm>

## Câbles

<http://www.carlstahl.de/>

## Ressorts

[http://www.durovis.ch/html\\_f/produkte/federn\\_f.html](http://www.durovis.ch/html_f/produkte/federn_f.html)

## Matériaux

<http://www.artenum.org/fr/formulaire/eng/meca/young.php>

<http://www.goodfellow.com/csp/active/static/F/A.html>

<http://www.overrc.com/techniques/generalites/tribologie.htm>

[http://www.materialise.fr/prototypingsolutions/datvac3\\_ENG.html](http://www.materialise.fr/prototypingsolutions/datvac3_ENG.html)

## ProEngineer

<http://www.frotime.com/>

## Latex (Peau)

<http://www.swiss-composite.ch/>

## **8. Annexes**

- I. Tolérances et ajustements**
- II. Dimensionnement d'une autre version de vis tire-câbles**
- III. Plan de Travail**
- IV. Spécifications Potentiomètre Pt10Lv**
- V. Spécifications Potentiomètre 3310C**
- VI. Spécifications Microrupteur superminiature AV4 5S**
- VII. Spécifications Capteur Hall UGN – 3503UA**
- VIII. Spécifications Moteurs**
- IX. Spécifications Latex**
- X. Dessins des circuits pour les capteurs**
- XI. Liste des Pièces**
- XII. Dessins Techniques 2D des pièces**
- XIII. CD avec dessins 3D et 2D**

**I. Tolérances et Ajustements****Jeu entre GOUPILLE\_2V5X24 et SUPPORT\_MOTEUR\_V2**

Arbre Normal (g6, H7) : Jeu non perceptible

GOUPILLE_2V5X24	$\varnothing 2.5 g6_{-0.008}^{-0.002}$
SUPPORT_MOTEUR_V2	$\varnothing 2.5 H7_0^{0.010}$

**Incertain entre GOUPILLE\_2V5X24 et BLOQUE\_RESSORTS\_V2**

Arbre Normal (g6, P7) : Assemblé sous pression

GOUPILLE_2V5X24	$\varnothing 2.5 g6_{-0.008}^{-0.002}$
BLOQUE_RESSORTS_V2	$\varnothing 2.5 P7_{-0.016}^{-0.006}$

**Jeu entre GOUPILLE\_2V5X24 et TIRE\_RESSORTS**

Arbre Normal (g6, H7) : Jeu non perceptible

GOUPILLE_2V5X24	$\varnothing 2.5 g6_{-0.008}^{-0.002}$
TIRE_RESSORTS	$\varnothing 2.5 H7_0^{0.010}$

**Jeu entre MOTEUR\_TIRE\_CABLES et SUPPORT\_MOTEUR\_V2**

SUPPORT_MOTEUR_V2	$\varnothing 15 H7_0^{0.018}$
-------------------	-------------------------------

**Jeu entre AXE\_TIRE\_CABLE\_V2 et Les 2 roulement à bille de 1.5 et 2 mm de Øinterne**

AXE_TIRE_CABLE_V2	$\varnothing 1.5 g6_{-0.008}^{-0.006}$ et $\varnothing 2 g6_{-0.008}^{-0.006}$
-------------------	--

Jeu entre GOUPILLE FIXE RESSORT CABLE et FIXE RESSORT CABLE POUCE,  
FIXE RESSORT CABLE DOIT1 et FIXE RESSORT DOIT2

Arbre Normal (g6, H7) : Jeu non perceptible

GOUPILLE_FIXE_RESSORT_CABLE	$\varnothing 1g6_{-0.008}^{-0.002}$
Les Fixe_Ressort	$\varnothing 1H7_0^{0.010}$

Jeu entre AXE4DDL V2 et TUBEDDL

Arbre Normal (g6, H7) : Jeu non perceptible

AXE4DDL_V2	$\varnothing 5g6_{-0.012}^{-0.004}$	et	$\varnothing 3g6_{-0.008}^{-0.002}$
TUBEDDL	$\varnothing 5H7_0^{0.012}$	et	$\varnothing 3H7_0^{0.010}$

Incertain entre GOUPILLE-2x10 et TUBEDDL

Arbre Normal (g6, P7) : Assemblé sous pression

GOUPILLE-2MM-15MM	$\varnothing 2g6_{-0.008}^{-0.002}$
TUBEDDL	$\varnothing 2P7_{-0.016}^{-0.006}$

Jeu entre GOUPILLE-2MM-15MM et COUDE AVANT BRAS P1

Arbre Normal (g6, H7) : Jeu non perceptible

GOUPILLE-2MM-15MM	$\varnothing 2g6_{-0.008}^{-0.002}$
COUDE_AVANT_BRAS	$\varnothing 2H7_0^{0.010}$

Incertain entre GOUPILLE-2MM-15MM et AXE4DDL

Arbre Normal (g6, P7) : Assemblé sous pression

GOUPILLE-2MM-15MM	$\varnothing 2g6_{-0.008}^{-0.002}$
-------------------	-------------------------------------

AXE4DDL  $\varnothing 2P7_{-0.016}^{-0.006}$

Jeu entre AXE4DDL et COUDE AVANT BRAS P1

Arbre Normal (g6, H7) : Jeu non perceptible

AXE4DDL  $\varnothing 5g6_{-0.008}^{-0.002}$   
COUDE\_AVANT\_BRAS  $\varnothing 5H7_0^{0.012}$

Incertain entre GOUPILLE-2x11 et COUDE AVANT BRAS P2

Arbre Normal (g6, P7) : Assemblé sous pression

GOUPILLE-2MM-15MM  $\varnothing 2g6_{-0.008}^{-0.002}$   
COUDE\_AVANT\_BRAS\_P2  $\varnothing 2P7_{-0.016}^{-0.006}$

Jeu entre GOUPILLE 2X6 et CYL INT MAIN P2

Arbre Normal (g6, H7) : jeu non perceptible

GOUPILLE\_2X6  $\varnothing 2g6_{-0.08}^{-0.002}$   
CYL\_INT\_MAIN\_P2  $\varnothing 2H7_0^{0.010}$

Incertain entre GOUPILLE 2X6 et CYL INT MAIN P1

Arbre Normal (g6, P7) : Assemblé sou pression

GOUPILLE\_2X6  $\varnothing 2g6_{-0.08}^{-0.002}$   
CYL\_INT\_MAIN\_P2  $\varnothing 2P7_{-0.016}^{-0.006}$

Incertain entre CYL INT MAIN P1 et CYL INT MAIN P2

Arbre Normal (g6, P7) : Assemblé sou pression

CYL_INT_MAIN_P1	$\varnothing 18g6_{-0.017}^{-0.006}$
CYL_INT_MAIN_P2	$\varnothing 18P7_{-0.029}^{-0.011}$

Jeu entre CYL\_INT\_MAIN\_P2 et AVANT\_BRAS\_CONE

Arbre Normal (g6, H7) : jeu non perceptible

CYL_INT_MAIN_P2	$\varnothing 22g6_{-0.020}^{-0.007}$
AVANT_BRAS_CONE	$\varnothing 22H7_0^{0.021}$

Jeu entre AVANT\_BRAS\_CONE et CYL\_INT\_MAIN\_P2

(g6, H7) : jeu non perceptible

AVANT_BRAS_CONE	$15g6_{-0.017}^{-0.006}$
CYL_INT_MAIN_P2	$15H7_0^{0.018}$

Incertain entre AVANT\_BRAS\_CONE et GOUPILLE\_2X6

Arbre Normal (g6, P7) : Assemblé sous pression

AVANT_BRAS_CONE	$2P7_{-0.016}^{-0.006}$
GOUPILLE_2X6	$2g6_{-0.008}^{-0.002}$

Jeu entre BOU\_CYL\_MAIN et GOUPILLE\_2X6

Arbre Normal (g6, H7) : Jeu non perceptible

GOUPILLE_2X6	$2g6_{-0.008}^{-0.002}$
BOU_CYL_MAIN	$2H7_0^{0.010} \Rightarrow R13_{-0.005}^0$

Jeu entre MAIN\_SUPPORT\_MOTEUR\_1DDL et AVANT\_BRAS\_CONE

(g6, H7) : jeu non perceptible

MAIN_SUPPORT_MOTEUR_1DDL	$12g6_{-0.017}^{-0.006}$
AVANT_BRAS_CONE	$12H7_0^{0.018}$

Jeu entre AXE\_POIGNET et BOU\_CYL\_MAIN, POIGNET, CYL\_POIGNET\_1, CAL\_POIGNET\_2 et CYL\_POIGNET3

Arbre Normal (g6, H7) : jeu non perceptible

AXE_POIGNET	$\varnothing 3g6_{-0.008}^{-0.002}$
BOU_CYL_MAIN, ...	$\varnothing 3H7_0^{0.010}$

Incertain entre Goupille1mm et AXE\_POIGNET

Arbre Normal (g6, P7) : Assemblé sous pression

Goupille1mm	$\varnothing 1g6_{-0.008}^{-0.002}$
AXE_POIGNET	$\varnothing 1P7_{-0.016}^{-0.006}$

Jeu entre Goupille1mm et POIGNET

Arbre Normal (g6, H7) : Jeu non perceptible

Goupille1mm	$\varnothing 1g6_{-0.008}^{-0.002}$
POIGNET	$\varnothing 1H7_0^{0.010}$

Jeu entre CYL\_POIGNET\_1, CYL\_POIGNET\_2 et POIGNET

g6

CYL_POIGNET_1	$\varnothing 5.22g6_{-0.012}^{-0.004}$
CYL_POIGNET_2	$\varnothing 3g6_{-0.008}^{-0.002}$



Incertain entre AXE\_FALANGES et POUCE PHALANGE1, POUCE PHALANGE2, PHALANGE1, PHALANGE1\_B, PHALANGE2, PHALANGE\_SECONDAIRE1, PHALANGE\_SECONDAIRE1\_B, PHALANGE\_SECONDAIRE2

Arbre Normal (g6, P7) : Assemblé sous pression

AXE\_FALANGES  $\varnothing 1h9^0_{-0.025}$   
 Les différentes Phalanges et le POIGNET  $\varnothing 1JS9^{0.0125}_{-0.0125}$

Jeu entre AXE\_FALANGES et Les différentes Phalanges et le POIGNET

Arbre Normal (g6, H7) : Jeu non perceptible

AXE\_FALANGES  $\varnothing 1g6^{-0.002}_{-0.008}$   
 Les différentes Phalanges et le POIGNET  $\varnothing 1H7^{0.010}_0$

Jeu entre POIGNET et les différentes Phalanges et le POIGNET

Arbre Normal (g6, H7) : jeu non perceptible

$\varnothing 3g6^{-0.002}_{-0.008}$   $\varnothing 3H7^{0.010}_0$

## II. Dimensionnement d'une autre version de vis tire-câbles

Comme mentionné lors de l'analyse de la vitesse du système tire-câbles, la fermeture du système tire-câbles et donc des doigts est assez lente, on va donc dimensionner dans ce paragraphe une vis avec un pas plus grande qui va permettre un déplacement de l'écrou plus rapide.

En gardera le même diamètre de 1.74mm comme le filetage M2, l'angle du filetage sera de 15°.

Le pas sera donc de :

$$pas = \tan(\theta) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \tan(15^\circ) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0.87mm \cong 1.46mm$$

Le couple transmis par cette nouvelle vis sera calculé avec les formules suivantes:

$$M_{serrage} = r \cdot H = r \cdot P \cdot \tan(\vartheta + \rho)$$

$$M_{deserrage} = r \cdot H = r \cdot P \cdot \tan(\vartheta - \rho)$$

$r$  : Rayon de la vis,  $1.74mm / 2 = 0.87mm$

$H$  : Force tangentielle à la vis dans un plan perpendiculaire à son axe

$P$  : Force de serrage dans l'axe de la vis (force de traction maximale du système tire-câble)

$\theta$  : Angle du filetage de la vis, dépend du pas de la vis et de son diamètre

$\rho$  : Angle de frottement, dépend des matériaux en contact.

Pour acier-laiton on a le coefficient de frottement  $\mu = 0.18$  (frottement sec),  $\mu = 0.08$  (graissé).

L'angle de frottement est  $\rho = \arctan(\mu)$ , donc :

$$\rho = 10^\circ.2 \text{ (frottement sec)}$$

$$\rho = 4^\circ.57 \text{ (graissé).}$$

La force de traction maximale du système est

$$P = 6.9N + 10.89N + 17.29N = 35.08N$$

Pour avoir une marge de sécurité en plus on pose une force de traction de 40N.

Ainsi on trouve finalement :

$$M_{serrage} = 0.87 \cdot 10^{-3} m \cdot 40N \cdot \tan(4^\circ.18 + 15^\circ) = 0.012Nm = 12mNm$$

$$M_{deserrage} = 0.87 \cdot 10^{-3} m \cdot 40N \cdot \tan(4^\circ.18 - 15^\circ) = -6.65 \cdot 10^{-3} Nm = -6.65mNm$$

Le couple requis dans cette nouvelle vis est de 12mNm. Le moteur qu'on a déjà choisit pouvait donner après l'étage de réduction des engrenages 23.8mNm.

La vitesse linéaire pour cette vis, correspond à un déplacement équivalent au pas de la vis par tour. On a donc une vitesse linéaire maximale de:

$$v_{3n} = \omega_3 \cdot p = 127.55 \text{tr} / \text{min} \cdot 1.46 \text{mm} = 186.23 \text{mm} / \text{min} = 3.1 \text{mm} / \text{s}$$

Le temps pour fermer la main avec la nouvelle vis est de :

$$t = \frac{sn_{finalDoit2}}{v_{3n}} = \frac{9.76 \text{mm}}{3.1 \text{mm} / \text{s}} = 3.15 \text{s}$$

[illegible]

37	1		3005	ROUE_TIRE_CABLES/ N.Art Mädler 29102800	
36	1		3004	PIGNON_TIRE_CABLES/N.Art Mädler 29102000	
35	2			Moteur/Red/Enc Maxon RE10 0.75W (256091)/GP10A 256 :1 (218418)/Codeur Digital MR (201933)	
34	1			Moteur/Red/Enc Faulhaber 1516 009SR/15A 28 :1/IE2-64	
33	1		3038a/b	PHALANGE_SECONDAIRE2/PUR	
32	1		3037	PHALANGE_SECONDAIRE1_B/POM	
31	1		3036	PHALANGE_SECONDAIRE1/POM	
30	1		3035a/b	PHALANGE2/PUR	
29	1		3034	PHALANGE1 _B/POM	
28	1		3033	PHALANGE1/POM	
27	1		3032a/b	POUCE_PHALANGE2/PUR	
26	1		3031	POUCE_PHALANGE1/POM	
25	1		3030a/b	POIGNET/PUR	
24	1		3029	AXE_POIGNET/Acier Inox	
23	1		3028	CYL_POIGNET_3/POM	
22	1		3027	CYL_POIGNET_2/POM	
21	1		3026	CYL_POIGNET_1/POM	
20	1		3024	DOUILLE_ENGR_CON_MAIN/Laiton	
19	1		3022	BOU_CYL_MAIN/POM	
18	1		3021	CYL_INT_MAIN_P2/POM	
17	1		3020	CYL_INT_MAIN_P1/Laiton	
16	1		3019	ENGRENAGE_MAIN/Laiton	
15	1		3018	MAIN_SUPPORT_MOTEUR_IDDL/Aluminium	
14	1		3017	AVANT_BRAS_CONE/POM	
13	1		3016	COUDE_AVANT_BRAS_P2/Aluminium	
12	1		3015	COUDE_AVANT_BRAS_P1/Aluminium	
11	1		3014	AXE4DDL/Acier Inox	
10	1		3013	CALE_TIRE_CABLES/POM	
9	1		3011	FIXE_RESSORT_CABLE_DOIT2/Laion	
8	1		3010	FIXE_RESSORT_CABLE_DOIT1/Laiton	
7	1		3009	FIXE_RESSORT_CABLE_POUCE/Laiton	
6	1		3008	AXE_TIRE_CABLE_V2/Acier Inox	
5	1		3007	DOUILLE_AXE_TIRE_CABLE/Laiton	
4	1		3006	DOUILLE_MOTEUR_TIRE_CABLES/Laiton	
3	1		3003	TIRE_RESSORTS /Laiton	
2	1		3002	BLOQUE_RESSORTS_V2 /Aluminium	
1	1		3001	SUPPORT_MOTEUR_V2/Aluminium	
Pos.	Quantite	Unite	N° d'identification	Denomination / Caracteristiques	
Mod			Mod	Dessine	Echelle
				Controle	1.000
				Conf normes	
				Bon execution	
Sans nomenclature separee				N° commande	
Nomenclature sep de meme N°				Origine	Nb feuilles
Nomenclature sep de N° different			N° ident	Remplace	Feuille N°
					1
					1
					N° de dessin

74	1			Seg arb ext DIN 6799 – 1.2 Ac Ressort 460...580 HV 30	
73	2			Vis t co ISO 2009 – 1.6x2.5 – 5.8	
72	6			Vis t cy ISO 1580 – M1.6x3 – 5.8	
71	2			Vis t co ISO 2009 – M1.6x4 – 5.8	
70	2			Vis t co ISO 2009 – M1.6x5 – 5.8	
69	3			Vis t co ISO 2009 – M1.6x6 – 5.8	
68	2			Vis t co ISO 2009 – M2x3 – 5.8	
67	4			Vis t co ISO 2009 – M2x6 – 5.8	
66	2			Vis t co ISO 2009 – M2x7 – 5.8	
65	2			Vis t co ISO 2009 – M2x9 – 5.8	
64	1			Vis t co ISO 2009 – M2.5x10 – 5.8	
63	2			Vis t co ISO 2009 – M3x5 – 5.8	
62	3			Gp ca ISO 2338-B - 1x5 – AC	
61	1			Gp ca ISO 2338-B - 1x12 – AC	
60	8			Gp ca ISO 2338-B - 1x14 – AC	
59	1			Gp ca ISO 2338-B - 2x6 – AC	
58	2			Gp ca ISO 2338-B - 2x10 – AC	
57	2			Gp ca ISO 2338-B - 2x11 – AC	
56	2			Gp ca ISO 2338-B - 2x13 – AC	
55	2			Gp ca ISO 2338-B - 2.5x24 - AC	
54	1			Potentiomètre Pt 10Lv (horizontal) 10KΩ	
53	1			Potentiomètre Farnell Bourns 3310C 10KΩ	
52	2			Capteur Hall UGN-3503UA	
51	2			Aimant Ø5x2mm	
50	8			Ressort de torsion Ø0.5mm n=3 AC CK 75 H+K	
49	1			Ressort Durovis 06/1/1	
48	1			Ressort Durovis 05/7/1	
47	1			Ressort Durovis 04/7/2	
46	3			Ressort Ø1.4, longueur 250mm, fil 0.25	
45	1			CarlStahl Câble Inox 1.4401, Ø0.36, construction 7x7	
44	2			Microrupteur superminiature (NAIS Matsushita)Av4 Right angle terminal Simulated roller type	
43	1			Roulement à bille RMB d1.5 D5 B2	
42	1			Roulement à bille RMB d2 D4 B1.2	
141	1		3040	ENGR_CAPTEUR_MAIN_2/ N.Art Mädler26102800	
40	1		3039	ENGR_CAPTEUR_MAIN_1/ N.Art Mädler 29102100	
39	1		3025	ENGRANAGE_COM_MAIN 2/N.Art Mädler 35026100	
38	1		3023	ENGRENAGE_COM_MAIN/ N.Art Mädler 35026000	
Pos.	Quantite	Unite	N° d'identification	Denomination / Caracteristiques	
Mod			Mod		
				Dessine	
				Controle	
				Conf normes	
				Bon execution	
				N° commande	
Sans nomenclature separee				Origine	
Nomenclature sep de meme N°				Remplace	
Nomenclature sep de N° different			N° ident		
					
				N° de dessin	

71