

Projet présenté à :

**Professeur Henri Champliaud**

**Professeur Thien-My Dao**

## **Rapport Technique**

**Conception d'un manipulateur robotique d'un véhicule de sauvetage pour le  
club étudiant CAPRA**

Dans le cadre du cours :

**Projet de fin d'études en génie mécanique**

**MEC795-01**

### **Membres de l'équipe**

**BERNARD, Maxime, (BERM07039709)**

**DUBOIS, Jonathan, (DUBJ07099902)**

**LEX, Martin, (LEXM29079601)**

**NGOM, Daouda Faye, (NGOD23047605)**



## Sommaire

Ce projet est une tentative d'initier la conception du prochain robot de sauvetage du club étudiant de robotique CAPRA. Ce prochain robot consiste en une base mobile sur laquelle est attachée un bras robotique. Pendant que le club étudiant se penche sur la conception de la base mobile, l'équipe de PFE est chargée du bras robotique. Cette conception englobe principalement la partie mécanique, étant un projet du département de génie mécanique. Toutefois, une partie du contrôle est tout de même abordée.

Au départ, l'équipe de PFE voulait se baser sur l'ancienne conception du bras robotique de CAPRA : Ovis. C'est un bras à 6 DDL, mais dû au coût élevé des actionneurs Kinova, l'équipe a dû partir à la recherche d'une nouvelle solution. Lors de la phase de remue-méninges, l'équipe a exploré les différentes configurations de bras possible ainsi que les différents types d'actionneurs disponibles sur le marché. Deux solutions parmi les différentes configurations de bras ont été conservées approfondies et comparées : un bras avec 6 DDL et un autre avec 7 DDL. Les deux concepts sont assez similaires, le bras à 6 DDL aurait des membrures longues afin d'atteindre la longueur nécessaire alors que le bras à 7 DDL possède un actionneur linéaire supplémentaire permettant l'allongement d'une des membrures du bras.

Par la suite, des calculs préliminaires ont été effectués pour faire le choix d'actionneur. Ces actionneurs doivent être en mesure de soulever notre couple maximal de 146 Nm. Les moteurs choisis pour notre projet sont ceux de la compagnie ZeroErr pour leur assemblage compact contenant tous les composants nécessaires.

Enfin, le bras a été évalué en statique afin de valider sa rigidité. Les membrures sont dimensionnées afin de facilement maintenir le poids du bras. Finalement, après analyses, le bras à 7 DDL a été conservé et la phase de concrétisation de la conception a été amorcée avec ce concept.

À la suite de la conception du bras, les différents livrables sont présentés :

1. Prototype virtuel sous forme de CAO
2. Liste des composants à acheter
3. Liste des pièces à fabriquer
4. Coût total
5. Poids total
6. Schéma de l'espace de travail du robot
7. Contrôle direct du robot
8. Conception de l'interface de commande pour les actionneurs

Grâce aux multiples livrables que l'équipe remet au club étudiant, le club est maintenant en mesure d'évaluer la performance de la conception et de se lancer dans sa fabrication si jugée pertinente. Cette conception sera présentée aux membres du club étudiant par le prometteur du projet d'ici la fin du mois.

## **Table des matières**

Sommaire .....	III
Table des matières.....	IV
Liste des figures .....	V
Liste des tableaux.....	VIII
Introduction.....	1
Résumé du cahier de charge.....	2
Recherche de solutions.....	6
Sélection des solutions potentielles.....	16
Choix des moteurs.....	20
Choix du préhenseur .....	23
Modification au projet.....	24
Sélection de la configuration gagnante .....	26
Présentation de la solution gagnante .....	44
Validation du choix d'actionneur linéaire.....	49
Dimensionnement des membrures .....	51
Évaluation des performances .....	58
Conclusion et recommandations .....	62
Livrables pour le club étudiant CAPRA .....	63
Références.....	70
Annexe I.....	72
Annexe II .....	76
Annexe III .....	77
Annexe IV .....	78
Annexe V .....	79
Annexe VI.....	81
Annexe VII.....	83

## Liste des figures

Figure 1: Bras robotisé utilisé lors de la compétition précédente .....	2
Figure 2: Bras robotisé Canadarm2 dans l'espace (Gouvernement du Canada, 2018).....	6
Figure 3: Configuration et dimensions du spot arm (BostonDynamics, s.d.) .....	7
Figure 4: Ovis, bras actuel du club Capra (Capra, 2022).....	7
Figure 5: Caractéristiques du bras Karo (Habibian et al., 2021).....	8
Figure 6: Configuration et dimensions du bras Karo .....	8
Figure 7: Configuration du bras Paripreksya (Megalingam, 2022) .....	8
Figure 8: Bras robotique avec liaisons pivots engendrées par des actionneurs linéaires .....	9
Figure 9: Bras robotique avec actionneurs linéaires et rotatifs (Fahim, 2020) .....	9
Figure 10: Ovis avec des membrures plus longues.....	10
Figure 11: Ovis avec des membrures plus longues et vers le haut.....	10
Figure 12: Configuration à 7 DDL.....	11
Figure 13: Bras robotisé avec des actionneurs linéaires .....	11
Figure 14: Réducteur à ondes de déformation (Harmonic drive).....	12
Figure 15: Réducteur cycloïde (Cycloid drive).....	12
Figure 16: Réducteur planétaire .....	13
Figure 17: Réducteur à engrenages .....	13
Figure 18: Réducteur à poulie .....	13
Figure 19: Réducteur à transmission infinie .....	14
Figure 20: Réducteur à engrenage sphérique .....	14
Figure 21: Actionneur linéaire magnétique.....	15
Figure 22: Actionneur pneumatique.....	15
Figure 23: Actionneur linéaire à câble .....	15
Figure 24: Actionneur linéaire à vis à bille .....	16
Figure 25: Solutions préliminaires gagnantes des configurations.....	17
Figure 26: Solutions préliminaires gagnantes des réducteurs .....	18
Figure 27: Solution gagnante de l'actionneur linéaire .....	19
Figure 28: DCL préliminaire du joint 2 (J2) .....	20
Figure 29: Série KA-58 et KA-75 .....	21
Figure 30: Série eRob I et T .....	22
Figure 31: Modèles choisis, eRob série I (gauche) et série T (droite) .....	22

---

Figure 32: Détails série eRob I, et T .....	23
Figure 33: DCL préliminaire du joint 2 (J2) .....	24
Figure 34: Position lors du soulevé de charge .....	25
Figure 35: Position bras étendue .....	25
Figure 36: Représentation schématique et DCL de la configuration à 6 DDL .....	27
Figure 37: Représentation schématique et DCL de la configuration à 7 DDL .....	27
Figure 38: Position du bras à 6 et 7 DDL dans le cas critique .....	28
Figure 39: Schéma du bras robotique à 6 DDL.....	31
Figure 40: DCL pour le calcul de couple au joint 6 .....	32
Figure 41: DCL pour le calcul de couple au joint 5 .....	33
Figure 42: DCL pour le calcul de couple au joint 4 .....	34
Figure 43: DCL pour le calcul de couple au joint 7 .....	36
Figure 44: DCL pour le calcul de couple au joint 3 .....	37
Figure 45: DCL pour le calcul de couple au joint 2 .....	38
Figure 46: DCL pour le calcul de couple au joint 1 .....	40
Figure 47: Modélisation du bras .....	42
Figure 48: Présentation du bras robotique .....	44
Figure 49: Longueur du bras robotique.....	44
Figure 50: Rove munit du bras robotique .....	48
Figure 51: moteur DF45L024048-A2 à courant continu sans balais .....	49
Figure 52: Spécification de la vis à bille .....	49
Figure 53 : graphique de l'efficacité et de la vitesse de rotation en fonction du couple (Nm) du moteur choisi....	50
Figure 54: Conception préliminaire de l'actionneur linéaire en mode rétracté et étendu .....	50
Figure 55: Cas 1 (gauche) et cas 2 (droite) .....	51
Figure 56: Schéma membrure 4 .....	51
Figure 57: Schéma actionneur linéaire.....	52
Figure 58: Analyse Ansys de l'actionneur linéaire.....	53
Figure 59: Schéma de la membrure 2 .....	53
Figure 60: Analyse Ansys de la membrure 2 .....	54
Figure 61: Analyse Ansys du coude.....	54
Figure 62: Cas 2, bras à la verticale .....	55
Figure 63: Analyse Solidworks Simulation de la membrure 2 .....	56

---

---

Figure 64 : Simulation de l'assemblage total de l'actuateur linéaire .....	57
Figure 65 : Contrainte maximum dans l'assemblage de l'actuateur linéaire .....	57
Figure 66: Trajectoire linéaire du bras .....	58
Figure 67: Précision du bras.....	59
Figure 68: Vitesse cartésienne du bras.....	60
Figure 69: Enveloppe de travail du bras .....	63
Figure 70: Référentiels des joints du robot .....	64
Figure 71: Kit de développement Jetson Namo .....	67
Figure 72: Montage Jetson Nano avec une carte d'extension RS485 CANopen .....	68
Figure 73: Circuit de commande et circuit de puissance .....	68
Figure 74: Conditions frontières de l'analyse par élément fini de la membrure 2.....	81
Figure 75: Conditions frontières de l'analyse par élément fini de l'actionneur linéaire .....	81
Figure 76: Conditions frontières de l'analyse par élément fini du coude .....	81
Figure 77 : Condition frontière de la force 7.21 N de l'actionneur linéaire.....	82
Figure 78 : Condition frontière du moment (178 Nmm) de l'actionneur linéaire.....	82

## Liste des tableaux

Tableau 1: Barème d'évaluation .....	5
Tableau 2: Barème d'évaluation pour les configurations .....	17
Tableau 3: Barème d'évaluation pour les actionneurs rotatifs.....	18
Tableau 4: Barème d'évaluation pour les actionneurs linéaires .....	19
Tableau 5: Composants à assembler .....	21
Tableau 6: Choix du préhenseur .....	23
Tableau 7: Itérations 3 et 5 sur l'impact du poids des membrures .....	29
Tableau 8: Itérations sur l'impact du poids des actionneurs sur la configuration à 6 DDL.....	29
Tableau 9: Itérations sur l'impact du poids des actionneurs sur la configuration à 7 DDL.....	30
Tableau 10: Géométrie optimale de la configuration à 6 DDL et 7 DDL.....	31
Tableau 11: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J6 .....	33
Tableau 12: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J5 .....	34
Tableau 13: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J4 .....	35
Tableau 14: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J7 .....	36
Tableau 15: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J3 .....	38
Tableau 16: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J2 .....	39
Tableau 17: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J1 .....	41
Tableau 18: Caractéristiques des membrures du bras .....	42
Tableau 19: Caractéristique des membrures du bras.....	45
Tableau 20: Caractéristiques des actionneurs .....	45
Tableau 21: Liste des composants à acheter .....	46
Tableau 22: Liste des pièces à fabriquer .....	47
Tableau 23: Masse et prix final du bras .....	48
Tableau 24: Spécification membrure 4 .....	52
Tableau 25: Spécification actionneur linéaire.....	52
Tableau 26: Spécification de la membrure 2.....	53
Tableau 27: Spécification du coude .....	54
Tableau 28: Résumé de l'évaluation des performances.....	61
Tableau 29: Paramètres de la table DH.....	64

## **Introduction**

CAPRA est un club étudiant de l'École de technologie supérieure qui conçoit, fabrique et assemble des robots de sauvetage. Le club participe à des compétitions internationales tel que la « RobocupRescue » et le « World Robot Summit (WRS) ». Typiquement, un robot de sauvetage comporte une base mobile ainsi qu'un bras robotisé fixé sur cette dernière.

Les bras robotiques industriels ne sont rien de nouveau. Ils sont efficaces pour effectuer des actions rapides de manière répétée et continue. Cependant, pour un robot de sauvetage, le bras robotique doit être légèrement adapté à l'utilisation et c'est pour cela qu'il est nécessaire que le club étudiant CAPRA conçoit une solution qui n'est pas sur le marché.

Les principaux défis qui forcent le club à fabriquer une solution sur mesure sont la longueur d'action du préhenseur ainsi que la charge utile qu'il doit soulever. En effet, le besoin d'aller chercher une longueur de bras de 1,8 mètre tout en soulevant une charge utile de 5 kg nécessite une solution ingénierieuse s'il veut être aussi capable de respecter la contrainte de masse de 10 kg.

Pour y arriver, l'équipe doit suivre une méthodologie rigoureuse :

D'abord, le rapport présente un résumé du cahier de charge et la recherche documentaire afin de voir ce qu'il y a de disponible sur le marché et d'en apprendre un peu sur les différents types d'actionneur de disponibles. Par la suite, en se basant sur les solutions existantes, il faudra « inventer » des solutions adaptées aux besoins d'un robot de sauvetage. Le choix de solution sera séparé en plusieurs parties en ordre chronologique dans le rapport :

1. La configuration des joints sur le bras
2. Le type d'actionneur formant les différents joints du bras

À l'aide de calculs, deux solutions seront évaluées afin de déterminer la plus performante pour notre application. Ces calculs seront aussi en mesure de dimensionner nos actionneurs afin d'aller chercher un bon ratio couple/poids.

Ensuite, une fois que le choix de configuration sera déterminé et que le choix de composants de joints sera effectué, il sera possible de modéliser notre robot. Les différentes parties incluses dans notre modèle 3D seront les suivantes :

1. Les joints
2. Les membrures
3. La base d'attache
4. Le préhenseur

Il faudra évidemment refaire une vérification des paramètres réels de notre robot avec des calculs et optimiser la forme des membrures et de sélectionner un matériau offrant un bon ratio résistance/masse.

Finalement, étant donné la multidisciplinarité de l'équipe, le contrôle du bras sera effectué. Une enveloppe de travail possible pour le bras sera présentée afin de visualiser son potentiel.

## **Résumé du cahier de charge**

Cette première section fait part du résumé du cahier de charge. Ici, uniquement les informations nécessaires à la compréhension du projet sont présentées. Entre autres, le contexte, les objectifs, les contraintes et le barème d'évaluation sont présentés. Pour plus de détails ou pour une compréhension plus approfondie, se référer au cahier de charge.

### **Contexte et définition du projet**

CAPRA est un club étudiant de robotique qui construit des robots de sauvetage. Cette année, nous sommes dans la conception d'un nouveau prototype. Pendant que le club étudiant se penche sur la conception de la base mobile, une équipe de PFE pourrait entreprendre la conception du manipulateur robotique qui sera installé sur celle-ci. CAPRA participe à des compétitions telles que la RoboCupRescue et a besoin d'un nouveau bras qui possède la dextérité pour effectuer les différentes tâches dans les épreuves. Une image du bras actuel est fournie à la figure 1. À titre de référence, ce bras mesure 1,2 mètre et a une masse d'environ 7,5 kilogrammes.



Figure 1: Bras robotisé utilisé lors de la compétition précédente

### **Objectif et limites du projet**

L'objectif est de concevoir un bras robotique permettant de réussir les épreuves de RoboCupRescue. Le nouveau concept peut être basé sur celui déjà existant afin de l'optimiser, ou commencer à partir de zéro. Le bras doit contenir différents éléments : Des joints, des membrures, une base d'attache, un préhenseur et un système de vision.

### **Requis**

Étant donné que le projet est réalisé en collaboration avec le club étudiant CAPRA, il est préférable d'avoir accès au local du club dans le pavillon D pour avoir accès au robot. Toutefois, deux étudiants de l'équipe sont membres du club CAPRA. Par conséquent, ils ont déjà accès au local. En cas de besoin, ils peuvent ouvrir la porte aux deux autres étudiants de l'équipe n'ayant pas un accès en tout temps.

Aussi, pour assurer la compatibilité du bras robotique sur la base mobile, l'équipe doit avoir accès à la modélisation 3D de la base mobile conçue par le club étudiant. Toutefois, comme mentionné précédemment, ceci n'est pas un problème puisque deux membres de l'équipe font partie du club étudiant en question.

Donc, aucune action n'est requise pour l'instant grâce à la situation des membres de l'équipe. En revanche,

---

avenant la situation où les deux membres de l'équipe venaient à quitter le club étudiant, il faudrait entreprendre les démarches pour garder l'accès au robot et à la modélisation du robot.

### Limits

Au niveau de la conception, l'équipe se limitera au bras robotisé. Cela étant dit, nous allons exclure le préhenseur et le système de vision dans la partie conception du projet. Cette décision provient du raisonnement que tous les types de préhenseurs et de systèmes de vision peuvent être compatibles et installés sur le bras robotisé. De plus, ces derniers existent sur le marché et ceux-ci seraient probablement la solution optimale. Ainsi, l'accent sera mis sur le bras robotisé puisqu'il se doit d'être adapté spécifiquement pour les besoins du club étudiant CAPRA.

Tout de même, la solution finale inclura un préhenseur puisque celui-ci sera utile pour les calculs de forces. Cependant, ce sera un composant sélectionné dans un catalogue en fonction des besoins. Il ne sera pas conçu spécifiquement par notre équipe.

### Exclusions

L'équipe se concentre d'abord l'aspect mécanique et ensuite sur l'électronique du bras robotisé. C'est pourquoi tout ce qui a trait au logiciel ne sera pas pris en compte lors de la réalisation du projet. Les compétences et le profil d'étude des membres de l'équipe ne permettent pas d'offrir une solution complète à ce niveau. Alors, l'effort sera mis à l'endroit où l'impact risque d'être le meilleur, c'est-à-dire, sur la conception mécanique du bras robotisé et sa commande.

### Budget/Enveloppe de coûts

Comme spécifié dans la liste des besoins et contraintes, le budget pour la fabrication du bras robotisé est de 25 000 \$ CAD. Cette année, le club se lance dans la fabrication d'une nouvelle base mobile et le budget alloué à celle-ci est justement environ 25 000 \$ CAD. Nous jugeons que le même montant sera disponible l'année suivante pour la fabrication d'un bras attaché à celle-ci. Si notre travail de conception du bras est satisfaisant, le club devrait être en mesure de le fabriquer l'année suivante.

### Description des besoins et contraintes :

La conception du bras robotique respectera les besoins, les contraintes et les requis spécifiques pour les épreuves de dextérité de la compétition. Les listes suivantes ont été réalisées par le promoteur du projet. Elles ont été faites de sorte que les autres membres de l'équipe n'aient pas à aller voir dans le document de la compétition. En d'autres termes, le promoteur s'est assuré de transformer directement les épreuves des compétitions en besoins, contraintes et requis spécifiques lors de la rédaction du document de présentation du projet de fin d'études.

- Le bras possède au moins 6 DDL pivot afin d'offrir beaucoup de flexibilité au niveau du contrôle;
- Le bras est en mesure d'effectuer des actions avec son préhenseur à une longueur d'au moins 1,8 m;
- Le bras possède une base d'attache de 4 po de largeur maximale;
- Le bras est compact et l'encombrement maximum au repos ne dépasse pas les dimensions suivantes : 750mm x 250mm x 500mm (Longueur x Largeur x Hauteur);
- Le bras est léger et le poids maximal du bras ne dépasse pas 10 kg afin d'être éligible pour participer à la compétition;
- Le bras est robuste et ne vibre pas pour permettre une bonne maniabilité;

- 
- Le bras est sécuritaire afin de ne pas blesser les humains ni détruire son environnement;
  - Le bras est étanche afin de résister au sable et au gravier;
  - Le bras atteint une vitesse cartésienne linéaire d'au moins 25 cm/s;
  - Le bras effectue des mouvements précis et la tolérance sur la précision est minime;
  - Le bras peut posséder de l'espace pour du filage interne pour que les axes tournent à l'infini;
  - Le bras peut être équipé d'un frein mécanique;
  - Le coût pour la fabrication du bras ne dépasse pas 25 000 \$ CAD.

#### Requis spécifiques aux épreuves de la compétition :

- Le bras est en mesure de positionner son système de vision dans toutes les orientations;
- Le système de vision permet au robot de voir à une profondeur de 50 cm à l'intérieur d'un tuyau de 55 mm de diamètre;
- Le préhenseur s'adapte et prend différentes géométries;
- L'ouverture du préhenseur s'ajuste sur une plage de 0 à 10 cm minimale;
- Le bras est rigide et est capable de soutenir une charge de 5 kg en mouvement;
- Le bras possède une pose ergonomique adaptée au transport de charges;
- Le bras se déplace sur des trajectoires linéaires sur une longueur d'au moins 50 cm;
- Le bras permet au robot d'ouvrir une porte.

#### Liste des spécifications techniques

Des besoins et contraintes du projet, il est possible de créer des caractéristiques et spécifications techniques. En effet, en utilisant les outils de la maison de la qualité et le diagramme de Pareto, des caractéristiques et spécifications techniques ont été créées. Les spécifications techniques du cahier de charge font part des besoins à combler selon le devis. Cela sert à évaluer et quantifier le niveau d'atteinte d'un besoin du client. Ce barème présente la valeur souhaitée, l'objectif et les unités.

## Barème d'évaluation

Le barème d'évaluation est ce qui permet de noter les différents concepts issus des séances de remue-méninges, analyse défectuologique, recherches personnelles et bien plus. En effet, le barème d'évaluation comprend une colonne permettant de quantifier la performance des concepts ainsi qu'une cote associée à chaque performance. Finalement, en analysant chaque concept retenu dans le barème, des notes leur sont attribuées et il est possible d'en déterminer le concept le plus prometteur.

Tableau 1: Barème d'évaluation

Barème d'évaluation				
Spécification	Objectif	Cible	Cote	Performance
Oscillation maximale du bras (mm)	↓	10	3	< 5
			2	[5; 15[
			1	[15; 25[
			0	≥ 25
			3	≥ 2,0
La distance à laquelle le préhenseur peut être utilisé (m)	↑	1,8	2	[1,6; 2,0[
			1	[1,2; 1,6[
			0	< 1,2
			3	≥ 60
			2	[40; 60[
La longueur de la trajectoire linéaire possible (cm)	↑	50	1	[20; 40[
			0	< 20
			3	< 20 000
			2	[20 000; 30 000[
			1	[30 000; 40 000[
			0	≥ 40 000
Le coût de fabrication (\$ CAD)	↓	25 000	3	< 8
			2	[8; 12[
			1	[12; 16[
			0	≥ 16
			3	6
Le nombre d'axes atteignables	↑	5	2	5
			1	4
			0	≤ 3
			3	≥ 3
			2	2
Le nombre de freins mécaniques	↑	2	1	1
			0	0
			3	< 5
			2	[5; 15[
			1	[15; 25[
La précision du positionnement (mm)	↑	10	0	≥ 25
			3	≥ 7
			2	6
			1	5
			0	≤ 4
Le bras arrête lors d'une collision	↑	Oui/Non	3	Oui
			0	Non
La vitesse cartésienne linéaire linéaire du bras (cm/s)	↑	25	3	≥ 30
			2	[20; 30[
			1	[10; 20[
			0	< 10
			3	≥ IP66
L'indice d'étanchéité du bras	↑	IP55	2	IP55
			1	IP44
			0	≤ IP33
			3	≥ 5,5
La charge qu'il peut soulever (kg)	↑	5	2	[4,5; 5,5[
			1	[3,5; 4,5[
			0	< 3,5

## **Recherche de solutions**

La recherche de solution est probablement l'élément le plus important quand vient le temps de solutionner le problème soulevé. En effet, il faut faire preuve d'ouverture d'esprit et de créativité tout en restant professionnel et en tenant compte des besoins et attentes du promoteur. Pour répondre au besoin du promoteur, il faut élaborer plusieurs solutions potentielles et comparer ces concepts de manière objective grâce au barème d'évaluation établie lors de l'analyse du problème. Ainsi, la sélection du concept final sera guidée fortement par les outils bâtis dans la section précédente de ce cahier de charge.

### **Recherche documentaire**

Quand bien même que la recherche de solutions soit un processus de créativité, il est pertinent de s'informer sur les pratiques courantes et existantes de l'industrie. Cela permet de développer les connaissances de base sur le sujet à l'étude, qui, dans notre cas, est les bras robotiques. En effet, tous les membres de l'équipe ne possèdent pas les mêmes connaissances sur le sujet. De plus, il se peut que la solution au problème que l'équipe tente de solutionner existe déjà ou soit sous une forme légèrement différente. Dans les deux cas, il ne sert à rien de réinventer ce qui se trouve déjà dans la documentation.

Ainsi, sous les conseils des professeurs encadrants et selon le jugement, l'équipe s'est informée sur des bras robotiques déjà existants. Parmi ceux-ci on retrouve :

#### **Canadarm2**

Canadarm2 est le deuxième bras robotisé de la station spatiale, conçu et fabriqué au Canada. Il est conçu pour travailler en orbite et a une portée de 17 mètres. Parmi les tâches à accomplir, le bras doit assurer la maintenance de la station, déplacer des fournitures, de l'équipement et des astronautes ainsi que saisir des vaisseaux-cargos et les amarrer à la station spatiale. Toutefois, le bras de 1 497 kg n'est pas utilisable sur terre puisqu'il ne peut pas soutenir son propre poids. Pour cette raison, l'équipe n'a pas approfondi ses recherches à son égard. La nature trop différente des deux projets fait en sorte qu'il est impossible de s'en inspirer.



Figure 2: Bras robotisé Canadarm2 dans l'espace (Gouvernement du Canada, 2018)

#### **Spot arm**

Spot arm est le bras robotique, conçu par l'entreprise américaine Boston Dynamics, dédié à être placé sur le robot Spot. En pleine extension, le spot arm mesure 984 millimètres et a une masse de 8 kg. La charge maximale qu'il peut lever est de 11 kg ou bien 5 kg lorsque le bras est étendu de 500 millimètres. Aussi, il possède 6 degrés de liberté en plus du préhenseur.

Ce bras s'apparente physiquement et par sa fonction à celui utilisé par le club étudiant Capra présentement. Toutefois, il y a très peu d'informations disponibles en ligne à propos des actionneurs, moteurs et capteurs. Néanmoins, il est possible de s'inspirer de la géométrie et de la configuration.

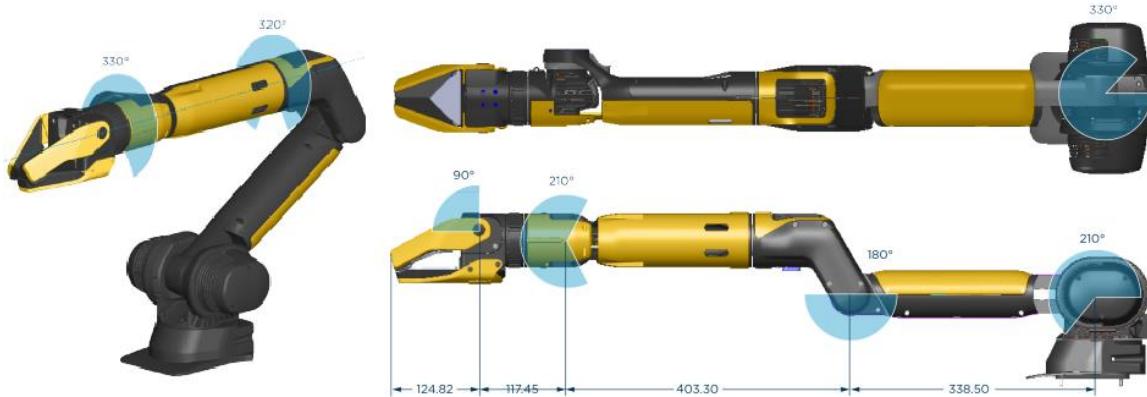


Figure 3: Configuration et dimensions du spot arm (BostonDynamics, s.d.)

#### Ovis - Bras actuel de CAPRA

Ovis est le manipulateur robotique de Markhor, la chèvre de montagne actuelle de CAPRA. Ce bras possède 6 DDL et un manipulateur robotique. Dans son poignet, il y a plusieurs capteurs intégrés, comme un système de vision et un capteur de CO<sub>2</sub>. Le bras possède des capteurs de forces qui arrêtent le bras lors d'une collision. Les membrures sont fabriquées en Onyx, et les joints sont imprimés en PLA. Ses actionneurs à ondes de déformation ont une valeur de 15 000\$ au total, et il y a 2 versions différentes d'actionneurs dans le bras. Le bras est capable d'avoir un arrangement compact lorsqu'il est au repos. Le volume du bras est assez monstrueux pour son poids de seulement 7.5 kg. De plus, certains des joints ne sont pas assez rigides, ce qui crée des oscillations lors de certains mouvements. À partir de Ovis, il serait possible d'aller chercher une solution en optimisant le modèle actuel.



Figure 4: Ovis, bras actuel du club Capra (Capra, 2022)

#### Karo - Robot de secours :

Karo est un robot de secours qui, comme CAPRA, participe à la Robocup. Leur manipulateur robotique est assez intéressant, car leur solution semble avoir une bonne performance à bas coût. Il est léger, les membrures sont en fibre de carbone alors que les joints sont plutôt en aluminium. Il réussit à lever une charge utile de 5,6 kg avec le bras en pleine extension, ce qui est similaire à un de nos requis. Ils ont implémenté un joint prismatique qui fait varier la longueur du bras de 0,4 m. Et finalement sa distance maximale est 1,3 m.

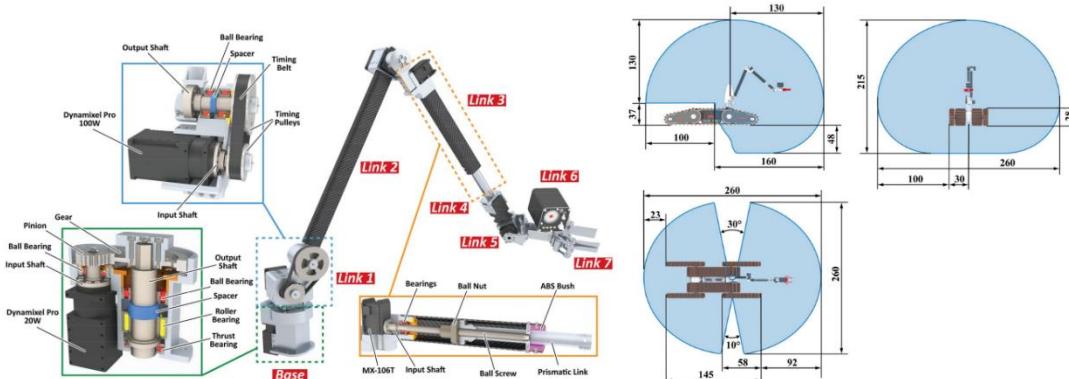


Figure 5: Caractéristiques du bras Karo (Habibian et al., 2021)

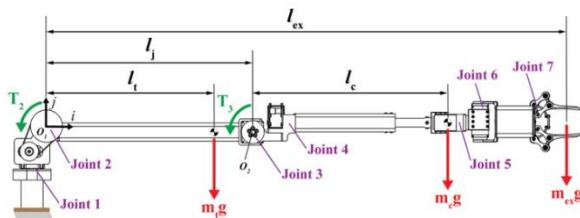


Figure 6: Configuration et dimensions du bras Karo

Les figures dans l'article de recherche sont très informatives et nous souhaitons représenter notre solution avec des figures semblables.

#### Paripreksya :

Paripreksya est aussi un robot de secours qui participe à la WRS. Leur manipulateur robotique est une solution maison peu coûteuse, mais avec peu de maniabilité due aux bas nombres de degrés de liberté. Il est cependant capable d'accomplir des tâches simples avec succès. Leur structure est rigide avec les membrures en acier et aluminium. Le mécanisme linéaire au joint 2 (link 2) permet d'augmenter le couple transmis par le moteur dans le reste du bras robotique.

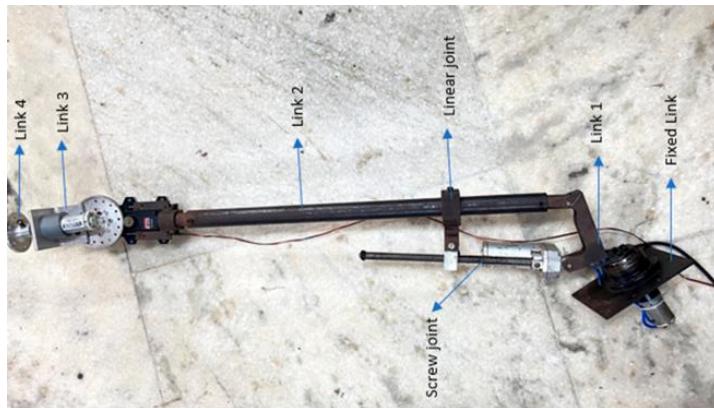


Figure 7: Configuration du bras Paripreksya (Megalingam, 2022)

### Bras robotique, liaisons pivots engendrées par actionneurs linéaires :

La particularité de ce bras robotique est que les liaisons pivots sont engendrées par des actionneurs linéaires. Toutes les liaisons pivots, sauf à la base, sont engendrées par des actionneurs linéaires. Cette solution originale possède quatre degrés de liberté. Malgré le fait que le bras est muni de cinq actionneurs, il n'y a que quatre degrés de liberté puisque deux actionneurs linéaires confèrent une liaison prismatique. L'avantage de cette configuration est la robustesse du système. La réduction des moments de force aux joints et la force accrue des actionneurs linéaires font en sorte que cette configuration est en mesure de soulever une grande charge. Toutefois, la géométrie de la configuration et la grosseur des actionneurs limitent la distance à laquelle le préhenseur peut être utilisé en plus d'alourdir le système.



Figure 8: Bras robotique avec liaisons pivots engendrées par des actionneurs linéaires

### Bras robotique, actionneurs linéaires et rotatifs:

Cette configuration est similaire à la précédente. C'est-à-dire que les mouvements rotatifs principaux sont aussi engendrés par des actionneurs linéaires, mais la manière de les accrocher est différente. Au bout, il y a des actionneurs rotatifs pour permettre une certaine maniabilité au préhenseur. En fin de compte, les avantages sont similaires au concept précédent. Quant aux désavantages, cette configuration est encombrante et il n'est pas possible de la replier en position « fermée ».

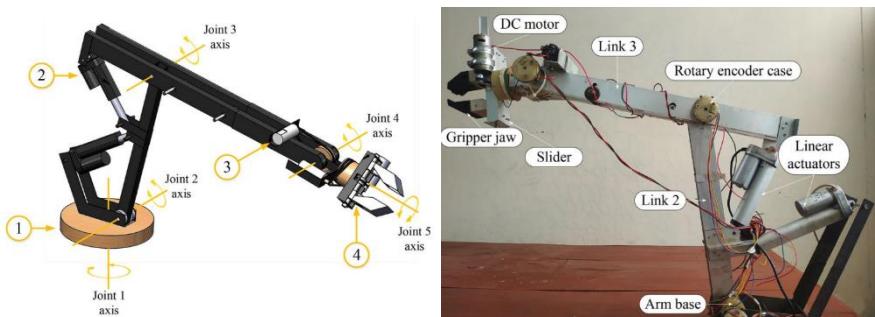


Figure 9: Bras robotique avec actionneurs linéaires et rotatifs (Fahim, 2020)

### Idées et solutions potentielles

Comme vu dans la section de la recherche documentaire, le projet est à caractère unique et il n'y a pas de solutions existantes sur le marché qui répond à notre problématique. Ainsi, cette section présente les idées et solutions que l'équipe propose pour répondre aux besoins du projet.

## Liste des idées pour la géométrie et configuration du bras

### **Idée 1 : Ovis avec des membrures plus longues**

L'idée 1 consiste à se baser sur la configuration actuelle de Ovis (bras robotique utilisé par le club CAPRA présentement) et d'améliorer la géométrie afin de respecter la contrainte de longueur de 1,8 mètre. La simplicité de la solution est un avantage. Il suffirait de changer les moteurs et membrures, mais le contrôle et la configuration du bras reste inchangée. Cependant, un désavantage à tenir en compte, est les bras de levier plus élevés causés par les grandes longueurs des membrures.

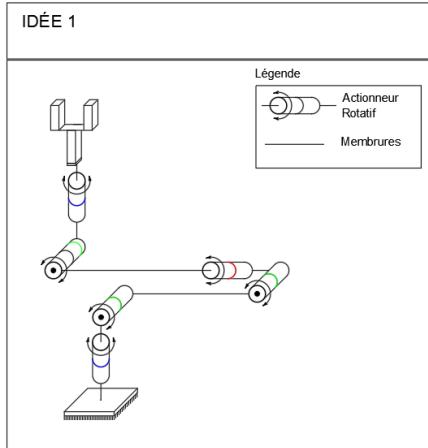


Figure 10: Ovis avec des membrures plus longues

### **Idée 2 : Différente géométrie (vers le haut)**

L'idée 2 présente une configuration différente de celle déjà existante. Comparativement à Ovis, cette solution possède une longue membrure entre le joint 1 et 2. Étant donné que le joint 1 fait seulement un mouvement de torsion sur le bras, avoir une longue membrure permet d'augmenter la longueur sans augmenter le bras de levier entre le joint 2 et le préhenseur. Cependant, la distance est seulement augmentée vers le haut et la portée vers l'avant est faible.

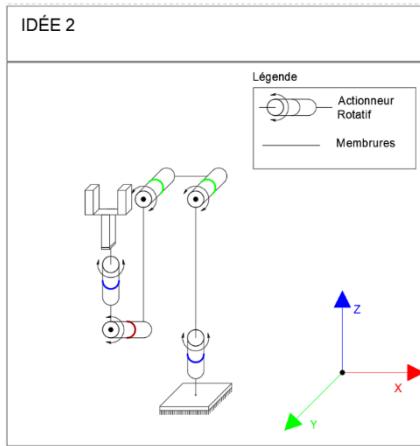


Figure 11: Ovis avec des membrures plus longues et vers le haut

### **Idée 3 : Ovis avec un joint prismatique**

L'idée 3 consiste à se baser sur la configuration actuelle de Ovis et d'y ajouter un joint prismatique (Tx) afin de respecter notre contrainte de longueur de 1,8 m. Un des avantages est qu'il permet au bras d'atteindre une grande

portée lorsque nécessaire sans agrandir le bras de levier dans la position fermée du joint. Cependant, cela amène de la complexité au niveau du contrôle étant donné que le bras devient redondant : il possède plus de 6 DDL.

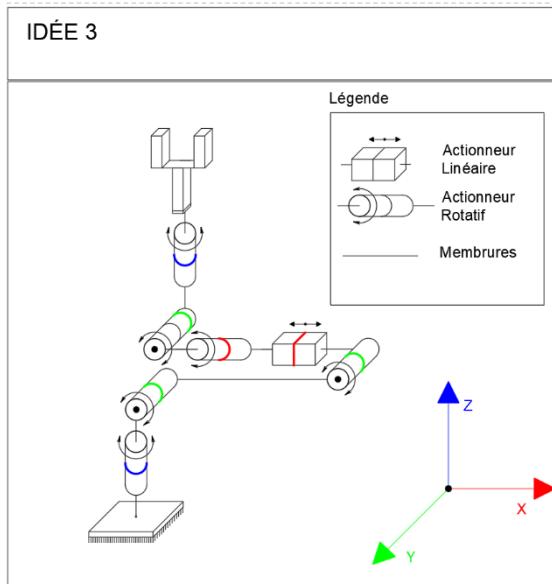


Figure 12: Configuration à 7 DDL

#### Idée 4 : Bras robotisé avec des actionneurs linéaires

Cette solution reprend le principe de deux des concepts de la recherche documentaire. En effet, quelques liaisons pivots sont réalisées par des actionneurs linéaires. Il est pertinent d'évaluer cette configuration avec les autres puisqu'elle apporte des avantages différents. Étant donné que les forces dans le bras sont majoritairement prises dans les actionneurs linéaires, cette configuration permet de soulever une charge plus grande qu'un bras avec seulement des actionneurs rotatifs. Toutefois, son désavantage primaire est sa petite enveloppe de travail. Les actionneurs linéaires limitent grandement l'enveloppe de travail possible du bras.

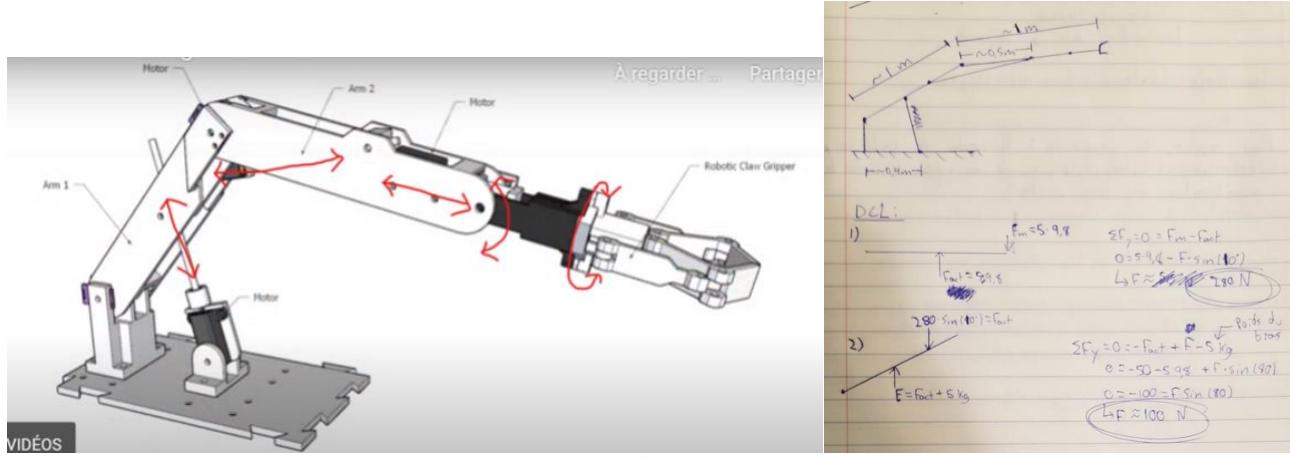


Figure 13: Bras robotisé avec des actionneurs linéaires

## Liste des idées pour les réducteurs rotatifs

### **Idée 1 : Réducteur à ondes de déformation (Harmonic drive)**

Les réducteurs à ondes de déformation comportent de nombreux avantages. Ils possèdent un rendement élevé, ils sont compacts et ont un haut taux de réduction en un seul étage (jusqu'à 1 : 160), ils n'ont aucun jeu d'engrenages, ils sont précis et ils sont très robustes. Leur principal désavantage concerne leur disponibilité. Ils sont moins disponibles que d'autres types d'actionneurs rotatifs sur le marché. Dernièrement, leur coût à l'achat tourne autour de 1 000 \$ (Rhéaume et al., 2009).



Figure 14: Réducteur à ondes de déformation (Harmonic drive)

### **Idée 2 : Réducteur cycloïde (Cycloïdal drive)**

Les réducteurs cycloïdes ont un couple nominal élevé, un encombrement réduit, un engrenage à faibles jeux, une rigidité et une précision élevée. Somme tout, il comporte les mêmes avantages que le réducteur à ondes de déformation malgré son fonctionnement différent. Le principal désavantage est qu'il est peu courant donc moins pas facile à se le procurer (peu de choix et peu disponible sur le marché). De plus, il est légèrement plus coûteux que le réducteur à onde de déformation.

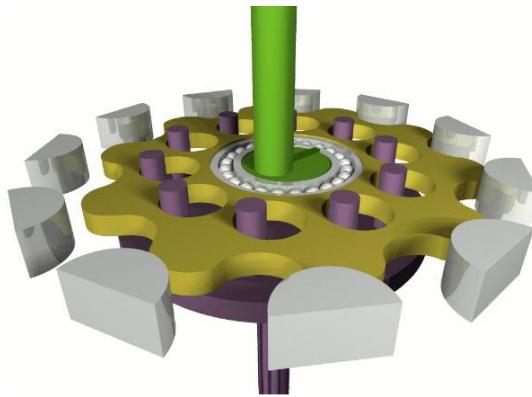


Figure 15: Réducteur cycloïde (Cycloid drive)

### **Idée 3 : Réducteur planétaire**

Les engrenages planétaires sont très utilisés en industries grâce à leurs avantages. Ils offrent un rendement élevé, considérant la compacité du système. En d'autres termes, le ratio rendement par rapport à l'espace occupé est élevé. De plus, ils possèdent une haute puissance volumique en fonction de leur bas prix. Toutefois, les inconvénients majeurs sont la conception élaborée, les pertes de puissances, le logement complexe des paliers et les jeux entre les dents des engrenages, ce qui diminue leur précision.

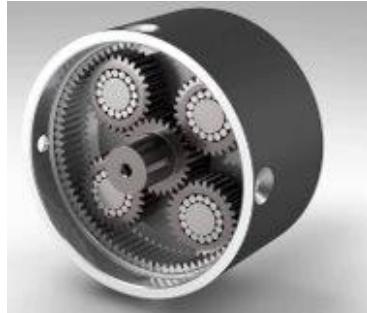


Figure 16: Réducteur planétaire

#### Idée 4 : Réducteur à engrenages

Les réducteurs à engrenages sont aussi très répandus pour des utilisations industrielles. Leur bas prix et la simplicité de la conception en fait un mécanisme de choix pour plein de situations. En revanche, ils ne sont pas compacts, il y a beaucoup de perte de puissance, il y a des jeux d'engrenages et le rendement est faible comparativement à d'autres systèmes décrits précédemment.



Figure 17: Réducteur à engrenages

#### Idée 5 : Réducteur à poulies

Encore une fois, le principal avantage de ce type de système est son bas prix. Outre cela, le câble utilisé dans le système agit avec un comportement élastique. Cela fait en sorte que son utilisation est non linéaire. Par conséquent, la précision est grandement affectée. De plus, l'équipe aurait à concevoir elle-même le système pour l'adapter à nos besoins et géométries spécifiques. La complexité du système rend la tâche ardue.

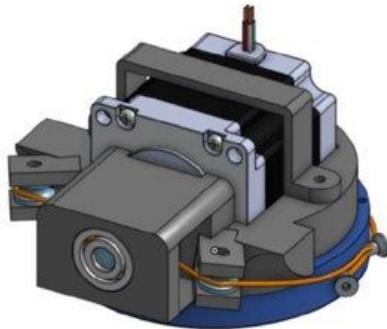


Figure 18: Réducteur à poulie

### Idée 6 : Réducteur à transmission infinie

Le principal avantage du réducteur de transmission infinie est de pouvoir faire varier le ratio de beaucoup. En effet, la conception de ce type de système permet de varier le ratio de réduction selon les besoins sans avoir à démonter le réducteur. Ainsi, tout comme les réducteurs à ondes déformables et à engrenages cycloïdales, il est compact. En revanche, il n'y a aucune transmission de ce type sur le marché déjà construit ce qui complexifie la tâche de conception.

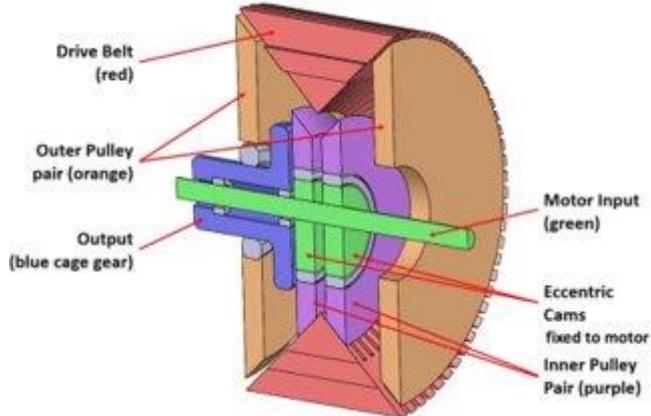


Figure 19: Réducteur à transmission infinie

### Idée 7 : Réducteur à engrenage sphérique

Cette dernière idée est un engrenage sphérique. Sa conception lui permet d'offrir deux degrés de liberté en un seul joint. Dans notre projet, cela signifie qu'il serait possible d'avoir moins d'actionneurs et d'avoir plus de degrés de liberté que de joints. Toutefois, cette transmission ne permet pas un couple très élevé et elle aurait un gros impact sur la cinématique du bras. Les déplacements offerts avec un engrenage sphérique ne sont pas avantageux pour notre usage. Dernièrement, cela est encore juste théorique. Aucun réducteur à engrenage sphérique n'est disponible physiquement.

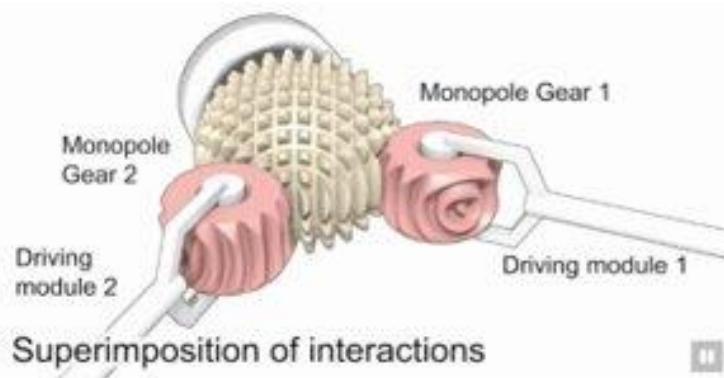


Figure 20: Réducteur à engrenage sphérique

## Liste des idées pour les actionneurs linéaires

### **Idée 1 : Actionneur linéaire électromagnétique**

Les avantages de ces actionneurs sont sa grande précision et sa rapidité de déplacement. L'actionneur permet d'avoir un contact sans frottement entre le rail et l'objet en mouvement. Cependant, l'inconvénient se trouve à être son poids et la force qu'il engendre étant donné le manque de réducteur de vitesse.

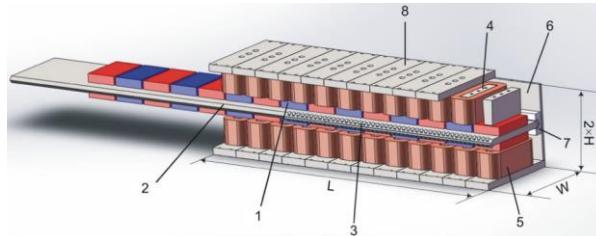


Figure 21: Actionneur linéaire magnétique

### **Idée 2 : Actionneur pneumatique**

L'actionneur linéaire pneumatique permet de bonne force mécanique, une bonne rigidité et son prix est assez bas. Cependant, il est peu précis et il y a une insécurité quant aux tuyaux. Il y a des chances que ceux-ci brisent puisque le bras robotisé sera utilisé dans des environnements hostiles. Si ce phénomène survient, le bras devient inutilisable à cause de la perte de pression engendrée.

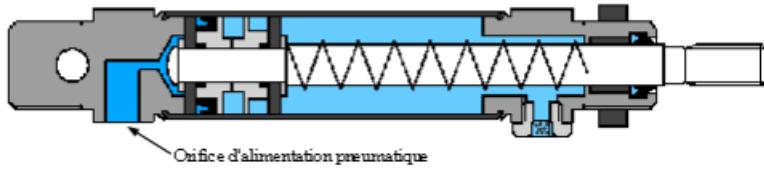


Figure 22: Actionneur pneumatique

### **Idée 3 : Actionneur à câble cylindrique**

Les avantages de l'actionneur à câble sont sa légèreté, sa compacité et le fait que le déplacement est possible sur la longueur entière du système. Malheureusement c'est aussi un désavantage. L'idée d'intégrer un joint prismatique au bras est pour diminuer le bras de levier en pouvant rétracter le bras. Ce mécanisme ne le permet pas. Aussi, le câble agit de manière élastique. Cela fait en sorte que son utilisation est non linéaire. Par conséquent, la précision est affectée.



Figure 23: Actionneur linéaire à câble

---

**Idée 4 : Vis à billes**

Les avantages de la vis à bille sont la précision de déplacement et de positionnement, le fonctionnement sans coups, l'excellente répétabilité, la vitesse de déplacement élevée, la faible usure, la durée de vie élevée et la puissance d'entraînement réduite. L'inconvénient est la longueur de la vis qui pourrait avoir des problèmes de fléchissement.



Figure 24: Actionneur linéaire à vis à bille

## **Sélection des solutions potentielles**

### **Évaluation des concepts retenus dans le barème d'évaluation**

Les solutions développées précédemment ont été évaluées dans le barème d'évaluation afin d'identifier celles qui conviendront le mieux aux besoins du promoteur. Les différents concepts sont notés entre 0 et 3 selon leur niveau de performance aux différentes spécifications techniques. Finalement, les cotes obtenues sont chacune multipliées par l'importance de la spécification technique à laquelle elles sont associées. Théoriquement, l'idée ayant le pointage le plus élevé est la gagnante.

Toutefois, l'équipe prévoit présenter deux solutions lors de la première revue de conception du vendredi 24 février 2023. L'objectif de cette première revue de conception est de définir la solution la plus prometteuse pour la suite du projet. Donc, l'équipe sélectionnera et détaillera les deux solutions ayant le meilleur pointage en fonction du barème d'évaluation.

Aussi, l'équipe juge que la conception d'un bras robotique peut se séparer en trois aspects. Les aspects sont les suivants : les actionneurs, la configuration et le matériau. Cependant, le matériau sera décidé plus tard dans la réalisation du projet lorsqu'on en connaît plus sur la géométrie, force et, etc. C'est pourquoi le barème d'évaluation initial a été séparé en deux barèmes d'évaluations. Chacun des barèmes est fait de sorte à évaluer que les spécifications techniques qui s'appliquent à cet aspect. Par exemple, le barème d'évaluation pour les actionneurs ne comprend que les spécifications techniques qui s'appliquent aux actionneurs et cela va de même pour les configurations. Ensuite, l'équipe va jumeler les aspects gagnants pour former deux solutions complètes de bras robotique.

## Choix du type de configuration

Tableau 2: Barème d'évaluation pour les configurations

Spécification	Barème d'évaluation pour les configurations						Idée 1	Idée 2	Idée 3	Idée 4			
	Objectif	Cible	Importance	Cote	Performance								
La distance à laquelle le préhenseur peut être utilisé (m)	↑	1,8	8,72%	3	≥ 2,0		2	2	3	3			
				2	[1,6; 2,0[								
				1	[1,2; 1,6[								
				0	< 1,2								
La longueur de la trajectoire linéaire possible (cm)	↑	50	8,72%	3	≥ 60		3	2	3	2			
				2	[40; 60[								
				1	[20; 40[								
				0	< 20								
				3	< 20 000		2	2	1	1			
Le coût de fabrication (\$ CAD)	↓	25 000	8,63%	2	[20 000; 30 000[								
				1	[30 000; 40 000[								
				0	≥ 40 000								
				3	< 8								
Le poids du bras (kg)	↓	10	7,05%	2	[8; 12[		2	2	2	2			
				1	[12; 16[								
				0	≥ 16								
				3	6								
Le nombre d'axes atteignables	↑	5	6,77%	2	5		3	3	3	1			
				1	4								
				0	≤ 3								
				3	≥ 7								
Le nombre de degrés de liberté du manipulateur	↑	6	5,84%	2	6		2	2	3	0			
				1	5								
				0	≤ 4								
Pointage total							14	13	15	9			
Pointage total en fonction de l'importance							1,07	1,07	1,13	0,82			

Selon la matrice de décision et l'évaluation des performances, les idées les plus adaptées sont les idées numéro 1 et 3. Elles sont toutes les deux basées sur Ovis. L'idée 1 comprend 6 DDL, mais avec des membrures plus longues tandis que l'idée 3 comporte 7 DDL, soit les mêmes qu'Ovis en plus d'un prismatique pour allonger la portée du préhenseur. Les deux solutions préliminaires gagnantes en fonction de la matrice de décision sont présentées à la figure 25.

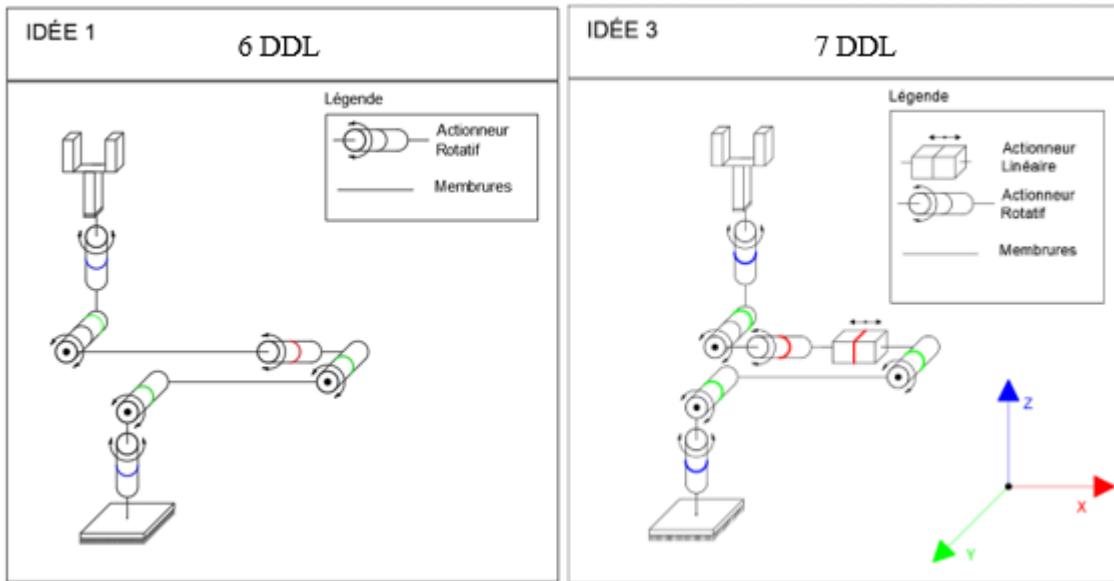


Figure 25: Solutions préliminaires gagnantes des configurations

## Choix du type d'actionneur

### Actionneurs rotatifs

Tableau 3: Barème d'évaluation pour les actionneurs rotatifs

Spécification	Objectif	Cible	Importance	Cote	Performance	Barème d'évaluation pour les actuateurs rotatifs							
						Idée 1	Idée 2	Idée 3	Idée 4	Idée 5			
Oscillation maximale du bras (mm)	↓	10	9,00%	3	< 5	3	3	2	2	1			
				2	[5; 15[								
				1	[15; 25[								
				0	≥ 25								
Le coût de fabrication (\$ CAD)	↓	25 000	8,63%	3	< 20 000	2	2	3	3	3			
				2	[20 000; 30 000[								
				1	[30 000; 40 000[								
				0	≥ 40 000								
Le poids du bras (kg)	↓	10	7,05%	3	< 8	2	2	3	1	3			
				2	[8; 12[								
				1	[12; 16[								
				0	≥ 16								
La précision du positionnement (mm)	↑	10	6,40%	3	< 5	3	3	2	1	1			
				2	[5; 15[								
				1	[15; 25[								
				0	≥ 25								
Le nombre de degrés de liberté du manipulateur	↑	6	5,84%	3	≥ 7	3	3	3	3	3			
				2	6								
				1	5								
				0	≤ 4								
La vitesse cartésienne linéaire du bras (cm/s)	↑	25	4,27%	3	≥ 30	3	3	3	3	3			
				2	[20; 30[								
				1	[10; 20[								
				0	≤ 10								
L'indice d'étanchéité du bras	↑	IP55	3,71%	3	≥ IP66	3	3	2	1	1			
				2	IP55								
				1	IP44								
				0	≤ IP33								
La charge qu'il peut soulever (kg)	↑	5	3,06%	3	≥ 5,5	3	3	2	2	2			
				2	[4,5; 5,5[								
				1	[3,5; 4,5[								
				0	< 3,5								
<b>Pointage total</b>						<b>22</b>	<b>22</b>	<b>20</b>	<b>16</b>	<b>17</b>			
<b>Pointage total en fonction de l'importance</b>						<b>1,182</b>	<b>1,182</b>	<b>1,2171</b>	<b>0,975</b>	<b>1,026</b>			

Selon la matrice de décision et l'évaluation des performances, les idées les plus adaptées sont les idées numéro 1 et 2. L'idée 1 est un réducteur à ondes de déformation communément appelé « Harmonic drive » en anglais. L'idée 2 est un réducteur cycloïde et partage sensiblement les mêmes caractéristiques que le réducteur à ondes de déformation. C'est pourquoi ils ont le même pointage dans le barème d'évaluation. Leur haut pointage provient des différents avantages qu'ils confèrent : aucun jeu d'engrenages, haut taux de réduction, compact et robustesse. Toutefois, leur coût est élevé et ils sont moins disponibles que d'autres types d'actionneurs rotatifs. La figure 26 présente les deux solutions préliminaires gagnantes.

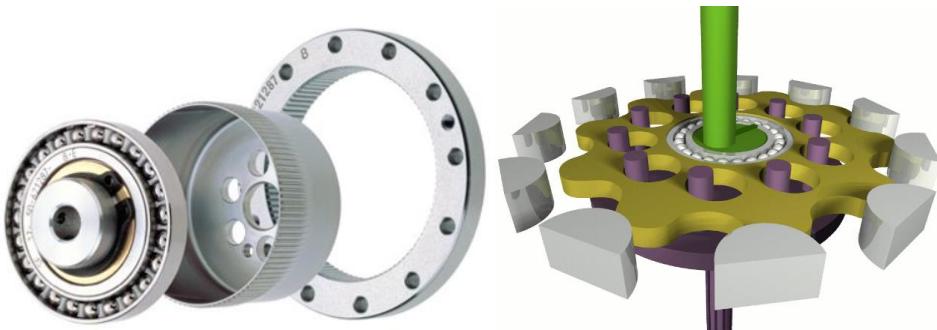


Figure 26: Solutions préliminaires gagnantes des réducteurs

## Actionneur linéaire

**Tableau 4: Barème d'évaluation pour les actionneurs linéaires**

Spécification	Objectif	Cible	Importance	Barème d'évaluation pour les actuateurs linéaires		Idée 1	Idée 2	Idée 3	Idée 4			
				Cote	Performance							
Oscillation maximale du bras (mm)	↓	10	9,00%	3	< 5	3	3	2	3			
				2	[5; 15[							
				1	[15; 25[							
				0	≥ 25							
Le coût de fabrication (\$ CAD)	↓	25 000	8,63%	3	< 20 000	3	3	3	3			
				2	[20 000; 30 000[							
				1	[30 000; 40 000[							
				0	≥ 40 000							
Le poids du bras (kg)	↓	10	7,05%	3	< 8	3	2	3	3			
				2	[8; 12[							
				1	[12; 16[							
				0	≥ 16							
La précision du positionnement (mm)	↑	10	6,40%	3	< 5	3	2	2	3			
				2	[5; 15[							
				1	[15; 25[							
				0	≥ 25							
Le nombre de degrés de liberté du manipulateur	↑	6	5,84%	3	≥ 7	3	3	3	3			
				2	6							
				1	5							
				0	≤ 4							
La vitesse cartésienne linéaire du bras (cm/s)	↑	25	4,27%	3	≥ 30	2	3	3	3			
				2	[20; 30[							
				1	[10; 20[							
				0	< 10							
L'indice d'étanchéité du bras	↑	IP65	3,71%	3	≥ IP66	3	3	3	3			
				2	IP65							
				1	IP44							
				0	≤ IP33							
La charge qu'il peut soulever (kg)	↑	5	3,06%	3	≥ 5,5	3	3	3	3			
				2	[4,5; 5,5[							
				1	[3,5; 4,5[							
				0	< 3,5							
<b>Pointage total</b>						<b>23</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>24</b>			
<b>Pointage total en fonction de l'importance</b>						1,3961	1,3043	1,2848	1,4388			

Selon la matrice de décision et l'évaluation des performances, présentée dans le tableau 4, l'idée la plus adaptée est la numéro 5 soit l'actionneur linéaire à vis à bille. Quant à eux, l'actionneur pneumatique et celui à câble cylindrique ne sont pas adaptés puisque leurs désavantages pour cette application sont trop significatifs. Notre projet demande de la précision et un espacement compact. Les deux solutions avec le meilleur pointage sont l'actionneur linéaire à vis à bille et l'actionneur linéaire. Les deux permettent une bonne précision tout en étant compactes. En revanche, la vis à bille à plus de potentiel que l'actionneur linéaire électromagnétique, basé sur la matrice de décision. C'est pourquoi ce dernier est le choix le plus approprié pour notre conception. La figure 27 présente un type d'actionneur linéaire à vis à bille.


**Figure 27: Solution gagnante de l'actionneur linéaire**

## Choix des moteurs

Le choix des actionneurs doit se baser sur les critères énumérés précédemment dans la partie de choix du type d'actionneur. Parmi ces critères, les actionneurs doivent permettre de faire passer les fils dans le bras, avoir une masse la plus faible possible, produire un couple suffisant et posséder un dispositif de frein au niveau des joints.

Pour faire un choix efficace, nous allons étudier différents actionneurs en utilisant la méthodologie suivante :

1. Déterminer l'ordre de grandeur du couple requis;
2. Étudier l'actionneur rotatif comme celui utilisé dans le bras actuel;
3. Étudier la possibilité d'assembler un actionneur nous-mêmes;
4. Trouver un autre type d'actionneur autre que celui utilisé sur le bras robot actuel.

### Déterminer l'ordre de grandeur du couple :

La première étape à laquelle l'équipe s'est attaquée est le choix du type de moteur. Le choix du bon type de moteur est essentiel puisque les moteurs se doivent d'être en mesure de supporter un certain couple en fonction de la charge utile, du poids du bras et de la longueur du bras. Ainsi, un calcul préliminaire sert à déterminer rapidement le couple ressenti au joint 2.

La figure 28 illustre la position du bras à laquelle le calcul de couple a été réalisé. Ce cas est évalué puisqu'il est le plus critique étant donné que le bras de levier est le plus grand.  $W_{\text{Bras}}$  est le poids du bras. La masse a été estimée à 8,5 kg puisque le bras doit être plus léger ou égal à 10 kg, mais une portion du poids du bras ne contribue pas au couple, soit la portion en dessous du joint 2, d'où le 8,5 kg au lieu de 10 kg.  $W_{\text{masse}}$  correspond au poids de la charge utile de 5 kg que le bras doit être en mesure de soulever.

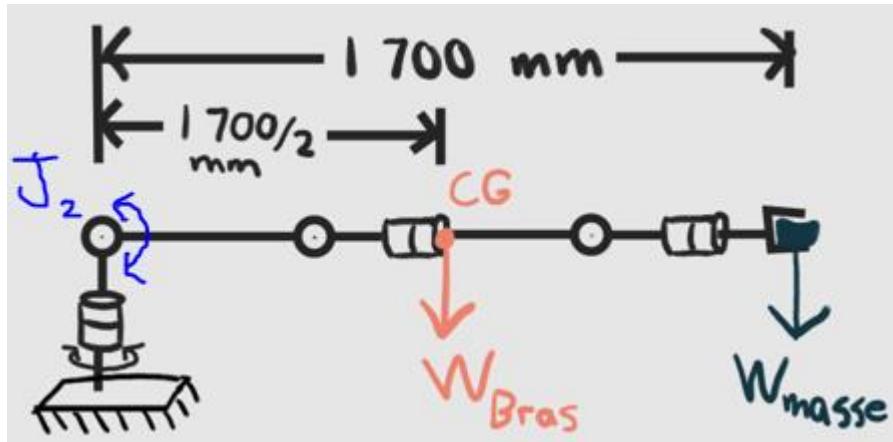


Figure 28: DCL préliminaire du joint 2 (J2)

$$T_2 = L_{\text{Tot}} * F_{\text{charge}} + L_{\text{cg}} * W_{\text{bras}}$$

$$T_2 = 1,7 \text{ (m)} * 5 \text{ (kg)} * 9,81 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) + \frac{1,7}{2} \text{ (m)} * 7,5 \text{ (kg)} * 9,81 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$T_2 \cong 146 \text{ Nm}$$

Le calcul préliminaire a permis de déterminer qu'il se peut que le couple au joint 2 atteigne 146 Nm. Donc, le type de moteur doit pouvoir offrir un couple encore plus grand que cette valeur.

### Actionneur rotatif Kinova (Actionneur actuel sur Ovis)

Les actionneurs qui sont dans le bras Ovis sont des actionneurs de Kinova de série KA-58 et KA-75. Il faut noter que les séries sont très limitées en couples.

Le couple maximum pour la série KA-58 est de 34 N.m et pour la série KA-75 est de 54 N.m. Avec les calculs de couple des joints que nous avons effectués, nous avons des joints qui ont des couples maximums d'environ 146 Nm, ce qui est supérieur de beaucoup à ce que la série KA-75 de Kinova permet. Pour cette raison, il est impossible d'utiliser les actionneurs rotatifs de la marque Kinova.

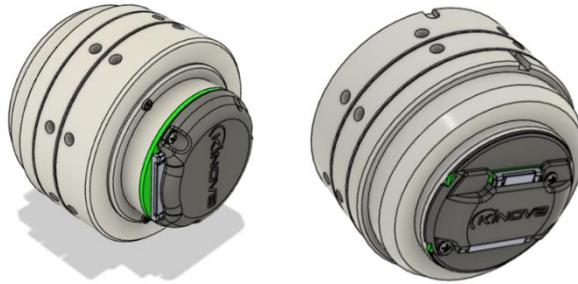


Figure 29: Série KA-58 et KA-75

### Actionneur rotatif à assembler

En fonction des spécifications techniques, chaque joint nécessite un moteur et réducteur à onde de déformation, un dispositif de frein et d'une bague collectrice pour faire passer les fils dans le bras. Ainsi, ces quatre composantes sont présentées dans le tableau suivant.

Il est possible de constater que si l'équipe avait à concevoir elle-même les actionneurs rotatifs, le bras dépasserait largement la masse admissible de 10 kg. Certes, les composantes ne sont pas optimisées selon nos spécifications, mais la masse individuelle de chaque composante est beaucoup trop lourde. À cette masse, la contrainte de poids serait dépassée avec seulement deux ou trois joints.

Tableau 5: Composants à assembler

<u>Moteur BLDC d'Exmek</u>	<u>Réducteur à ondes de déformation</u>	<u>Frein (ROBA -servostop Cobot)</u>	<u>Bague collectrice</u>
Modèle MB080FG200	Modèle 20	Modèle 8980.00_00	Modèle H80158
Masse : 2,54 kg	Masse : 1,5 kg	Masse : 0,34 kg (min)	Masse : 0,5 kg

Donc, il est préférable d'utiliser des actionneurs rotatifs déjà assemblés comportant les composantes requises intégrées.

### Autres types d'actionneurs rotatifs

Sur les différents actionneurs que nous avons trouvés, les séries eRob I et T de ZeroErr sont très compact, mince et précis. Ce type d'actionneur est composé de sept éléments :

1. Codeur absolu pour moteur;
2. Codeur absolu multitours pour arbre de sortie servomoteur;
3. Engrenage harmonique de précision;
4. Servomoteur;
5. Sonde de température;
6. Freins à friction et
7. Capteur de couple virtuel sur l'arbre de sortie.

Le couple maximum des séries eRob peut aller de 70 Nm à 1 180 Nm.

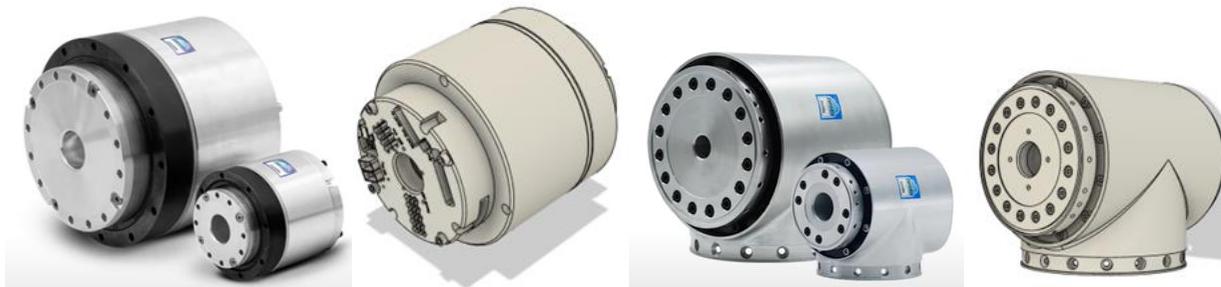


Figure 30: Série eRob I et T

### Choix de modèle d'actionneur rotatif

Après avoir étudié les différents types d'actionneurs, nous avons choisi les actionneurs de ZeroErr du fait qu'ils sont compacts, minces, précis et très complets (sept composants de base) et en plus ils possèdent des types de communications très populaires comme EtherCAT, CANOpen et/ou Modbus ce qui est essentiel pour la commande du bras robotique du club étudiant CAPRA.

Il existe deux types de série pour les moteurs de la compagnie ZeroErr. Il y a la série eRob I et la série eRob T. La série eRob T est plus adaptée pour un bras robot. C'est-à-dire que la géométrie de l'actionneur est faite en forme de « T » ce qui permet au joint de changer de direction. Quant à elle, la série I, l'entrée et la sortie sont dans le même axe. De plus, puisqu'elle nécessite plus de pièces, la série T est légèrement plus dispendieuse et lourde que la série I à puissance égale. La figure 31 présente les géométries des séries I et T.



Figure 31: Modèles choisis, eRob série I (gauche) et série T (droite)

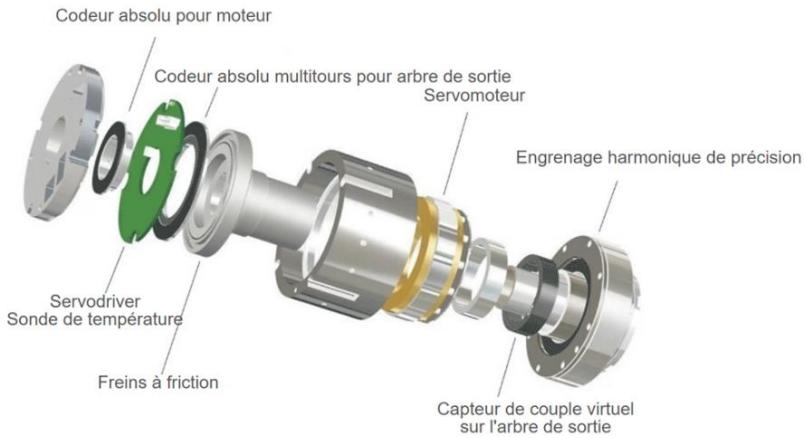


Figure 32: Détails série eRob I, et T

## Choix du préhenseur

Comme mentionné dans le cahier de charge, l'équipe se limite à la conception du bras robotisé. C'est-à-dire que l'équipe ne cherchera pas à concevoir un préhenseur. De plus, le promoteur a informé l'équipe que la conception du préhenseur sera le projet de session d'un étudiant lors de la session d'été 2023. Toutefois, afin d'offrir une solution complète au bras robotisé, un préhenseur issu de catalogues sera inclus dans le modèle 3D.

Le choix du préhenseur se base sur quelques contraintes. En effet, le préhenseur doit avoir une charge utile de 5 kg, être le plus léger possible, avoir la précision la plus élevée et idéalement communiquer en « Digital I/O ».

Le tableau 6 présente les préhenseurs potentiels trouvés lors de recherche :

Tableau 6: Choix du préhenseur

Modèle: Robotiq 2F-85		
Charge utile	5	kg
Masse	0,9	kg
Précision	0,4	mm
Communication	Modbus RTU (RS-485)	
Modèle: OnRobot RG2		
Charge utile	5	kg
Masse	0,78	kg
Précision	0,1	mm
Communication	Digital I/O	
Modèle: Robotis Hand RH-P12-RN		
Charge utile	5	kg
Masse	0,5	kg
Précision	n/a	mm
Communication	RS485 Asynchronous Serial	





Le meilleur choix pour notre application est le modèle OnRobot RG2. Ce préhenseur satisfait le plus de contraintes. Il est le seul à communiquer par « Digital I/O », il est le plus précis en plus d'avoir une masse respectable. Donc, le modèle de OnRobot est celui qui sera présenté avec la modélisation 3D finale.

## Modification au projet

Cette section fait part des modifications que l'équipe a eu besoin d'apporter au projet. En effet, un calcul préliminaire de couple statique au joint 2 a démontré qu'il est pratiquement impossible que le bras soit en mesure de soulever une charge de 5 kg et de posséder une masse inférieure ou égale à 10 kg. La figure 33 illustre la position du bras à laquelle le calcul de couple a été réalisé. Ce cas est évalué puisqu'il est le plus critique étant donné que le bras de levier est le plus grand.

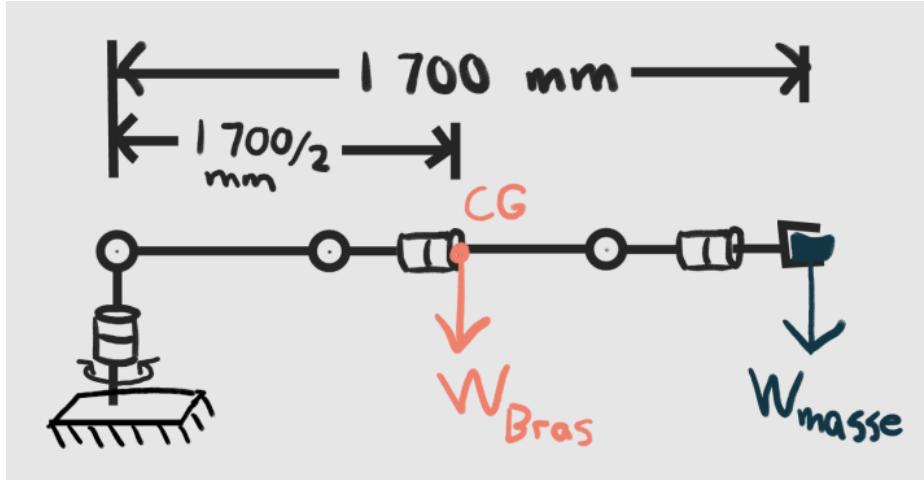


Figure 33: DCL préliminaire du joint 2 (J2)

$$T_2 = L_{Tot} * F_{charge} + L_{cg} * W_{bras}$$

$$T_2 = 1,7 \text{ (m)} * 5 \text{ (kg)} * 9,81 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) + \frac{1,7}{2} \text{ (m)} * 7,5 \text{ (kg)} * 9,81 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$T_2 \cong 146 \text{ Nm}$$

Selon ce calcul rapide, l'actionneur requis doit supporter un couple de 146 Nm. Or, parmi les modèles eRob, l'actionneur en mesure de supporter ce couple a une masse de 2,6 kg. Ainsi, un seul actionneur représente un peu plus que le quart de la masse admissible. Cette proportion est énorme surtout lorsqu'on considère que le bras aura 6 ou 7 actionneurs (selon la configuration gagnante), des membrures, un préhenseur et des masses parasites telles que des fils, des vis et autres. Alors, avant même de débuter une analyse plus approfondie, il est déjà certain que le poids excèdera 10 kg. De plus, le calcul ne prend pas en compte les forces dynamiques. Alors, il est fort probable que le couple ressenti par le moteur soit conséquemment plus élevé que 146 Nm.

Cette inquiétude a été présentée au promoteur du projet, qui est aussi un membre de l'équipe. Par la suite, il nous a mentionné qu'il était possible de changer la charge utile du bras à 2,2 kg (5 lb) plutôt que 5 kg. Dans le règlement officiel de la compétition à laquelle le club étudiant CAPRA a l'intention de participer, la charge à soulever n'est que de 2,2 kg (5 lb). Lors de la rédaction de « l'offre de projet », le promoteur avait fixé la charge à 5 kg dans le but d'avoir un bras robotisé plus performant que nécessaire. Toutefois, après avoir pris conscience de la contrainte de la masse limite de 10 kg et de l'ampleur du projet, il a accepté de ramener la charge utile à soulever à 2,2 kg.

De plus, le promoteur nous a transmis une autre information, qui, à ce jour, l'équipe ignorait. Le bras n'aura jamais à maintenir une charge de 2,2 kg dans le préhenseur lorsque le bras est en pleine extension. En d'autres mots, le bras doit être en mesure de soulever la charge de 2,2 kg lors de travail rapproché de la base. Alors, il y a deux méthodes d'utilisations du bras. Soit il est en extension et effectue du travail sans charge, soit il supporte une

charge rapprochée de la base en position plus ergonomique. La figure 34 et la figure 35 présentent ces positions d'utilisation du bras.

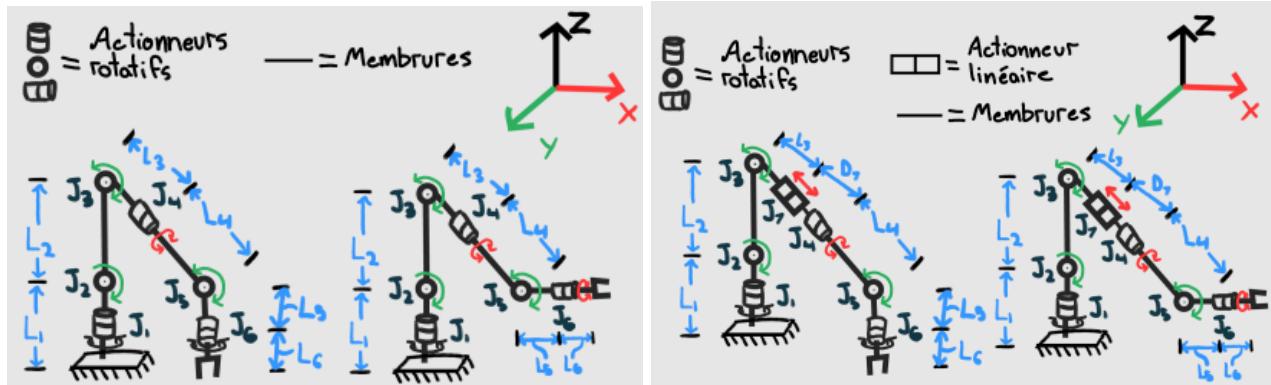


Figure 34: Position lors du soulevé de charge

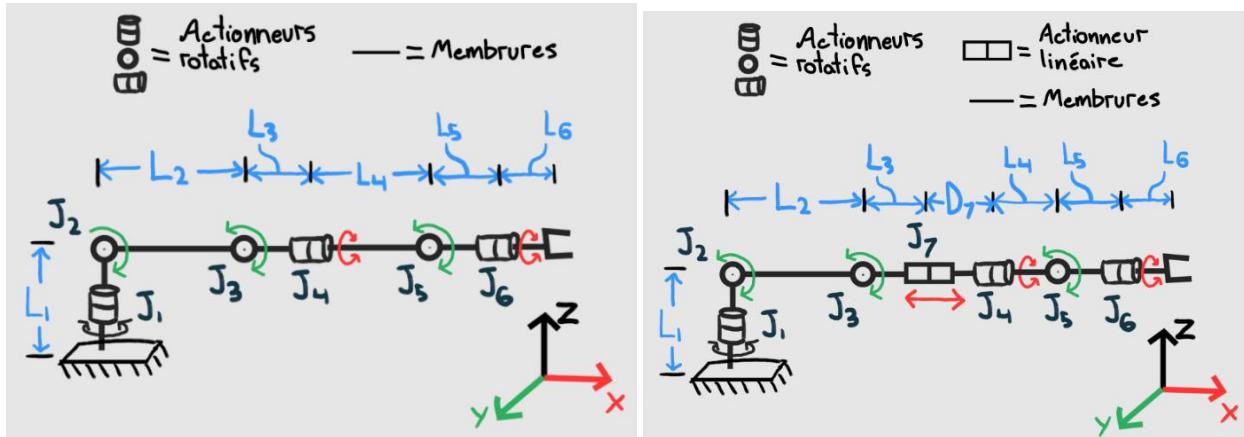


Figure 35: Position bras étendue

Au terme du projet, cette nouvelle veut dire que le dimensionnement des moteurs sera plus petit qu'il aurait été si le bras avait eu à soulever la charge de 2,2 kg en pleine extension puisqu'on retire du calcul une composante qui crée une portion importante du couple : la distance.

## **Sélection de la configuration gagnante**

Maintenant que le nombre de solutions a été réduit à deux pour les configurations et les actionneurs rotatifs, il est temps de comparer ces solutions à l'aide de calculs et d'analyses concrets. Cela permettra de déterminer la solution la plus adaptée à notre projet. Alors, les calculs et analyses serviront d'outils pour comparer les deux configurations tandis que les actionneurs rotatifs seront évalués plus tard à l'étape 4. Ainsi, la méthodologie utilisée pour déterminer la meilleure configuration est la suivante :

1. Créer un script Matlab pour calculer les couples aux moteurs en statique selon les variables des configurations.
2. À l'aide du code Matlab, réaliser une analyse statique pour déterminer l'impact de la masse et de la longueur des membrures en plus du poids des actionneurs sur les couples moteurs pour chaque configuration.
3. En fonction de cette analyse, déterminer les longueurs de membrures optimales pour chaque solution (6 et 7 DDL).
4. Calculer et évaluer les couples statiques aux moteurs à l'aide du choix préliminaire des moteurs.
5. Modéliser la configuration à 7 DDL du bras robotique à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D (SolidWorks) pour déterminer le poids et l'inertie des membrures.
6. Au besoin, réitérer les étapes 4 et 5.
7. Choix de la configuration!

Le choix des moteurs et des configurations est un processus itératif. C'est-à-dire qu'il se peut que l'équipe doive recommencer les étapes 4 et 5 plusieurs fois avant de trouver le dimensionnement des moteurs adéquat. En effet, chacune des étapes impact la suivante. Par exemple, le choix des moteurs (poids et couple nominal) impact le moment statique et dynamique qui à leur tour impact le choix des moteurs.

## Étape 1 : Création du code Matlab

Le script Matlab a été créé pour calculer le couple aux moteurs. Le script permet seulement de calculer les couples selon une analyse statique. En raison de cela, il suffit d'y entrer les paramètres d'entrées souhaités et les couples se calculent automatiquement. Les variables d'entrées sont la masse que le bras soulève, la géométrie du bras (longueurs et angles des membrures), la masse des membrures et la masse des actionneurs. Comme mentionné, le script retourne le couple ressenti à chaque moteur. Une copie du script se trouve à l'Annexe I.

De plus, le calcul des couples et le script Matlab se basent sur les DCL présentés figure 36 et figure 37. Les formules de couples sont détaillées à l'étape 4 soit « Étape 4, itération 1 : Calcul du couple et choix des moteurs ».

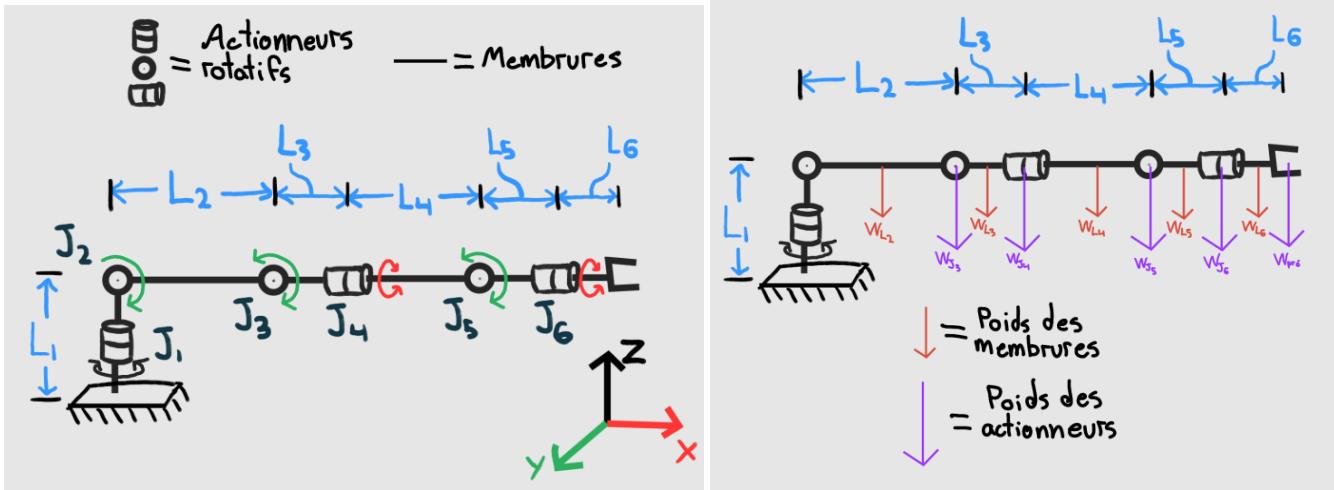


Figure 36: Représentation schématique et DCL de la configuration à 6 DDL

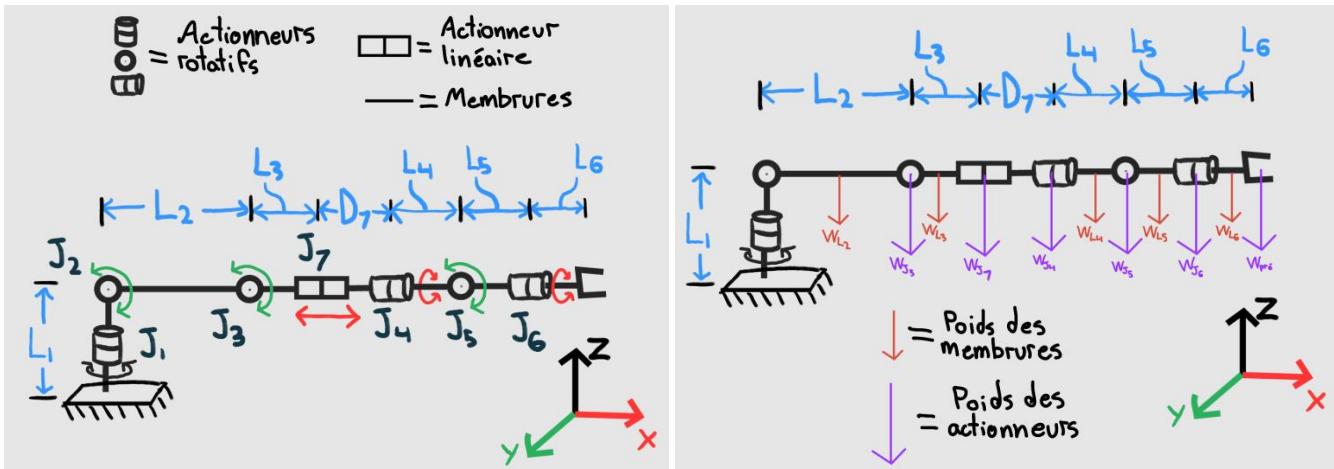


Figure 37: Représentation schématique et DCL de la configuration à 7 DDL

## Étape 2 : Analyse statique

L'analyse statique a été réalisée afin de déterminer la meilleure géométrie pour chaque configuration. Dans ce cas, le terme géométrie fait majoritairement référence aux longueurs des membrures du bras. Pour ce faire, les calculs ont été réalisés sur plusieurs itérations de longueurs différentes. Le critère utilisé pour déterminer la meilleure géométrie est le couple aux différents joints du bras. En effet, afin de faciliter le dimensionnement des composantes, il importe de minimiser les couples ressentis aux joints. En théorie, des couples plus faibles

permettent de dimensionner les composantes en conséquence et réduire le poids global du bras, ce qui est une des contraintes. La méthodologie utilisée pour y parvenir a été d'itérer plusieurs hypothèses de géométrie, constater l'impact de chacune et ajuster la géométrie en conséquence.

L'optimisation a été faite en prenant en compte le cas le plus critique, soit, la position du bras où les moments de forces sont les plus grands. Cela survient lorsque le bras est totalement allongé comme l'illustre la figure 38.

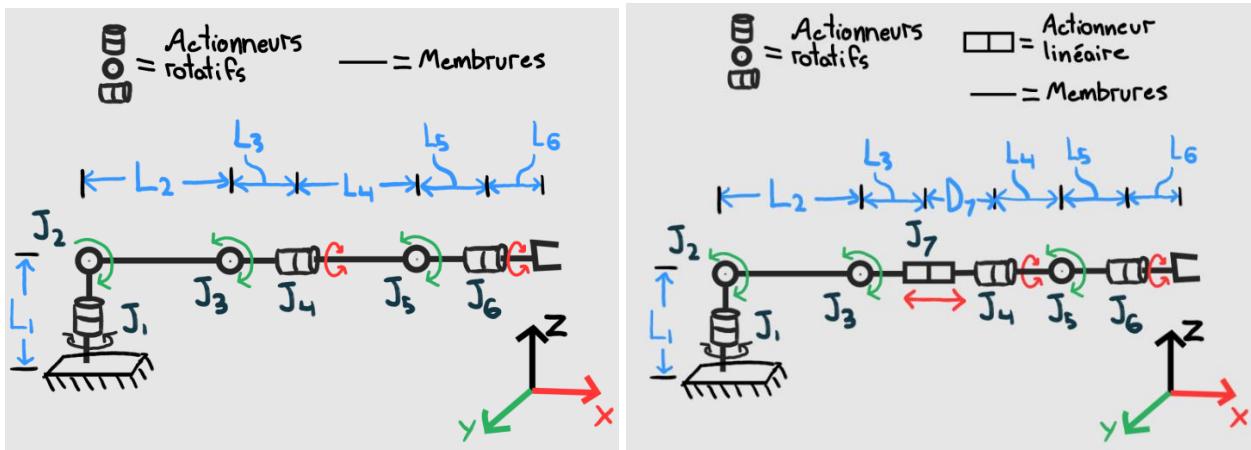


Figure 38: Position du bras à 6 et 7 DDL dans le cas critique

Tout d'abord, le calcul de couple aux moteurs tient compte des longueurs des membrures, du poids des membrures, du poids des actionneurs et de la charge dans le préhenseur. La méthode d'optimisation utilisée est la suivante : (1) déterminer l'impact du poids des membrures sur les couples aux moteurs de la configuration à 6 DDL, (2) déterminer l'impact du poids des actionneurs de la configuration à 6 DDL, (3) répéter l'étape 2 pour la configuration à 7 DDL et (4) tirer une conclusion.

Toutefois, il est important de noter que les résultats d'analyses ne représentent pas de vrais résultats de couple aux moteurs. Les résultats ont été trouvés à l'aide d'itérations simplifiées uniquement pour évaluer l'impact des différents paramètres.

### Impact du poids des membrures

D'abord, les six premières itérations ont été faites sur la configuration à 6 DDL en changeant le poids des membrures tout en prenant en compte que le poids des actionneurs était nul. Cela a permis de constater l'impact uniquement des membrures. De plus, pour être consistant dans les mesures, la longueur du bras était de 1,8 m et la totalité du poids des membrures était toujours de 10 kg répartis en fonction des longueurs des membrures. Puisque les tableaux d'analyses sont encombrants, ils sont présentés à l'Annexe II pour alléger la section.

Selon les résultats sans charge dans le préhenseur, le poids des membrures n'a presque pas d'incidence sur le couple maximal ressenti. En fonction des itérations, le couple le plus élevé est 88 481 N.mm tandis que le plus faible est de 85 641 N.mm. Cependant, plus on se rapproche du bout du bras, plus le poids des membrures a un impact. Par exemple, en se basant sur la figure 38, le joint 5 ressent moins de couples que le joint 2 étant donné le bras de levier plus court et la charge antérieure moins élevée, mais il est plus impacté par le changement de longueur et poids des membrures 5 et 6 que l'est le joint 2. La même conclusion est vraie lorsqu'il y a une charge dans le préhenseur.

En effet, comme en témoignent les itérations présentées dans le tableau 7, le joint 5 de l'itération #3 ressent un plus grand couple que le joint 5 de l'itération #5. De plus, les couples maximaux (T2) sont très proches malgré les géométries complètement différentes. Cela est valable aussi pour les autres itérations présentées en Annexe II.

**Tableau 7: Itérations 3 et 5 sur l'impact du poids des membrures**

Itération #3								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Isse actuate	Valeur	Unité
L1	100	mm	m_L1	1,94	kg	m_J1	0	kg
L2	360	mm	m_L2	1,94	kg	m_J2	0	kg
L3	360	mm	m_L3	1,94	kg	m_J3	0	kg
L4	360	mm	m_L4	1,94	kg	m_J4	0	kg
L5	360	mm	m_L5	1,94	kg	m_J5	0	kg
L6	360	mm	m_L6	1,94	kg	m_J6	0	kg

Itération #5								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Isse actuate	Valeur	Unité
L1	100	mm	m_L1	0,56	kg	m_J1	0	kg
L2	1500	mm	m_L2	8,33	kg	m_J2	0	kg
L3	100	mm	m_L3	0,56	kg	m_J3	0	kg
L4	100	mm	m_L4	0,56	kg	m_J4	0	kg
L5	0	mm	m_L5	0	kg	m_J5	0	kg
L6	100	mm	m_L6	0,56	kg	m_J6	0	kg

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur								
M=0 kg			M=5 kg					
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité
T6	3426	N.mm				T6	21084	N.mm
T5	13703	N.mm				T5	43019	N.mm
T4	30831	N.mm				T4	83805	N.mm
T3	54610	N.mm				T3	125442	N.mm
T2	85641	N.mm				T2	173931	N.mm
T1	85641	N.mm				T1	173931	N.mm

### Impact du poids des actionneurs pour la configuration à 6 DDL

Ensuite, les six itérations suivantes ont été faites sur la configuration à 6 DDL en changeant le poids des actionneurs tout en prenant en compte que le poids des membrures était nul. Cela a permis de constater uniquement l'impact des actionneurs indépendamment du reste. De plus, pour être consistant dans les mesures, la longueur du bras était de 1,8 m et la totalité du poids des actionneurs était toujours de 7 kg répartis en fonction des actionneurs qui prennent le plus de couples.

Dans ce cas, le poids des actionneurs joue un rôle plus important que celui des membrures sur le couple aux joints. Dépendamment des itérations et du poids, le couple maximal varie entre 27 713 N.mm et 59 105 N.mm. Respectivement, ceux-ci surviennent lorsque la membrure 2 de la figure 38 est la plus courte et la plus longue. Toutefois, dans le cas du 27 713 Nmm, le couple aux autres joints est le plus grand et à l'inverse il est le plus faible lorsque le couple maximal est de 59 105 Nmm. Ce qui vient d'être décrit est vrai aussi lorsqu'il y a une charge dans le préhenseur. Le tableau 8 présente ce qui vient d'être décrit et plus d'itérations peuvent être vues à l'Annexe III.

**Tableau 8: Itérations sur l'impact du poids des actionneurs sur la configuration à 6 DDL**

Itération #15								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Isse actuate	Valeur	Unité
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg
L2	100	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg
L3	100	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg
L4	1500	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg
L5	0	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1	kg
L6	100	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,5	kg

Itération #15								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Isse actuate	Valeur	Unité
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg
L2	1500	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg
L3	100	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg
L4	100	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg
L5	0	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1	kg
L6	100	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,5	kg

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur								
M=0 kg			M=5 kg					
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité
T6	0	N.mm				T6	4905	N.mm
T5	0	N.mm				T5	4905	N.mm
T4	22073	N.mm				T4	100553	N.mm
T3	24035	N.mm				T3	107420	N.mm
T2	27713	N.mm				T2	116003	N.mm
T1	27713	N.mm				T1	116003	N.mm

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur								
M=0 kg			M=5 kg					
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité
T6	0	N.mm				T6	4905	N.mm
T5	0	N.mm				T5	4905	N.mm
T4	1472	N.mm				T4	11282	N.mm
T3	3924	N.mm				T3	18633	N.mm
T2	59105	N.mm				T2	147395	N.mm
T1	59105	N.mm				T1	147395	N.mm

### Impact du poids des actionneurs pour la configuration à 7 DDL

Dernièrement, les cinq itérations suivantes ont été faites en changeant le poids des actionneurs tout en prenant en compte que le poids des membrures est nul, mais pour la configuration à 7 DDL. Cela a permis de constater l'impact des actionneurs uniquement pour cette nouvelle configuration. De plus, la longueur du bras varie en fonction de l'actionneur linéaire, mais est de 1,8 m au maximal. Aussi, la totalité du poids des actionneurs est de 8 kg répartis en fonction des actionneurs qui prennent le plus de couples. Le poids total est de 8 kg au lieu de 7 kg puisque pour la configuration à 7 DDL, un actionneur de plus est utilisé dans le bras.

Il est possible de tirer exactement la même conclusion que pour l'analyse précédente. En fonction de la géométrie, le couple maximal varie de beaucoup soit entre 34 090 N.mm et 53 710 N.mm lorsque l'actionneur linéaire est en position fermée et entre 38 995 N.mm et 57 389 N.mm lorsque l'actionneur linéaire est en extension complète. Toutefois, le couple aux autres joints est le plus élevé lorsque le couple maximal est le plus faible et vice versa. Encore une fois, ce phénomène est présenté au tableau 9 et plus de détail se trouve dans l'Annexe IV.

**Tableau 9: Itérations sur l'impact du poids des actionneurs sur la configuration à 7 DDL**

Configuration à 7 DDL - Itération #4								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Masse actuateurs	Valeur	
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg
L2	500	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg
L3	100	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg
L4	100	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg
L5	[400 800]	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1,25	kg
L6	0	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,75	kg
L7	300	mm	m_L7	0	kg	m_J7	0,5	kg

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actionneur linéaire fermé)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur		
M=0 kg	T7	0	N.mm	T7	14715	N.mm	T7	4905	N.mm
	T6	0	N.mm	T6	14715	N.mm	T6	4905	N.mm
	T5	4905	N.mm	T5	39240	N.mm	T5	23299	N.mm
	T4	7358	N.mm	T4	46598	N.mm	T4	23299	N.mm
	T3	10791	N.mm	T3	54936	N.mm	T3	31637	N.mm
	T2	34090	N.mm	T2	102760	N.mm	T2	127285	N.mm
	T1	34090	N.mm	T1	102760	N.mm	T1	127285	N.mm
Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actionneur linéaire ouvert)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur		
M=0 kg	T7	0	N.mm	T7	14715	N.mm	T7	1905	N.mm
	T6	0	N.mm	T6	14715	N.mm	T6	4905	N.mm
	T5	9810	N.mm	T5	63765	N.mm	T5	41693	N.mm
	T4	12263	N.mm	T4	71123	N.mm	T4	4693	N.mm
	T3	15696	N.mm	T3	79461	N.mm	T3	50031	N.mm
	T2	38995	N.mm	T2	127285	N.mm	T2	145679	N.mm
	T1	38995	N.mm	T1	127285	N.mm	T1	145679	N.mm

Configuration à 7 DDL - Itération #5								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Masse actuateurs	Valeur	
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg
L2	1000	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg
L3	100	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg
L4	0	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg
L5	[300 600]	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1,25	kg
L6	0	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,75	kg
L7	100	mm	m_L7	0	kg	m_J7	0,5	kg

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actionneur linéaire fermé)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur		
M=0 kg	T7	0	N.mm	T7	4905	N.mm	T7	1905	N.mm
	T6	0	N.mm	T6	4905	N.mm	T6	4905	N.mm
	T5	3679	N.mm	T5	23299	N.mm	T5	41693	N.mm
	T4	3679	N.mm	T4	23299	N.mm	T4	4693	N.mm
	T3	7112	N.mm	T3	31637	N.mm	T3	50031	N.mm
	T2	53710	N.mm	T2	127285	N.mm	T2	145679	N.mm
	T1	53710	N.mm	T1	127285	N.mm	T1	145679	N.mm
Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actionneur linéaire ouvert)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur		
M=0 kg	T7	0	N.mm	T7	1905	N.mm	T7	1905	N.mm
	T6	0	N.mm	T6	4905	N.mm	T6	4905	N.mm
	T5	7358	N.mm	T5	41693	N.mm	T5	41693	N.mm
	T4	7358	N.mm	T4	4693	N.mm	T4	4693	N.mm
	T3	10791	N.mm	T3	50031	N.mm	T3	50031	N.mm
	T2	57389	N.mm	T2	145679	N.mm	T2	145679	N.mm
	T1	57389	N.mm	T1	145679	N.mm	T1	145679	N.mm

### Étape 3 : Choix des configurations optimales

En conclusion, l'impact du poids des membrures sur le couple est plus faible que celui du poids des actionneurs quand vient le temps de déterminer les longueurs de membrures optimales. De plus, comme expliqué dans les analyses, plus le couple maximal est bas, plus le couple aux différents joints augmente. Pour cette raison, il importe de trouver la combinaison qui est le meilleur compromis entre le couple maximal le plus faible sans trop augmenter le couple ressenti aux autres joints dans le bras. En effet, les calculs réalisés sont uniquement théoriques et ne prennent pas en compte tous les phénomènes physiques. En réalité, plus le couple ressenti est grand, plus l'actionneur utilisé devra être robuste et ainsi lourd. Donc en réduisant le couple maximal, on diminue le poids d'un actionneur, mais celui des autres actionneurs augmente conséquemment puisque leur couple ressenti devient plus élevé.

Donc, en fonction des analyses réalisées et détaillées en annexe, les géométries qui permettent d'accomplir ce qui vient d'être décrit sont les suivantes :

Tableau 10: Géométrie optimale de la configuration à 6 DDL et 7 DDL

Spécification du bras - 6 DDL			Spécification du bras - 7 DDL		
Longueur	Valeur	Unité	Longueur	Valeur	Unité
L1	100	mm	L1	100	mm
L2	700	mm	L2	500	mm
L3	100	mm	L3	100	mm
L4	600	mm	D7	[400 700]	mm
L5	50	mm	L4	100	mm
L6	250	mm	L5	50	mm
			L6	250	mm

Dernièrement, il est important de noter que tous les joints ne prennent pas le couple de la même manière. En prenant la figure 39 comme référence, les joints 2, 3 et 5 supportent le couple de la bonne manière, c'est-à-dire dans le sens de leur rotation. Dans l'Annexe II, l'Annexe III et l'Annexe IV, ils sont surlignés en vert. Toutefois, les autres joints ne prennent pas le couple selon leur sens de rotation. Alors, ce n'est pas l'actionneur qui doit fournir le couple pour combattre celui ressenti, mais simplement la structure qui tient les actionneurs aux membrures.

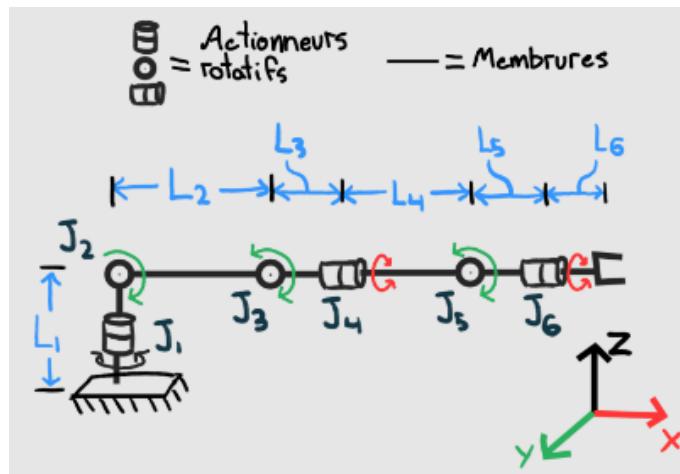


Figure 39: Schéma du bras robotique à 6 DDL

## Étape 4, itération 1 : Calcul du couple et choix des moteurs

À ce point, les longueurs des membrures théoriques sont connues. À partir de celles-ci, il est possible de calculer le couple engendré par les masses et de dimensionner les moteurs en conséquence. Pour y parvenir, l'analyse a été faite en commençant par l'extrémité, soit le préhenseur, jusqu'à la base du bras.

DCL du joint 6 :

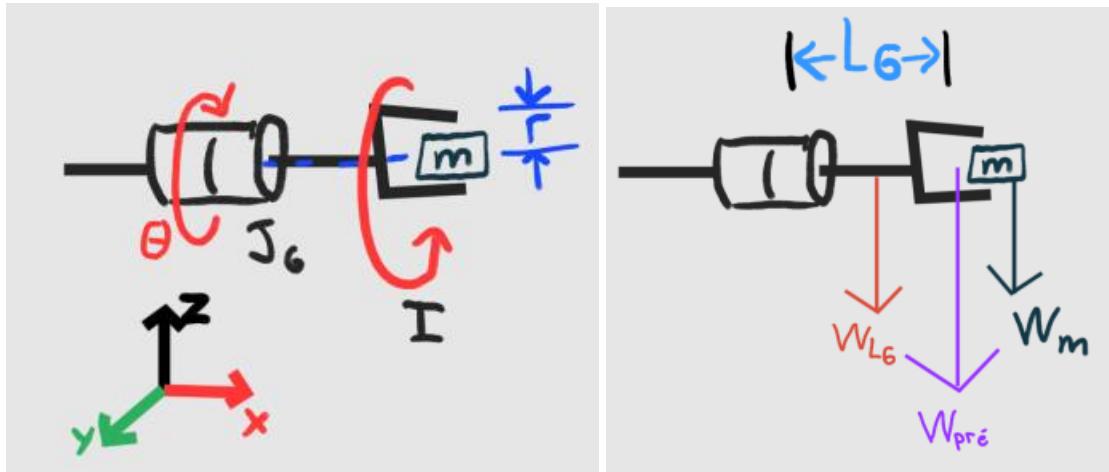


Figure 40: DCL pour le calcul de couple au joint 6

Le joint 6 tourne dans le même axe que le bras. En statique, le moteur ne ressent pas de couple, mais la structure du joint oui. Cependant, en mouvement, le moteur doit être en mesure de combattre le couple créé par l'inertie du préhenseur et de la masse de 2,2 kg. Les formules pour déterminer les couples au moteur sont les suivantes. Le rayon choisi est l'ouverture de la pince divisée par deux. En faisant cela, on tient compte d'un facteur de sécurité puisque le rayon moyen du préhenseur et de la masse est en réalité plus petit.

À ce stade-ci, le DCL du joint 6 est le même pour la configuration à 6 DDL et celle à 7 DDL.

$$T_{6,x} = (I + I_{mot}) * \alpha$$

$$T_{6,x} = \left( \frac{1}{2} * m_{tot} * r^2 + I_{mot} \right) * \frac{\omega_{mot}}{t_{acc}}$$

$$T_{6,x} = \left( \frac{1}{2} * (m_{pré} + m + m_{L6}) * r^2 + I_{mot} \right) * \frac{RPM * \frac{2 * \pi}{60}}{t_{acc}}$$

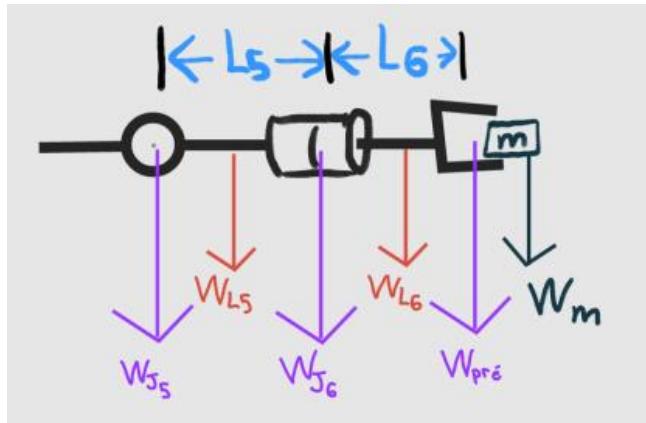
$$T_{6,y} = 9,81 * \left( (m_{pré} + m) * L_6 + m_{L6} * \frac{L_6}{2} \right)$$

**Tableau 11: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J6**

Itération #1						
Données			Calculs			
Moteur (J6)						
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités	
Modèle	eRob70HxxT	-	r (ouverture pince /2)	0,075	m	
Masse	1,24	kg	$\omega_{mot}$	6,28	rad/s	
Dimensions (ODxLxID)	73x99x18	mm	$t_{acc}$	0,25	s	
Couple Max	46	N.m	Masse	2,2	kg	
Couple Nominal	7	N.m	g	9,81	$m/s^2$	
Vitesse rot. Moteur	60	RPM	Axe X			
Inertie de rotor ( $I_m$ )	0,051	$kg \cdot m^2$	Couple au joint 6 ( $T_{6X}$ )	1,492	N.m	
Préhenseur			Couple admissible	7	N.m	
Variables	Valeurs	Unités	Axe Y			
Masse	0,78	kg	Couple ( $T_{6Y}$ )	7,31	N.m	
Dimensions (LxIxE)	213x149x36	mm				
Données bras						
Variables	Valeurs	Unités				
Masse membrure L6 ( $m_{L6}$ )	0	kg				
Longueur membrure L6 ( $L_6$ )	0,25	m				

Le calcul de couple  $T_{6X}$  a été réalisé en faisant accélérer le moteur à sa vitesse de rotation de 60 RPM en 0,25 seconde. Cela donne un couple de 0,211 Nm ressenti au moteur lors de l'accélération. Le moteur choisi permet 7 Nm. Alors, le dimensionnement est largement au-dessus des besoins. Toutefois, c'est le moteur le plus faible de la série eRob alors qu'il n'est pas possible d'en sélectionner un plus petit. Un couple de 7,31 Nm est aussi calculé, mais dans la direction Y, alors c'est la structure du moteur qui ressent ce couple.

#### DCL du joint 5 :


**Figure 41: DCL pour le calcul de couple au joint 5**

Le couple ressenti au joint 5 est aussi le même pour les configurations à 6 et 7 DDL et se calcule par la formule suivante :

$$T_5 = (W_{pre} + W) * (L_6 + L_5) + W_{L6} * \left( \frac{L_6}{2} + L_5 \right) + W_{J6} * L_5 + W_{L5} * \frac{L_5}{2}$$

$$T_5 = 9,81 * \left( (m_{pre} + m) * (L_6 + L_5) + m_{L6} * \left( \frac{L_6}{2} + L_5 \right) + m_{J6} * L_5 + m_{L5} * \frac{L_5}{2} \right)$$

Tableau 12: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J5

Itération #1					
Données			Calculs		
Moteur (J5)					
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
Modèle	eRob70HxxT	-	r (ouverture pince /2)	0,075	m
Masse	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Dimensions (ODxLxID)	73x99x18	mm	$t_{acc}$	0,25	s
Couple Max	61	N.m	Masse	2,2	kg
Couple Nominal	10	N.m	g	9,81	$m/s^2$
Vitesse rot. Moteur	37,5	RPM	Axe Y		
Inertie de rotor ( $I_m$ )	0	$kg \cdot m^2$	Couple au joint 5 ( $T_5$ )	9,38	N.m
Préhenseur			Couple admissible	61	N.m
Variables	Valeurs	Unités			
Masse	0,78	kg			
Dimensions (LxIxE)	213x149x36	mm			
Données bras					
Variables	Valeurs	Unités			
Masse membrure L6 ( $m_{L6}$ )	0	kg			
Longueur membrure L6 ( $L_6$ )	0,25	m			
Masse actionneur joint J6 ( $m_{J6}$ )	1,24	kg			
Masse membrure L5 ( $m_{L5}$ )	0	kg			
Longueur membrure L5 ( $L_5$ )	0,05	m			

Dans cette configuration, le couple ressenti au moteur est de 9,38 Nm. Le moteur sélectionné pour ce joint a un couple admissible de 61 Nm avec un couple nominal de 10 Nm. Encore une fois, 61 Nm est beaucoup plus grand que 9,38 Nm, mais c'était le moteur le plus près de cette valeur sans être en dessous du couple requis.

#### DCL du joint 4 :

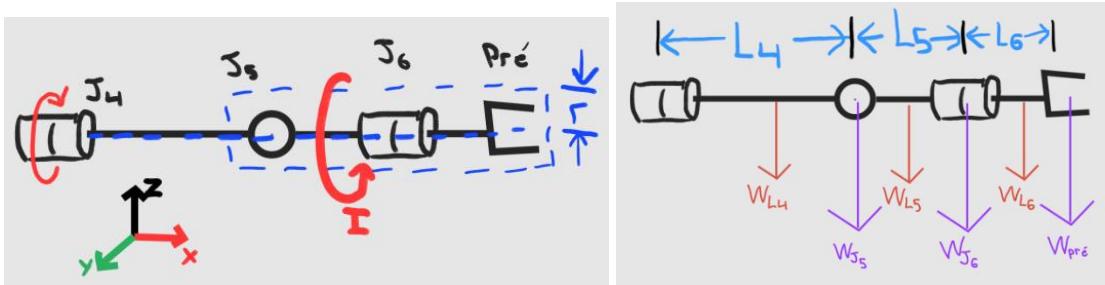


Figure 42: DCL pour le calcul de couple au joint 4

Le joint 4 tourne dans le même axe que le bras. En statique, le moteur ne ressent pas de couple, mais la structure du joint oui. Cependant, en mouvement, le moteur doit être en mesure de combattre le couple créé par l'inertie de la partie en amont du bras. Le rayon choisi est celui du diamètre de l'actionneur divisé par deux. En faisant cela, on tient compte d'un facteur de sécurité puisque le rayon moyen du bras est légèrement plus petit.

Le couple  $T_{4Y}$  diffère selon en fonction des configurations à 6 DDL et 7 DDL. Les formules pour déterminer les couples au moteur sont les suivantes.

$$T_{4,x} = (I + I_{mot}) * \alpha$$

$$T_{4,x} = (\frac{1}{2} * m_{tot} * r^2 + I_{mot}) * \omega_{mot} * t_{acc}$$

$$T_{4,x} = (\frac{1}{2} * (m_{pré} + m + m_{L6} + m_{J6} + m_{L5} + m_{J5} + m_{L4}) * r^2 + I_{mot}) * \omega_{mot} * t_{acc}$$

$$T_{4,y} = 9,81 * ((m_{pré} + m) * (L_6 + L_5 + L_4) + m_{L6} * \left(\frac{L_6}{2} + L_5 + L_4\right) + m_{J6} * (L_5 + L_4) + m_{L5} * \left(\frac{L_5}{2} + L_4\right) + m_{J5} * L_4 + m_{L4} * \frac{L_4}{2})$$

Tableau 13: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J4

Itération #1						
Données			Calculs			
Moteur (J4)						
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités	
Modèle	eRob70HxxI	-	r (Ø moteur /2)	0,0365	m	
Masse	0,93	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s	
Dimensions (ODxLxID)	73x99x18	mm	$t_{acc}$	0,25	s	
Couple Max	61	N.m	Masse	2,2	kg	
Couple Nominal	10	N.m	g	9,81	m/s <sup>2</sup>	
Vitesse rot. Moteur	37,5	RPM	Axe X			
Inertie de rotor (I <sub>m</sub> )	0,051	kg*m <sup>2</sup>	Couple au joint 4 (T <sub>4X</sub> )	0,858	N.m	
Préhenseur				Couple admissible	10	N.m
Variables	Valeurs	Unités	Axe Y			
Masse	0,78	kg	Couple (T <sub>4Y</sub> ) (6 DDL)	41,51592	N.m	
Dimensions (LxIxE)	213x149x36	mm	Couple (T <sub>4Y</sub> ) (7 DDL)	14,73462	N.m	
Données bras						
Variables	Valeurs	Unités				
Masse membrure L6 (m <sub>L6</sub> )	0	kg				
Longueur membrure L6 (L <sub>6</sub> )	0,25	m				
Masse actionneur joint J6 (m <sub>J6</sub> )	1,24	kg				
Masse membrure L5 (m <sub>L5</sub> )	0	kg				
Longueur membrure L5 (L <sub>5</sub> )	0,05	m				
Masse actionneur joint J5 (m <sub>J5</sub> )	1,24	kg				
Masse membrure L4 (L <sub>4</sub> )	0	kg				
Longueur membrure L4 (L <sub>4</sub> ) (6 DDL)	0,6	m				
Longueur membrure L4 (L <sub>4</sub> ) (7 DDL)	0,1	m				

Peu importe la configuration, le couple ressenti dans l'axe de rotation est de 0,858 Nm. Ainsi, le moteur est largement capable de fournir ce couple. Toutefois, le couple dans l'axe Y est différent selon la configuration, du fait des longueurs différentes. Ainsi, pour la configuration à 6 DDL il est de 41,5 Nm tandis qu'il est de 14,7 Nm à 7 DDL.

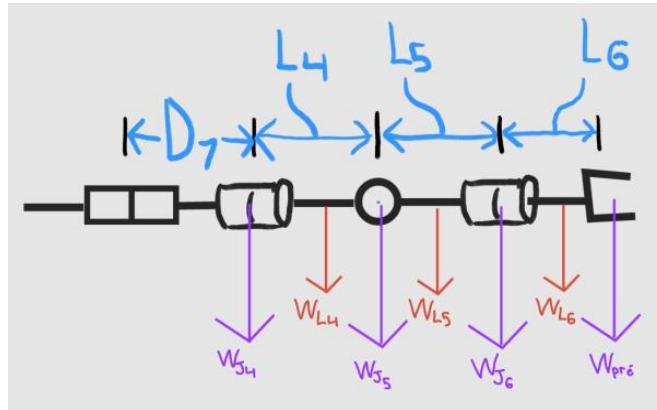
DCL du joint 7 :


Figure 43: DCL pour le calcul de couple au joint 7

Le couple ressenti par l'actionneur du joint 7 est dicté par la formule suivante. La masse à soulever n'est pas prise en compte puisqu'en fonction du mode d'opération du bras robotique, jamais il n'aura à tenir une charge lorsqu'il est en extension.

À noter aussi que le joint linéaire n'est présent que pour la configuration à 7 DDL.

$$T_7 = W_{\text{pré}} * (L_6 + L_5 + L_4 + D_7) + W_{L6} * \left( \frac{L_6}{2} + L_5 + L_4 + D_7 \right) + W_{J6} * (L_5 + L_4 + D_7) + W_{L5} * \left( \frac{L_5}{2} + L_4 + D_7 \right) + W_{J5} * (L_4 + D_7) + W_{L4} * \left( \frac{L_4}{2} + D_7 \right) + W_{J4} * D_7$$

Tableau 14: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J7

Itération #1					
Données			Moteur (J7)		
Préhenseur			Variables		
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
Masse	0,78	kg	Actionneur linéaire: Pas abordé dans cette section		
Dimensions (LxIxE)	213x149x36	mm			
Données bras					
Variables	Valeurs	Unités			
Masse membrure L6 ( $m_{L6}$ )	0	kg			
Longueur membrure L6 ( $L_6$ )	0,25	m			
Masse actionneur joint J6 ( $m_{J6}$ )	1,24	kg	Calculs		
Masse membrure L5 ( $m_{L5}$ )	0	kg	Variables	Valeurs	Unités
Longueur membrure L5 ( $L_5$ )	0,05	m	$\omega_{\text{mot}}$	0,00	rad/s
Masse actionneur joint J5 ( $m_{J5}$ )	1,24	kg	$t_{\text{acc}}$	0,25	s
Masse membrure L4 ( $L_4$ )	0	kg	Masse	0	kg
Longueur membrure L4 ( $L_4$ )	0,1	m	g	9,81	$\text{m/s}^2$
Masse actionneur joint J4 ( $m_{J4}$ )	0,93	kg	Axe Y		
Masse actionneur J7 ( $m_{J7}$ )	1,75	kg	Couple au joint J7 ( $T_7$ ) avec $D_7=0,4\text{m}$	25,977	N.m
Longueur actionneur D7 ( $D_7$ )	0,4	m	Couple au joint J7 ( $T_7$ ) avec $D_7=0,7\text{m}$	40,883	N.m
Longueur actionneur D7 ( $D_7$ )	0,7	m			

Dépendamment de l'extension de l'actionneur linéaire, le couple ressenti varie entre 26 Nm à 41 Nm. Alors, il est important de s'assurer que la structure de l'actionneur puisse résister à ces couples.

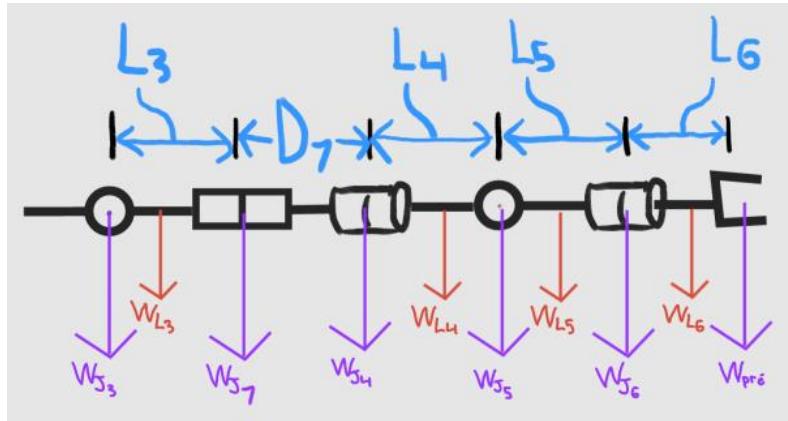
DCL du joint 3 :


Figure 44: DCL pour le calcul de couple au joint 3

Le couple ressenti par l'actionneur du joint 3 est dicté par la formule suivante. La masse à soulever n'est pas prise en compte pour la même raison que précédemment. En mode d'opération, jamais le bras n'aura à tourner ce joint avec une masse dans le préhenseur. De plus, la masse de l'actionneur linéaire a été estimée à 1,75 kg. Celui-ci n'a pas encore été abordé, mais l'équipe ne croit pas qu'il dépassera 1,75 kg. Alors, cela prend en compte un certain facteur de sécurité.

Le couple va varier selon la configuration puisque les longueurs de membrures sont différentes. Les couples se calculent selon les formules suivantes :

$$T_3 \text{ (6 DDL)} = W_{\text{pré}} * (L_6 + L_5 + L_4 + L_3) + W_{L6} * \left( \frac{L_6}{2} + L_5 + L_4 + L_3 \right) + W_{J6} * (L_5 + L_4 + L_3) + W_{L5} * \left( \frac{L_5}{2} + L_4 + L_3 \right) + W_{J5} * (L_4 + L_3) + W_{L4} * \left( \frac{L_4}{2} + L_3 \right) + W_{J4} * (L_3) + W_{L3} * \frac{L_3}{2}$$

$$T_3 \text{ (7 DDL)} = W_{\text{pré}} * (L_6 + L_5 + L_4 + D_7 + L_3) + W_{L6} * \left( \frac{L_6}{2} + L_5 + L_4 + D_7 + L_3 \right) + W_{J6} * (L_5 + L_4 + D_7 + L_3) + W_{L5} * \left( \frac{L_5}{2} + L_4 + D_7 + L_3 \right) + W_{J5} * (L_4 + D_7 + L_3) + W_{L4} * \left( \frac{L_4}{2} + D_7 + L_3 \right) + W_{J4} * (D_7 + L_3) + W_{J7} * \left( \frac{D_7}{2} + L_3 \right) + W_{L3} * \frac{L_3}{2}$$

Tableau 15: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J3

Itération #1					
Préhenseur			Moteur (J3)		
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
Masse	0,78	kg	Modèle	eRob80HxxT	-
Dimensions (LxIxE)	213x149x36	mm	Masse	1,94	kg
Données bras			Dimensions (ODxLxID)	85x111,8x18	mm
Variables	Valeurs	Unités	Couple Max	143	N.m
Masse membrure L6 ( $m_{L6}$ )	0	kg	Couple Nominal	31	N.m
Longueur membrure L6 ( $L_6$ )	0,25	m	Vitesse rot. Moteur	30	RPM
Masse actionneur joint J6 ( $m_{J6}$ )	1,24	kg	Inertie de rotor ( $I_m$ )	0,071	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Masse membrure L5 ( $m_{L5}$ )	0	kg	Calculs		
Longueur membrure L5 ( $L_5$ )	0,05	m	Variables	Valeurs	Unités
Masse actionneur joint J5 ( $m_{J5}$ )	1,24	kg	$\omega_{\text{mot}}$	3,14	rad/s
Masse membrure L4 ( $L_4$ )	0	kg	$t_{\text{acc}}$	0,25	s
Longueur membrure L4 ( $L_4$ ) (6 DDL)	0,6	m	Masse	0	kg
Longueur membrure L4 ( $L_4$ ) (7 DDL)	0,1	m	g	9,81	$\text{m/s}^2$
Masse actionneur joint J4 ( $m_{J4}$ )	0,93	kg	Axe Y		
Masse actionneur J7 ( $m_{J7}$ )	1,75	kg	Couple au joint 3 ( $T_3$ ) (6 DDL)	26,20	N.m
Longueur actionneur D7 ( $D_7$ )	0,4	m	Couple au joint 3 ( $T_3$ ) avec $D_7=0,4\text{m}$ (7 DDL)	31,80	N.m
Longueur actionneur D7 ( $D_7$ )	0,7	m	Couple au joint 3 ( $T_3$ ) avec $D_7=0,7\text{m}$ (7 DDL)	46,71	N.m
Masse membrure J3 ( $m_{J3}$ )	0	kg	Couple admissible	143	N.m
Longueur membrure L3 ( $L_3$ )	0,1	m			

En observant le tableau 15, il est observable que les couples calculés sont beaucoup moins élevés que celui admissible. Donc, le moteur fournit un couple suffisant pour son utilisation. Cela est vrai pour les deux configurations. Un moteur aussi puissant a été choisi puisque c'est celui le plus proche sans être en dessous du couple calculé.

#### DCL du joint 2 :

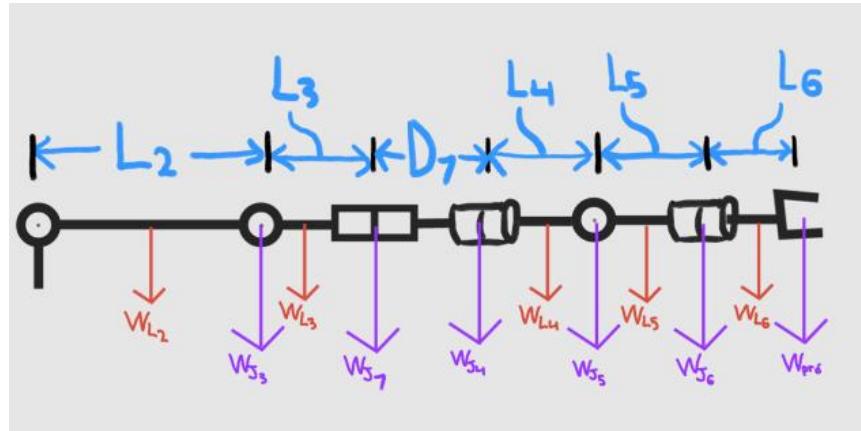


Figure 45: DCL pour le calcul de couple au joint 2

Le couple ressenti par l'actionneur du joint 2 est dicté par la formule suivante. La masse à soulever n'est pas prise en compte puisqu'en fonction du mode d'opération du bras robotique, jamais il n'aura à tourner ce joint avec une masse dans le préhenseur. Encore une fois, le couple varie en fonction de la configuration.

$$T_2 (6 DDL) = W_{pré} * (L_6 + L_5 + L_4 + L_3 + L_2) + W_{L6} * \left( \frac{L_6}{2} + L_5 + L_4 + L_3 + L_2 \right) + W_{J6} \\ * (L_5 + L_4 + L_3 + L_2) + W_{L5} * \left( \frac{L_5}{2} + L_4 + L_3 + L_2 \right) + W_{J5} * (L_4 + L_3 + L_2) + W_{L4} \\ * \left( \frac{L_4}{2} + L_3 + L_2 \right) + W_{J4} * (L_3 + L_2) + W_{L3} * \left( \frac{L_3}{2} + L_2 \right) + W_{J3} * L_2 + W_{L2} + \frac{L_2}{2}$$

$$T_2 (7 DDL) = W_{pré} * (L_6 + L_5 + L_4 + D_7 + L_3 + L_2) + W_{L6} * \left( \frac{L_6}{2} + L_5 + L_4 + D_7 + L_3 + L_2 \right) + W_{J6} \\ * (L_5 + L_4 + D_7 + L_3 + L_2) + W_{L5} * \left( \frac{L_5}{2} + L_4 + D_7 + L_3 + L_2 \right) + W_{J5} * (L_4 + D_7 + L_3 + L_2) \\ + W_{L4} * \left( \frac{L_4}{2} + D_7 + L_3 + L_2 \right) + W_{J4} * (D_7 + L_3 + L_2) + W_{J7} * \left( \frac{D_7}{2} + L_3 + L_2 \right) + W_{L3} \\ * \left( \frac{L_3}{2} + L_2 \right) + W_{J3} * L_2 + W_{L2} + \frac{L_2}{2}$$

Tableau 16: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J2

Itération #1					
Préhenseur			Moteur (J2)		
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
Masse	0,78	kg	Modèle	eRob80HxxT	-
Dimensions (LxIxE)	213x149x36	mm	Masse	1,94	kg
Données bras			Dimensions (ODxLxID)	85x111,8x18	mm
Variables			Couple Max	143	N.m
Masse membrure L6 ( $m_{L6}$ )	0	kg	Couple Nominal	31	N.m
Longueur membrure L6 ( $L_6$ )	0,25	m	Vitesse rot. Moteur	30	RPM
Masse actionneur joint J6 ( $m_{J6}$ )	1,24	kg	Inertie de rotor ( $I_m$ )	0,071	kg*m <sup>2</sup>
Masse membrure L5 ( $m_{L5}$ )	0	kg	Calculs		
Longueur membrure L5 ( $L_5$ )	0,05	m	Variables		
Masse actionneur joint J5 ( $m_{J5}$ )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,14	rad/s
Masse membrure L4 ( $L_4$ )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membrure L4 ( $L_4$ ) (6 DDL)	0,6	m	Masse	0	kg
Longueur membrure L4 ( $L_4$ ) (7 DDL)	0,1	m	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
Masse actionneur joint J4 ( $m_{J4}$ )	0,93	kg	Axe Y		
Masse actionneur J7 ( $m_{J7}$ )	1,75	kg	Couple au joint 2 (T2) (6 DDL)	71,04	N.m
Longueur actionneur D7 ( $D_7$ )	0,4	m	Couple au joint 2 (T2) avec $D_7=0,4m$ (7 DDL)	72,42	N.m
Longueur actionneur D7 ( $D_7$ )	0,7	m	Couple au joint 2 (T2) avec $D_7=0,7m$ (7 DDL)	87,32	N.m
Masse membrure J3 ( $m_{J3}$ )	0	kg	Couple admissible	143	N.m
Longueur membrure L3 ( $L_3$ )	0,1	m			
Masse actionneur joint J3 ( $m_{J3}$ )	1,94	kg			
Masse membrure L2 ( $m_{L2}$ )	0,8	kg			
Longueur membrure L2 ( $L_2$ ) (6 DDL)	0,7	m			
Longueur membrure L2 ( $L_2$ ) (7 DDL)	0,5	m			

Le couple calculé au joint 2 est entre 71 Nm et 87 Nm dépendamment de la configuration. Le moteur sélectionné est le même que le précédent. Il peut fournir un couple de 143 Nm ce qui laisse du jeu avec les couples calculés.

### DCL du joint 1 :

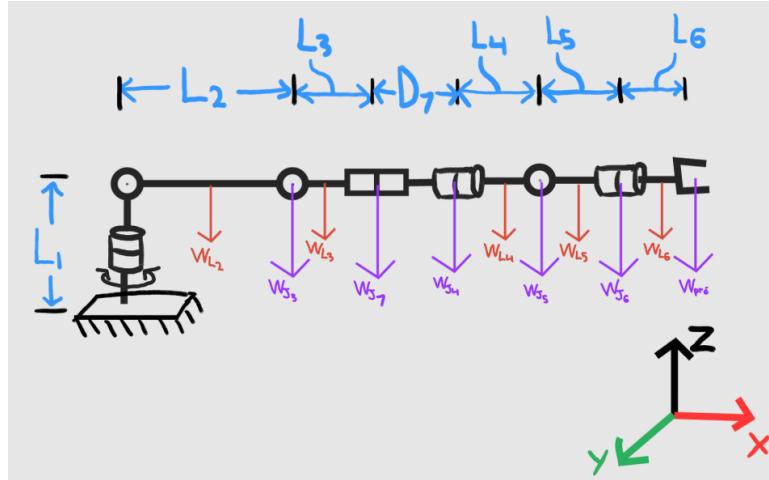


Figure 46: DCL pour le calcul de couple au joint 1

Le couple ressenti par l'actionneur du joint 2 est dicté par la formule suivante. La masse à soulever n'est pas prise en compte puisqu'en fonction du mode d'opération du bras robotique, jamais il n'aura à tourner ce joint avec une masse dans le préhenseur.

$$T_1 \text{ (6 DDL)} = T_2 \text{ (6 DDL)}$$

$$\begin{aligned} &= W_{\text{pré}} * (L_6 + L_5 + L_4 + L_3 + L_2) + W_{L6} * \left( \frac{L_6}{2} + L_5 + L_4 + L_3 + L_2 \right) + W_{J6} \\ &\quad * (L_5 + L_4 + L_3 + L_2) + W_{L5} * \left( \frac{L_5}{2} + L_4 + L_3 + L_2 \right) + W_{J5} * (L_4 + L_3 + L_2) + W_{L4} \\ &\quad * \left( \frac{L_4}{2} + L_3 + L_2 \right) + W_{J4} * (L_3 + L_2) + W_{L3} * \left( \frac{L_3}{2} + L_2 \right) + W_{J3} * L_2 + W_{L2} + \frac{L_2}{2} \end{aligned}$$

$$T_1 \text{ (7 DDL)} = T_2 \text{ (7 DDL)}$$

$$\begin{aligned} &= W_{\text{pré}} * (L_6 + L_5 + L_4 + D_7 + L_3 + L_2) + W_{L6} * \left( \frac{L_6}{2} + L_5 + L_4 + D_7 + L_3 + L_2 \right) + W_{J6} \\ &\quad * (L_5 + L_4 + D_7 + L_3 + L_2) + W_{L5} * \left( \frac{L_5}{2} + L_4 + D_7 + L_3 + L_2 \right) + W_{J5} * (L_4 + D_7 + L_3 + L_2) \\ &\quad + W_{L4} * \left( \frac{L_4}{2} + D_7 + L_3 + L_2 \right) + W_{J4} * (D_7 + L_3 + L_2) + W_{J7} * \left( \frac{D_7}{2} + L_3 + L_2 \right) + W_{L3} \\ &\quad * \left( \frac{L_3}{2} + L_2 \right) + W_{J3} * L_2 + W_{L2} + \frac{L_2}{2} \end{aligned}$$

**Tableau 17: Données, résultats de calculs et choix de moteur au joint J1**

Itération #1					
Préhenseur			Moteur (J1)		
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
Masse	0,78	kg	Modèle	eRob80HxxT	-
Dimensions (LxIxExE)	213x149x36	mm	Masse	1,94	kg
Données bras			Dimensions (ODxLxID)	85x111,8x18	mm
Variables	Valeurs	Unités	Calculs		
Masse membrure L6 ( $m_{L6}$ )	0	kg	Couple Max	143	N.m
Longueur membrure L6 ( $L_6$ )	0,25	m	Couple Nominal	31	N.m
Masse actionneur joint J6 ( $m_{J6}$ )	1,24	kg	Vitesse rot. Moteur	30	RPM
Masse membrure L5 ( $m_{L5}$ )	0	kg	Inertie de rotor ( $I_m$ )	0,071	kg*m <sup>2</sup>
Longueur membrure L5 ( $L_5$ )	0,05	m	Axe Z		
Masse actionneur joint J5 ( $m_{J5}$ )	1,24	kg	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) (6 DDL)	À déterminer avec le 3D	N.m
Masse membrure L4 ( $L_4$ )	0	kg	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,4m$ (7 DDL)	À déterminer avec le 3D	N.m
Longueur membrure L4 ( $L_4$ ) (6 DDL)	0,6	m	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,7m$ (7 DDL)	À déterminer avec le 3D	N.m
Longueur membrure L4 ( $L_4$ ) (7 DDL)	0,1	m	Couple admissible	143	N.m
Masse actionneur joint J4 ( $m_{J4}$ )	0,93	kg	Axe Y		
Masse actionneur J7 ( $m_{J7}$ )	1,75	kg	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) (6 DDL)	71,04402	N.m
Longueur actionneur D7 ( $D_7$ )	0,4	m	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,4m$ (7 DDL)	72,417	N.m
Longueur actionneur D7 ( $D_7$ )	0,7	m	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,7m$ (7 DDL)	87,324	N.m
Masse membrure J3 ( $m_{J3}$ )	0	kg	Masse	0	kg
Longueur membrure L3 ( $L_3$ )	0,1	m	Axe X		
Masse actionneur joint J3 ( $m_{J3}$ )	1,94	kg	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,4m$ (7 DDL)	71,04402	N.m
Masse membrure L2 ( $m_{L2}$ )	0,8	kg	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,7m$ (7 DDL)	72,417	N.m
Longueur membrure L2 ( $L_2$ ) (6 DDL)	0,7	m	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,4m$ (7 DDL)	87,324	N.m
Longueur membrure L2 ( $L_2$ ) (7 DDL)	0,5	m	Masse	0	kg
Masse actionneur joint J2 ( $m_{J2}$ )	1,94	kg	Calculs		

Le couple dans l'axe de rotation doit être déterminé avec le modèle 3D. En effet, le calcul du couple nécessite l'inertie de chaque composante du bras robotique par rapport à l'axe de rotation du joint 1. Sinon, en ce qui concerne le couple dans l'axe Y, celui-ci est entre 71 Nm et 87 Nm dépendamment de la configuration. Ce que les moteurs sont amplement en mesure de fournir comme couple.

## Étape 5 : Modélisation

La modélisation a été faite en prenant en compte tous les aspects décrits précédemment tels que le type et modèle d'actionneurs et les longueurs des membrures. Sans surprise, la modélisation est légèrement différente de ce qui était prévu à la base. De ce fait, toutes les distances du bras robotique non pas pu être respectées puisque les actionneurs, autant ceux rotatifs que le linéaire, contraignent certaines dimensions.

Cette première modélisation sert pour l'itération 2 des calculs de couple et choix des moteurs. La figure 47 présente cette modélisation. Le tableau 18 présente les distances de cette modélisation. Toutefois, les détails de la conception finale (Coût, poids total, etc) sont présentés plus tard dans le rapport.

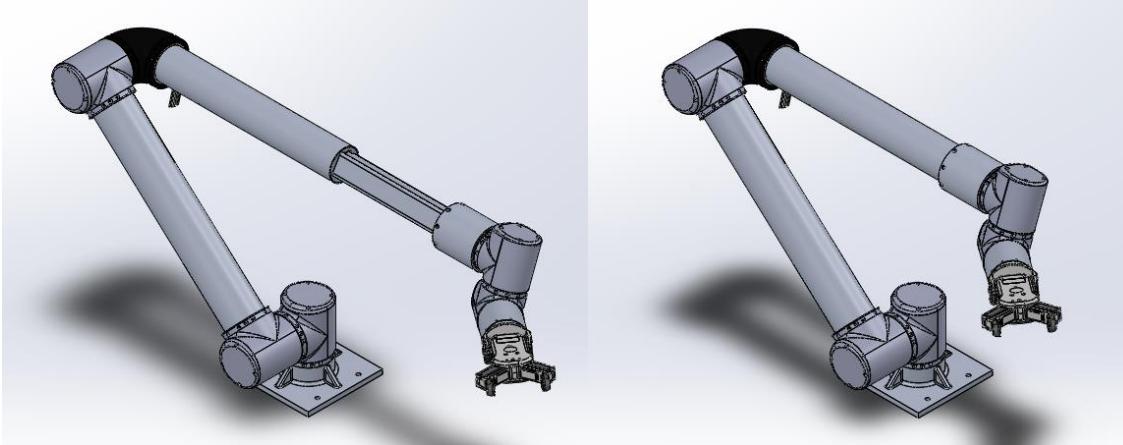


Figure 47: Modélisation du bras

Tableau 18: Caractéristiques des membrures du bras

Longueur du bras			Masse des membrures			Masse des actionneurs		
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
$L_1$	94	mm	$m_{L1}$	0,94	kg	$m_{J1}$	1,94	kg
$L_2$	500	mm	$m_{L2}$	0,77	kg	$m_{J2}$	1,94	kg
$L_3$	48	mm	$m_{L3}$	0,327	kg	$m_{J3}$	1,94	kg
$D_7$	[392 627]	mm	$m_{L7}$	1,5	kg	$m_{J7}$	1,5	kg
$L_4$	91	mm	$m_{L4}$	0,24	kg	$m_{J4}$	0,93	kg
$L_5$	43	mm	$m_{L5}$	0	kg	$m_{J5}$	1,24	kg
$L_6$	347	mm	$m_{L6}$	0,166	kg	$m_{J6}$	1,24	kg
$L_{Tot}$	[1515 1750]	mm	$m_{Ltot}$	3,94	kg	$m_{Jtot}$	10,73	kg

## Étape 6, itération 2 : Calcul du couple et choix des moteurs

Basée sur la modélisation présentée à l'étape précédente, une nouvelle itération a été réalisée pour déterminer si les moteurs sont assez puissants maintenant que le poids de tout le bras est connu. Après avoir refait tous les calculs de couple aux moteurs, la conclusion est que les moteurs préalablement sélectionnés sont assez puissants. Toutefois, pour alléger le rapport, les résultats de l'itération 2 se trouvent à l'Annexe V. Pour voir les résultats en détail, s'y référer.

## **Étape 7 : Choix de la solution gagnante**

Cette étape fait part du choix de la solution finale. Le choix est basé sur les couples moteurs, les avantages de l'actionneur linéaire et le jugement du promoteur.

### Couples moteurs et forces dans les membrures

Au niveau statique, les étapes 4 et 6 démontrent que les deux concepts sont assez similaires. Les couples engendrés par les différents poids et différents bras de levier font en sorte que les couples aux moteurs sont sensiblement les mêmes. En effet, les mêmes moteurs conviennent, ce qui fait que les deux configurations (6 DDL et 7 DDL) ont sensiblement la même géométrie. La seule différence est la longueur des membrures  $L_2$ ,  $L_4$  et l'utilisation d'un actionneur linéaire pour la configuration à 7 DDL.

Pour la configuration à 6 DDL, les membrures sont fixes à une longueur totale de 1,8 m tandis que la configuration à 7 DDL peut varier entre 1,5 m et 1,8 m. La configuration à 6 DDL engendre un couple maximum au joint 2 de 77 Nm. Respectivement, la configuration à 7 DDL engendre un couple de 72 Nm (à 1,5 m) et de 84 Nm (à 1,8 m). Donc, malgré le poids additionnel causé par l'actionneur linéaire pour la configuration à 7 DDL, le couple maximum est plus faible que la configuration à 6 DDL lorsque la longueur est de 1,5 m. À l'inverse, lorsque la longueur est de 1,8 m, le couple au moteur est plus élevé que pour la configuration à 6 DDL.

### Avantage de l'actionneur linéaire

L'ajout de l'actionneur linéaire permet aux robots d'atteindre ses besoins d'une manière intelligente. En effet, la masse de 2,2 kg sur le bras de levier de 1,7 m crée un couple immense. Cependant, l'actionneur linéaire permet de séparer les contraintes en 2. Le bras sera capable d'atteindre la longueur de 1,8 m désirée sans charge (en position étendu) tout en étant capable de soulever la charge désirée en position rétractée.

### Jugement du promoteur

Avec un retour en arrière sur le contexte, le meilleur choix est la solution à 7 DDL. La solution à 6 DDL étant une solution déjà existante avec seulement les paramètres géométriques à modifier. Au niveau de la recherche et développement, la deuxième solution permet d'innover ainsi que d'apporter quelque chose de nouveau au club étudiant. De plus, cette solution avait déjà « gagné » étant donné qu'elle avait marqué plus de points dans la matrice de décision. Finalement, nos calculs n'ont fait que valider que cette solution était tout aussi valide que celle à 6 DDL sinon même plus.

Bref, selon nos calculs comparatifs et notre jugement, la solution gagnante serait la solution à 7 DDL comportant les 6 joints pivots ainsi qu'un joint prismatique.

## Présentation de la solution gagnante

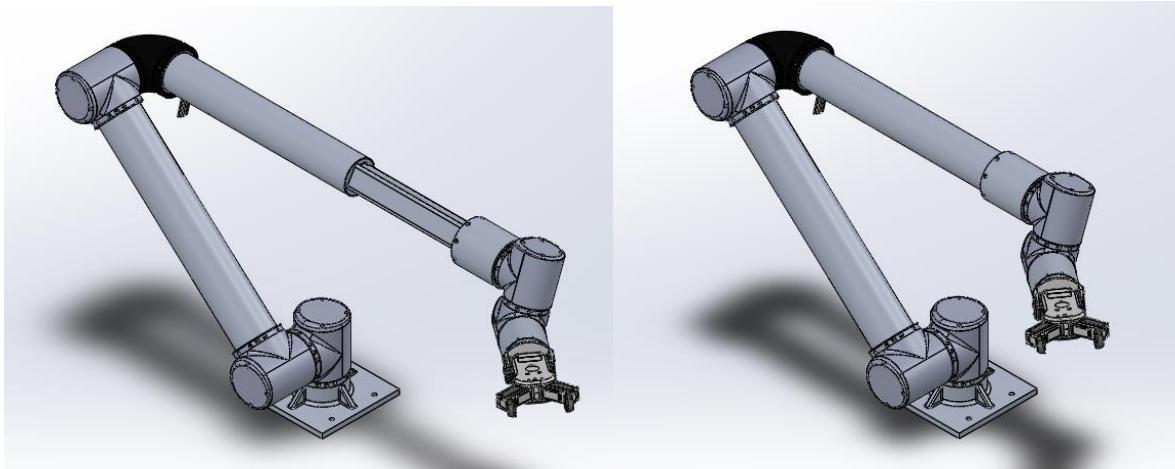


Figure 48: Présentation du bras robotique

La figure 48 présente la conception de la solution gagnante. Comme mentionné précédemment, la solution comporte 7 degrés de liberté. Il y a six actionneurs rotatifs et un actionneur linéaire. À gauche, l'actionneur linéaire du bras est étendu, ce qui lui confère sa longueur maximale de 1 750 mm. À droite, l'actionneur linéaire est rétracté, ce qui donne une longueur maximale au bras de 1 515 mm. De plus, la figure 49 présente la longueur officielle de chaque membrure. Le tableau 19 présente les caractéristiques du bras.

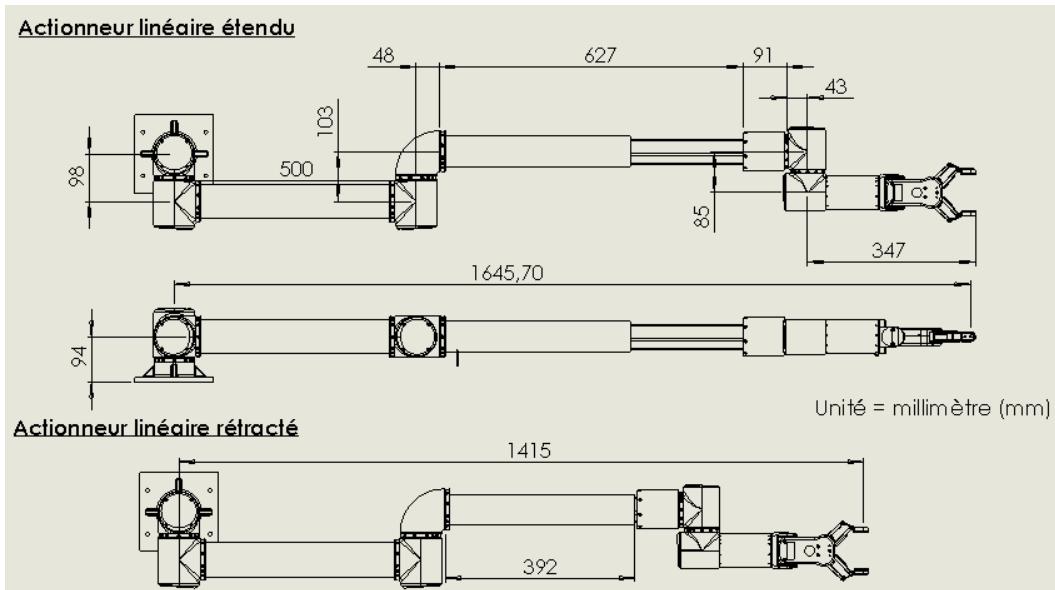


Figure 49: Longueur du bras robotique

Tableau 19: Caractéristique des membrures du bras

Longueur du bras			Masse des membrures			Masse des actionneurs		
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
$L_1$	94	mm	$m_{L1}$	0,94	kg	$m_{J1}$	1,94	kg
$L_2$	500	mm	$m_{L2}$	0,77	kg	$m_{J2}$	1,94	kg
$L_3$	48	mm	$m_{L3}$	0,327	kg	$m_{J3}$	1,94	kg
$D_7$	[392 627]	mm	$m_{L7}$	1,5	kg	$m_{J7}$	1,5	kg
$L_4$	91	mm	$m_{L4}$	0,24	kg	$m_{J4}$	0,93	kg
$L_5$	43	mm	$m_{L5}$	0	kg	$m_{J5}$	1,24	kg
$L_6$	347	mm	$m_{L6}$	0,166	kg	$m_{J6}$	1,24	kg
$L_{tot}$	[1515 1750]	mm	$m_{Ltot}$	3,94	kg	$m_{Jtot}$	10,73	kg

### Actionneurs

Le tableau 20 présente toutes les informations quant aux actionneurs utilisés dans le bras robotique. Ces données sont surtout plus utiles pour la partie contrôle du robot.

Tableau 20: Caractéristiques des actionneurs

Modèles	Rapport de vitesse harmonique	Couple Nominal (N.m)	Poids (Kg)	Diamètres extérieur longueur (mm)	Inertie du Rotor (g- mm <sup>2</sup> )	Courant nominal / Tension	Puissance Moteur (W)	Vitesse de rotation de sortie (RPM)	Prix	Notes
eRob80HxxT	SHG 17-100	31	1,94	85/111.8/18 (ODxLxD)		3,4/48	146	30	1,706.15 \$CA	J1
eRob80HxxT	SHG 17-100	31	1,94	85/111.8/18 (ODxLxD)		3,4/48	146	30	1,706.15 \$CA	J2
eRob80HxxT	SHG 17-50	21	1,94	85/111.8/18 (ODxLxD)		3,4/48	146	60	1,706.15 \$CA	J3
eRob70HxxI	SHG 14-80	10	0,93	70/75,3 (ODxL)	50996	2,55/48	100	37,5	1 364,92 \$CA	J4
eRob70HxxT	SHG 14-80	10	1,24	73/99/18 (ODxLxD)		2,55/48	100	37,5	1569.66 \$CA	J5
eRob70HxxT	SHG 14-50	7	1,24	73/99/18 (ODxLxD)		2,55/48	100	60	1 556,01 \$CA	J6
DF45L024048-A2		0,39	0,15	42,8/27(ODxL)		.../24	65	6100	117,1 \$CA	J7

Moteur Joint	Série Moteur		Courant nominal (A)	Tension (V)		Puissance Moteur (W)
J1	eRob80HxxT	SHG 17-100	3,4	48		146
J2	eRob80HxxT	SHG 17-100	3,4	48		146
J3	eRob80HxxT	SHG 17-50	3,4	48		146
J4	eRob70HxxI	SHG 14-80	2,55	48		100
J5	eRob70HxxT	SHG 14-80	2,55	48		100
J6	eRob70HxxT	SHG 14-50	2,55	48		100
J7	DF45L024048-A2			24		65

Courant Total:

17,85 A/48V

Puissance Totale:

803 W

## Coût et poids

La solution comporte à la fois des pièces à acheter et des pièces à fabriquer. Le tableau 21 présente les composants à acheter, le poids de ceux-ci et leur prix. Les composants à acheter sont les six actionneurs rotatifs, le préhenseur, quelques pièces pour la fabrication de l'actionneur linéaire et de la quincaillerie. Le prix total pour ces composants est d'environ 12 000 \$. La seule incertitude est le prix du préhenseur. En effet, le prix n'était pas indiqué sur le site du détaillant alors il a été approximé à 2 000 \$. De plus, le poids total de ces composants est un peu moins que 11 kg, soit 10,88 kg. 9,23 kg du poids proviennent des six actionneurs linéaires.

Tableau 21: Liste des composants à acheter

Composant	Composants à acheter				
	Nombre	Poids (kg)	Poids total (kg)	Prix (\$)	Prix total (\$)
	eRob80xxT	3	1,94	5,82	1706,15
	eRob70xxI	1	0,93	0,93	1364,92
	eRob70HxxT	2	1,24	2,48	1560
	Préhenseur RG2	1	0,78	0,78	2000
	PSS105N1D0321116,5-shaft	1	0,5	0,5	150
	6153K111 Bearing	1	0,014	0,014	13,94
	6153K24 Bearing	1	0,002	0,002	13,77
	91423A551 Nut	1	0,005	0,005	n/a
	DF45L024048-A2	1	0,15	0,15	207
	91290A154 Socket head screw	1	0,008	0,008	n/a
	PSS105N1D0421 - Nut	1	0,11	0,11	0
	9129A111 Socket head screw	112	0,00072	0,08064	n/a
		<b>Total</b>	10,88	<b>Total</b>	12034,31

Le tableau 21 présente l'entièreté des pièces à fabriquer. Ce sont toutes des pièces uniques à la conception du bras robotique d'où la nécessité de les fabriquer. Comme il est possible de constater, les pièces sont toutes faites d'aluminium 6061-T6 sauf le coude qui est à fabriquer en fibre de carbone.

L'aluminium 6061-T6 a été priorisé puisqu'il confère un excellent rapport entre les propriétés mécaniques, le poids et le coût en plus d'être courant sur le marché. De plus, comme ces pièces doivent être fabriquées et usinées par les étudiants du club étudiant CAPRA, sa bonne usinabilité en fait un matériau de choix pour ce type d'application. Toutefois, une pièce doit être fabriquée en fibre de carbone. En effet, sa géométrie est impossible à usiner. C'est pourquoi il est nécessaire de fabriquer la pièce d'une autre manière. Donc, la fibre de carbone a été préconisée du fait de son faible poids et sa haute résistance mécanique.

Somme toute, la masse totale de ces pièces est de 3,54 kg. Cela inclut même la base de 0,9 kg. Qui ne compte pas réellement dans la conception du bras puisqu'elle sera incluse dans la base mobile du robot de sauvetage.

**Tableau 22: Liste des pièces à fabriquer**

Pièce	Pièces à fabriquer		
	Nombre	Matériaux	Poids (kg)
	Base (105)	1	Aluminium 6061-T6
	Membrane 2 (103)	1	Aluminium 6061-T6
	Coude (104)	1	Fibre de carbone
	Membrane 7 (201)	1	Aluminium 6061-T6
	Extension (202)	1	Aluminium 6061-T6
	203	1	Aluminium 6061-T6
	204	1	Aluminium 6061-T6
	205	1	Aluminium 6061-T6
	206	1	Aluminium 6061-T6
	207	1	Aluminium 6061-T6
	208	1	Aluminium 6061-T6
	209	1	Aluminium 6061-T6
	210	1	Aluminium 6061-T6
	Membrane 4 (112)	1	Aluminium 6061-T6
	Membrane 6 (113)	1	Aluminium 6061-T6
	Adaptateur (110)	1	Aluminium 6061-T6
<b>Total</b>			<b>3,54</b>

Le coût de ces pièces dépend fortement du prix de brut pour l'usinage et les frais reliés à l'usinage. Il y a deux catégories de pièces sur le bras robotique. Des membrures rondes avec un diamètre maximal de 71 mm ( $\approx 2,8$  po) et des pièces de petite taille. Les membrures rondes totalisent environ la longueur du bras, soit 1 750 mm. Ainsi, en recherchant sur internet, l'équipe a trouvé un brut de 76,2 mm (3 po) de diamètre par 2 438,4 mm (96 po) de long au prix de 1 385 \$ (Buymetal, s.d.).

Pour ce qui est des petites pièces, l'équipe estime qu'une barre carrée de 152x152x610 mm (6x6x24 po) est largement suffisant pour avoir assez de matériel pour fabriquer les pièces. Un brut en aluminium 6061-T6 de cette dimension coûte aux environs de 590 \$ (Buymetal, s.d.).

Les coûts reliés à l'usinage des pièces sont pratiquement nuls pour le club étudiant. En effet, un atelier d'usinage est à la disposition des clubs étudiants à l'ÉTS. C'est un service offert gratuitement. Alors, le club n'a pas à dépenser de l'argent pour l'usinage des pièces étant donné que les étudiants le font à l'interne.

Dernièrement, il est difficile de mettre un prix sur le coude qui est fait en fibre de carbone. La fabrication d'une pièce de fibre de carbone nécessite des procédés complexes et une installation unique pour la pièce en question. Elle ne sera pas usinée à l'ÉTS par manque d'installation à cet égard. Pour ces raisons, il n'est pas fou de penser qu'une telle pièce peut coûter 5 000 \$ à fabriquer.

Alors, le poids et le prix total du bras sont présentés dans le tableau 23.

Tableau 23: Masse et prix final du bras

	Masse du bras	Prix du bras	
Composants à acheter	10,88	kg	12034,31
Pièces à fabriquer	3,54	kg	6975
Total	14,42	kg	19009,31

La figure 50 présente le bras sur la conception de la base mobile. La base mobile n'est pas définitive. C'est uniquement une conception préliminaire. Néanmoins l'équipe jugeait intéressant d'intégrer la figure dans le rapport puisque c'est la première image du nouveau robot de sauvetage qui participera à des compétitions.

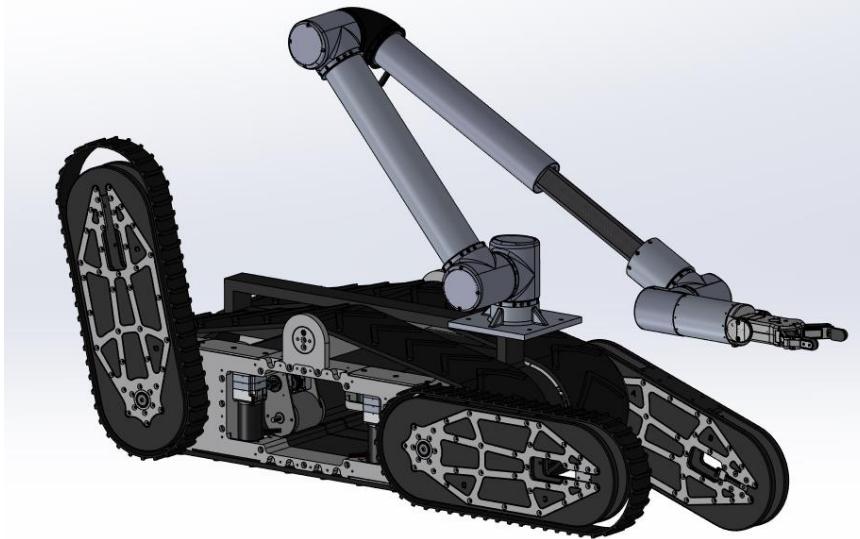


Figure 50: Rove munit du bras robotique

## Validation du choix d'actionneur linéaire

L'équipe n'a pas été en mesure de trouver un actionneur linéaire qui convient. Pour cette raison, elle a décidé de le fabriquer soit même à l'exception de quelques pièces achetées. Les principales pièces achetées qui constituent l'actionneur sont un moteur, une vis à bille et des roulements à bille.

Pour le projet, le moteur DF45L024048-A2 à courant continu sans balais, de Nanotec a été choisi. Il permet un couple et une vitesse assez élevé pour notre application comme le démontre les calculs qui suivent.



Figure 51: moteur DF45L024048-A2 à courant continu sans balais

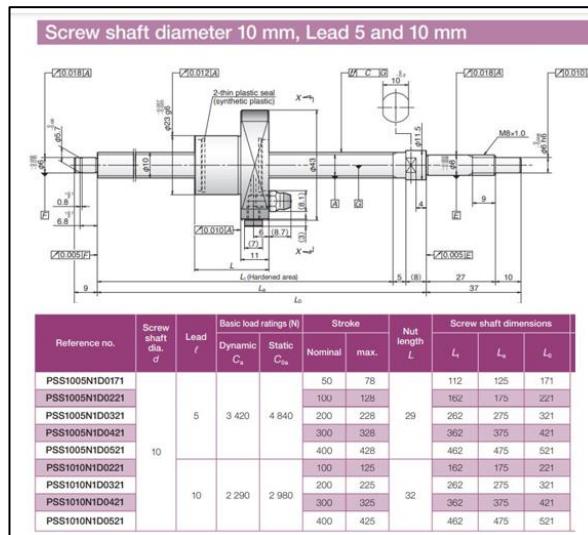


Figure 52: Spécification de la vis à bille

La vis à bille PSS1005N1D0321 de NSK a été choisie. Elle permet un déplacement et une longueur initiale proche de ce qui a été convenu initialement tout en respectant la longueur de la vis à bille standard. Les calculs de couple et de vitesse de rotation suivants ont été déterminés avec le moteur à courant continu.

$$T = \text{Couple nécessaire du moteur (Nm)}$$

$$L = \text{pas de la vis } \left( \frac{\text{mm}}{\text{rev}} \right)$$

*u* = efficacité de la vis à bille

$$w = \text{vitesse de rotation de la vis } \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

*v* = vitesse linéaire de la vis (m/s)

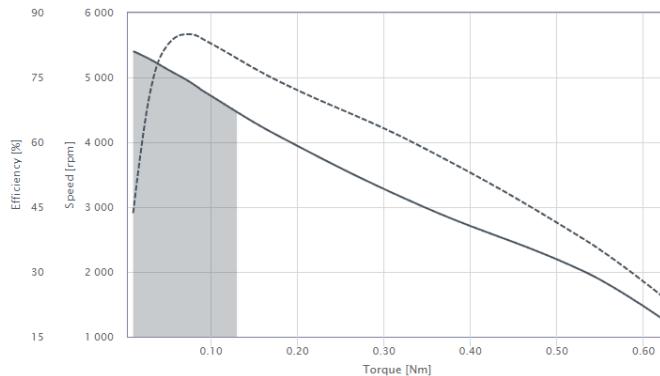
$$w = \frac{v * 2\pi}{L}$$

Selon le cahier de charge, il est souhaité que l'actionneur linéaire se déplace à une vitesse de 25 cm/s (0,25 m/s). Avec la vitesse linéaire voulue, on peut calculer la vitesse de rotation requise de la vis à bille (w).

$$v = 25 \frac{\text{cm}}{\text{s}} * \frac{10^{-2} \text{m}}{\text{cm}} = \frac{0,25 \text{m}}{\text{s}}, L = 5 \text{mm} * \frac{10^{-3} \text{m}}{\text{mm}} = 0,005 \text{m}$$

$$w = \frac{0,25 * 2\pi}{0,005} = 314,16 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * \frac{1 \text{tr}}{2\pi \text{rad}} * \frac{60 \text{s}}{\text{min}} = 3 \text{000 RPM}$$

Selon le graphique de la figure 53, pour une vitesse de rotation de 3 000 RPM, le couple à l'arbre est de 0,34 Nm.



**Figure 53 : graphique de l'efficacité et de la vitesse de rotation en fonction du couple (Nm) du moteur choisi**

Maintenant, il importe de vérifier si le couple du moteur est plus élevé que celui causé par la friction de la vis à bille.

$$u = 0,003$$

$$m = 14,42 \text{ kg}$$

Nous supposons une accélération de 0,5 m/s.

$$a = 0,5 \text{ m/s}^2$$

$$F = m * a$$

$$F = 0,5 * 14,42 = 7,21 \text{ N}$$

$$T_{min} = \frac{L}{2\pi} (F + uWg)$$

$$T_{min} = \frac{0,005}{2\pi} (7,21 + 0,003 * 14,42 * 9,81) = 0,0061 \text{ Nm}$$

Donc, le couple du moteur (0,34 Nm) est plus élevé que celui causé par la friction (0,0061 Nm).



**Figure 54: Conception préliminaire de l'actionneur linéaire en mode rétracté et étendu**

## Dimensionnement des membrures

Cette section du rapport vise à s'assurer que les composantes et membrures du bras résistent aux charges provoquées par le poids. Pour ce faire, les contraintes dans les pièces que l'équipe juge critiques ont été calculées et lorsque pertinent, une analyse par éléments finis a aussi été réalisée pour confirmer.

Liste des pièces à analyser :

1. Membrure du joint 2
2. Membrure du joint 3 (coude)
3. Membrure du joint 4
4. Actionneur linéaire (membrure 7)

Deux cas ont été évalués, soit les cas que l'équipe juge pertinents. La figure 55 suivante présente les deux cas. À gauche se trouve le cas 1 où le bras est à l'horizontale et à droite le cas 2 avec le bras à la verticale.

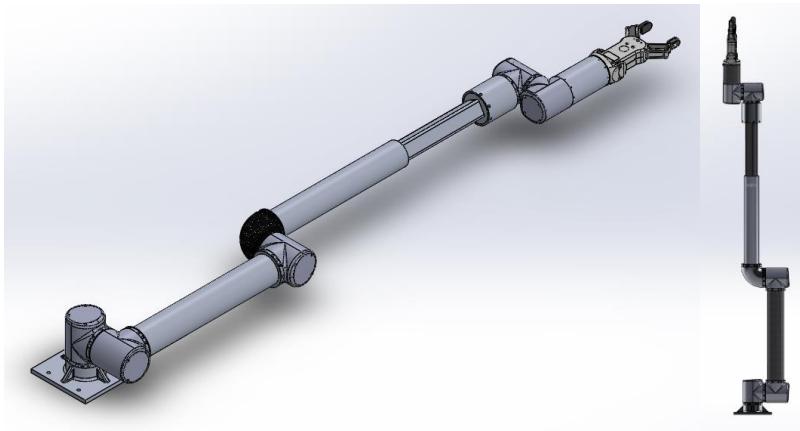


Figure 55: Cas 1 (gauche) et cas 2 (droite)

### Contraintes de dimensionnement

Quatre des contraintes qui limitent la géométrie des pièces sont l'esthétique, le fait qu'il y a des trous filetés dans l'épaisseur des pièces, la fabrication et les fils qui doivent passer à l'intérieur des membrures. En effet, l'apparence du bras est importante, ce qui limite la possibilité de géométrie que peuvent prendre les membrures pour garder son uniformité. Aussi, puisqu'il faut visser des vis dans les membrures, celles-ci doivent posséder une épaisseur minimale. Les vis sont des M3 avec un pas de 0,5 mm. Aussi, les pièces doivent être fabriquées par les étudiants du club. Donc, la géométrie a intérêt à être la plus simple possible. Dernièrement, les pièces doivent être vides pour permettre aux fils de passer à l'intérieur, comme spécifié dans le cahier de charge.

### Calculs théoriques du cas 1 (bras à l'horizontale)

#### Membrure 4 (Joint 4)

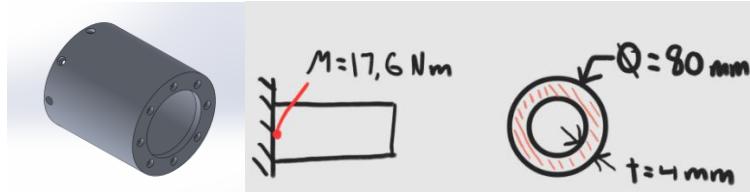


Figure 56: Schéma membrure 4

Tableau 24: Spécification membrure 4

Membrure 4 (J4)		
Matériau	Aluminium 6061-T6	n/a
Limite d'élasticité	275	MPa
Diamètre ( $\varnothing$ )	80	mm
Epaisseur (t)	4	mm
Moment de flexion (M)	17,6	Nm

$$I = \frac{\pi * (D^4 - (D - 2 * t)^4)}{64}$$

$$I = \frac{\pi * (80^4 - (72)^4)}{64}$$

$$I = 691\,452\,mm^4$$

$$\sigma = \frac{M * Y}{I}$$

$$\sigma = \frac{17,6 * \frac{80}{2} * 10^{-3}}{691\,452 * 10^{-12}}$$

$$\sigma = 1,01\,MPa$$

$$FS = \frac{\text{Limite d'élasticité}}{\sigma}$$

$$FS = \frac{275}{1,01}$$

$$FS \approx 273$$

Les calculs précédents démontrent que la membrure est surdimensionnée quant au moment qu'elle ressent puisque le facteur de sécurité est de 273. Cela est dû au faible moment et à l'épaisseur de la paroi. Toutefois, il est impossible de réduire l'épaisseur de la paroi puisque des trous sont prévus pour y cacher des têtes de vis à six pans creux. En réduisant l'épaisseur, les têtes de vis dépasseraient de la surface. Puisque le facteur de sécurité est si élevé, l'équipe juge qu'il n'est pas pertinent de réaliser une analyse par élément fini sur cette pièce.

### Actionneur linéaire (Joint 7)

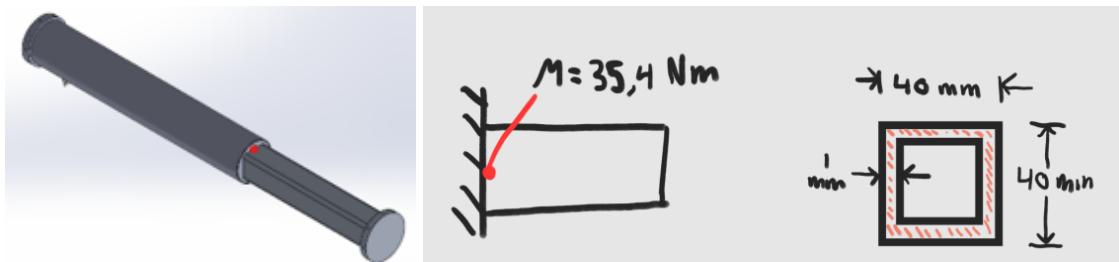


Figure 57: Schéma actionneur linéaire

Tableau 25: Spécification actionneur linéaire

Membrure 7 (J7)		
Matériau	Aluminium 6061-T6	n/a
Limite d'élasticité	275	MPa
Largeur (a et b)	40	mm
Epaisseur (t)	1	mm
Moment de flexion (M)	35,4	Nm

$$I = \frac{a_1 * b_1^3}{12} - \frac{a_2 * b_2^3}{12}$$

$$I = \frac{40 * 40^3}{12} - \frac{39 * 39^3}{12}$$

$$I = 20\,547\,mm^4$$

$$\sigma = \frac{M * Y}{I}$$

$$\sigma = \frac{35,4 * \frac{40}{2} * 10^{-3}}{20\,547 * 10^{-12}}$$

$$\sigma = 34,5\,MPa$$

$$FS = \frac{\text{Limite d'élasticité}}{\sigma}$$

$$FS = \frac{275}{34,5}$$

$$FS \approx 8$$

La partie coulissante de l'actionneur linéaire a un facteur de sécurité d'environ 8. Une analyse par élément fini a aussi été réalisée pour confirmer ce résultat. En appliquant un support fixe au bout de la pièce et en y appliquant un moment de 35,4 Nm, il a été possible de trouver les contraintes. La contrainte maximale réelle est d'environ 20 MPa, là où la pièce a une couleur jaune-orange. L'endroit où il est écrit « Max » n'est qu'une singularité. Pour cette raison l'équipe ne peut pas la considérer comme la plus grande contrainte. La contrainte évaluée sur Ansys est légèrement moins que celle calculée, laissant un facteur de sécurité encore plus grand. Ainsi, la pièce est dimensionnée adéquatement. Les conditions frontières sont précisées dans l'Annexe VI.

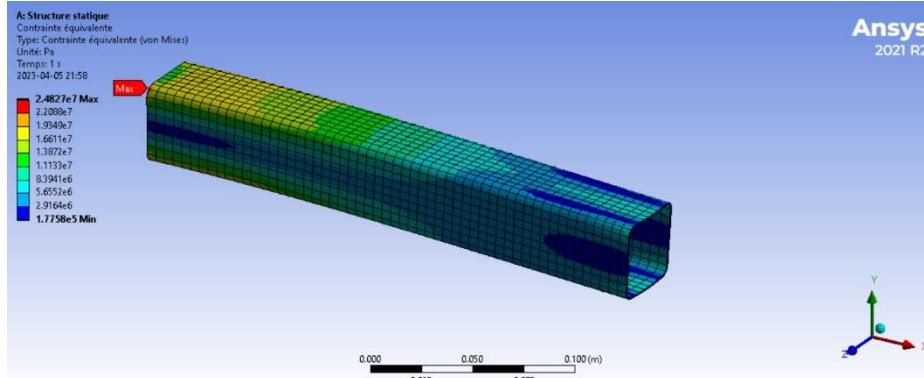


Figure 58: Analyse Ansys de l'actionneur linéaire

#### Membrure 2 (Joint 2) :

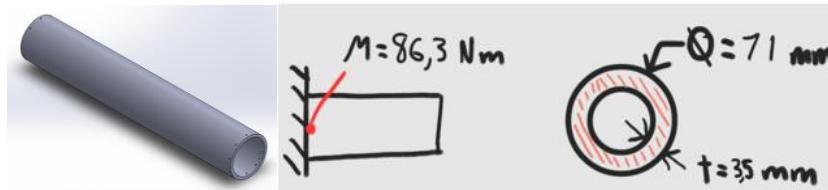


Figure 59: Schéma de la membrure 2

Tableau 26: Spécification de la membrure 2

Membrure 2 (J2)		
Matériau	Aluminium 6061-T6	n/a
Limite d'élasticité	275	MPa
Diamètre ( $\varnothing$ )	71	mm
Épaisseur (t)	3,5	mm
Moment de flexion (M)	86,3	Nm

$$I = \frac{\pi * (D^4 - (D - 2 * t)^4)}{64}$$

$$I = \frac{\pi * (71^4 - 64^4)}{64}$$

$$I = 474\ 121\ mm^4$$

$$\sigma = \frac{M * Y}{I}$$

$$\sigma = \frac{86,3 * \frac{71}{2} * 10^{-3}}{474\ 121 * 10^{-12}}$$

$$\sigma = 7,23\ MPa$$

$$FS = \frac{\text{Limite d'élasticité}}{\sigma}$$

$$FS = \frac{275}{7,23}$$

$$FS \approx 38$$

La membrure 2 a un facteur de sécurité d'environ 38. En d'autres mots, la membrure est surdimensionnée. Cependant, il n'est pas possible de diminuer l'épaisseur de la paroi puisqu'il y a des trous taraudés et il doit y avoir assez de filets pour que les vis puissent y être vissées. Les vis sont des M3 avec un pas de 0,5. Ainsi, une épaisseur

de 3,5 mm fait en sorte que 7 filets sont agrippés dans la pièce.

Une analyse a aussi été réalisée étant donné que c'est la membrure qui prend le plus grand moment de tout le bras. L'équipe veut s'assurer d'avoir bien effectué les calculs. L'analyse par éléments finis démontre que la contrainte dans la pièce est plus grande que calculée. Cela est dû aux concentrations de contraintes sur le bord des trous ou les vis seront vissées. Outre cette contrainte de 36 MPa autour des trous, ce qui est largement en dessous de la limite élastique de l'aluminium, la contrainte dans la pièce est d'environ 8 MPa. Cela est visible par la couleur bleue et l'échelle de contrainte sur le côté gauche de l'image. La contrainte de 8 MPa est cohérente avec le calcul précédent. À l'Annexe VI se trouvent les conditions frontières de l'analyse.

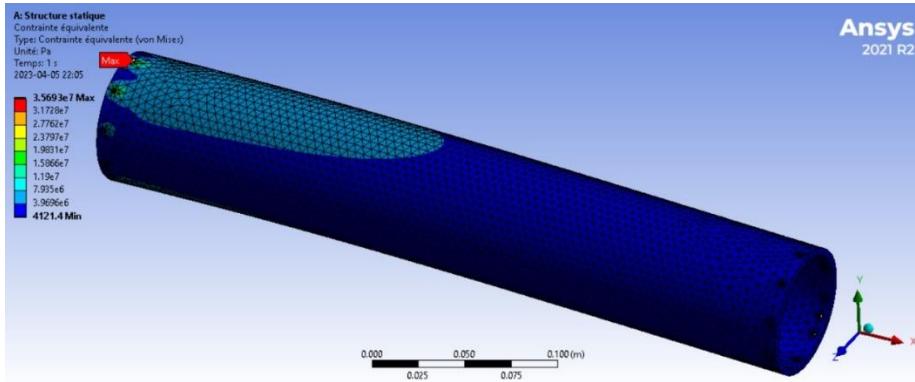


Figure 60: Analyse Ansys de la membrure 2

### Le coude :

Tableau 27: Spécification du coude

Coude (J3)		
Matériau	Fibre de carbone	n/a
Limite d'élasticité	≈ 2 500	MPa
Diamètre ( $\varnothing$ )	71	mm
Épaisseur (t)	4	mm
Moment de flexion (M)	43,4	Nm

Étant donné sa forme non conventionnelle, aucun calcul n'a été effectué sur le coude, pourtant il est nécessaire de tester sa résistance. Une analyse par éléments finis a démontré que la contrainte maximale est de 32 MPa sur la pièce. Encore une fois, cela se produit autour des trous dus à des concentrations de contraintes. Ailleurs sur la pièce, les contraintes s'élèvent à 7 MPa. Dans tous les cas, la contrainte est largement inférieure à la limite élastique du carbone, ce qui témoigne que le dimensionnement est adéquat. À l'Annexe VI se trouvent les conditions frontières de l'analyse.

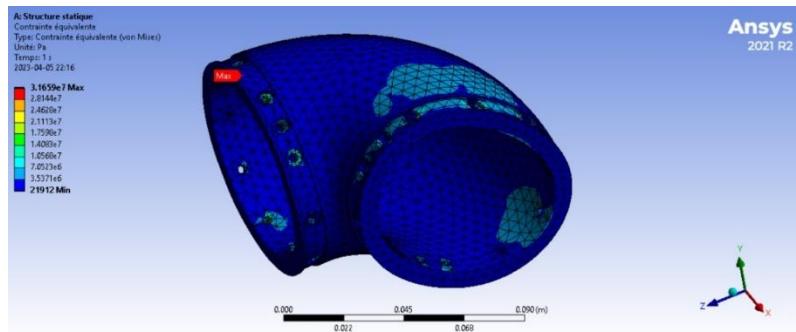


Figure 61: Analyse Ansys du coude

### Calculs théoriques du cas 2 (bras à la verticale)



Figure 62: Cas 2, bras à la verticale

### Calcul de force dans la membrure 2

Les différents bras de levier qui créent un moment sur la membrure sont les suivants :  $L_1 = 85$  et  $L_2 = 103,2$  mm  
Établissons d'abord les différentes forces qui agissent sur la membrure :

$$F1 = (M_{préhenseur} + M_{j6}) * 9,81 \frac{m}{s^2} = (0,78 + 1,25) kg * 9,81 \frac{m}{s^2} = 19,91 N$$

$$F2 = (M_{j5} + M_{j4} + M_{j7} + M_{coude}) * 9,81 \frac{m}{s^2} = (1,25 + 1,25 + 1,75 + 0,44) kg * 9,81 \frac{m}{s^2} = 46,01 N$$

$$F = F1 + F2 + j3 * 9,81 \frac{m}{s^2} = 19,91 N + 46,01 N + 1,94 kg * 9,81 \frac{m}{s^2} = 84,95 N$$

$$M1 = F1 * (l1 + l2) = 19,91 N * (85 + 103,2) mm = 3747,06 Nmm$$

$$M2 = F2 * l2 = 46,01 N * 103,2 mm = 4748,23 Nmm$$

$$M = M1 + M2 = 3747,06 Nmm + 4748,23 Nmm = 8495,29 Nmm$$

### Contrainte dans la membrure 2

Avec les paramètres géométriques de la membrure présentés dans le tableau 19 il est possible de calculer la contrainte appliquée sur la membrure par les différentes forces impliquées :

$$A = \frac{\pi}{4} * (D^2 - d^2) = \frac{3.1416}{4} * (71^2 - 64^2) mm^2 = 742.20 mm^2$$

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{84.95 N}{742.20 mm^2} = 0.11 MPa$$

$$I = \frac{\pi}{64} * (D^4 - d^4) = \frac{3.1416}{64} * (71^4 - 64^4) mm^4 = 423844.30 mm^4$$

$$\sigma_F = \frac{M * y}{I} = \frac{8495.29 Nmm * 35.5 mm}{423844.30 mm^4} = 0.31 MPa$$

En additionnant les contraintes de compression, on retrouve la contrainte combinée maximale en compression :

$$\sigma_C = 0.11 MPa + 0.31 MPa = 0.42 MPa$$

$$FS = \frac{275 MPa}{0.42 MPa} = 654.8$$

Étant donné le facteur de sécurité obtenu (654.8), la membrure devrait soutenir le poids du bras.

À l'aide d'une simple vérification par éléments finis présentée à la figure 63, on remarque que nous sommes dans le même ordre de grandeur que nos calculs à la main (autour de 0.1 MPa) :

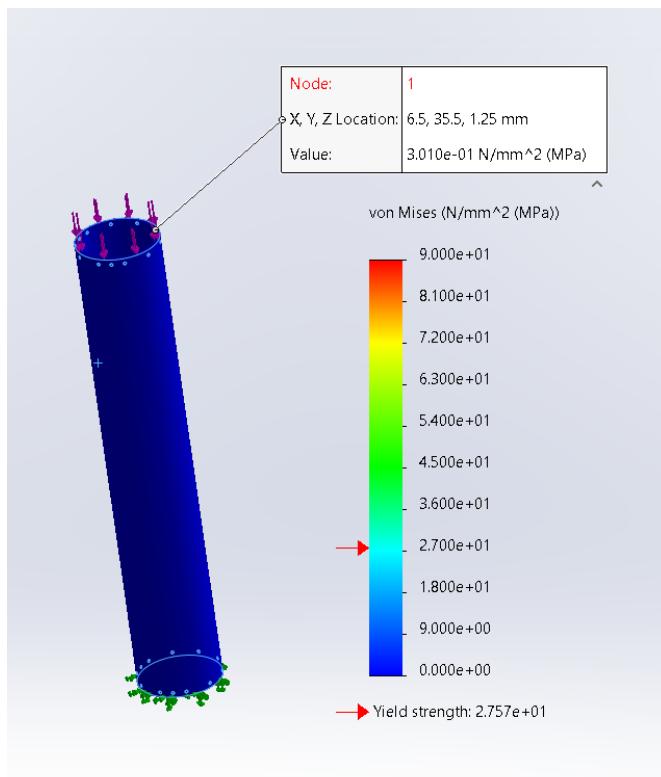


Figure 63: Analyse Solidworks Simulation de la membrure 2

## Calcul actionneur linéaire

Les conditions frontières sont présentées à la figure 77 et la figure 78 de l'Annexe VI. Dans cette partie, la contrainte sera calculée dans les pièces de l'actionneur linéaire pour déterminer son facteur de sécurité avec la limite d'écoulement de celui-ci en fonction du matériau. La contrainte la plus élevée se trouve à être à la jonction entre l'arbre du moteur électrique et le bout de l'actionneur à bille. Leur matériau son l'acier inoxydable. Les Forces ( $F = ma$ ) et couple (340 Nmm) sont déterminés dans la : Validation du choix d'actionneur linéaire.

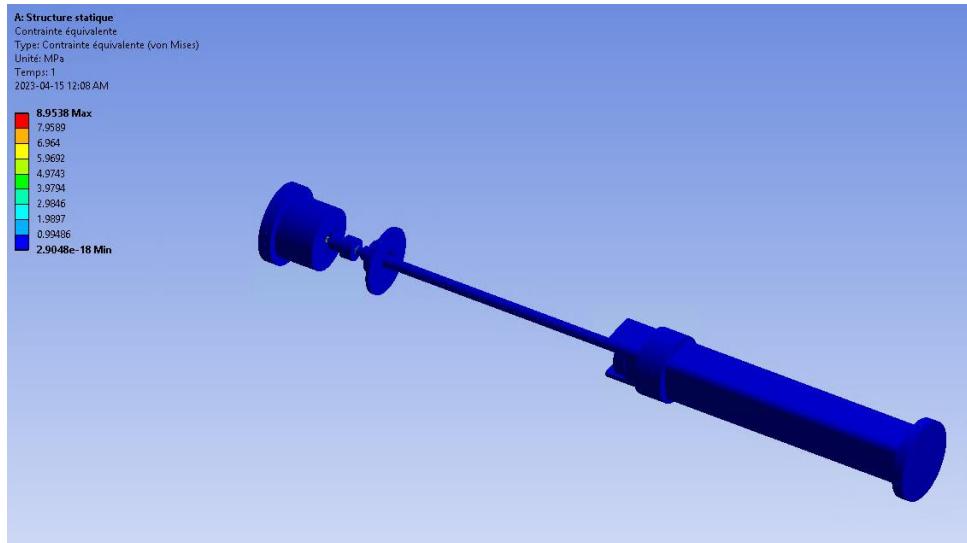


Figure 64 : Simulation de l'assemblage total de l'actuateur linéaire

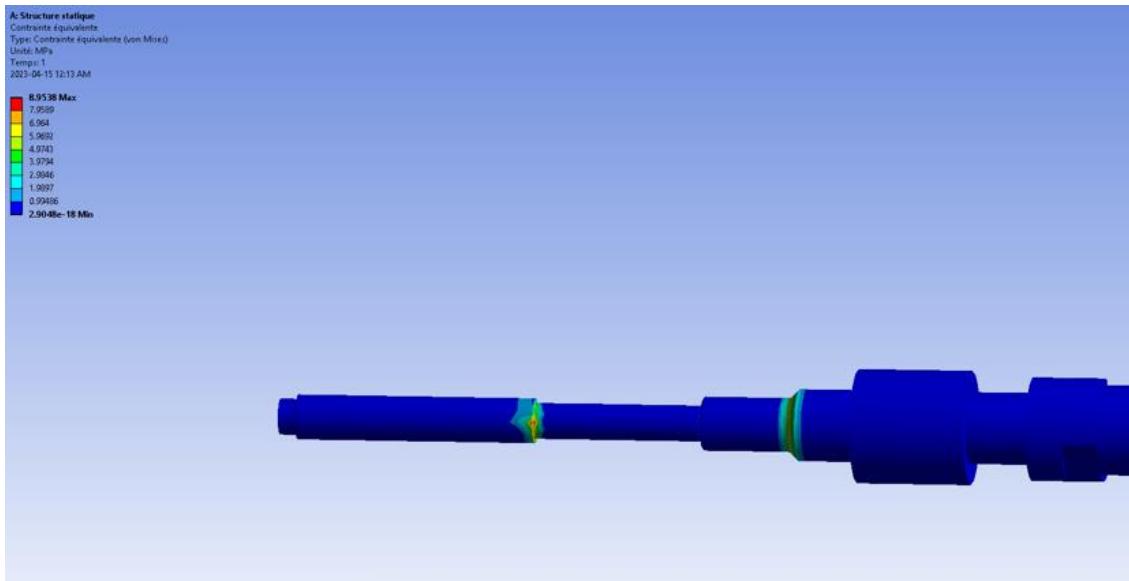


Figure 65 : Contrainte maximum dans l'assemblage de l'actuateur linéaire

$$\sigma_{yacier} = \text{contrainte d'écoulement de l'acier} = 205 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{\sigma_{yacier}}{\sigma} = \frac{205}{8.95} = 22.91$$

Pour le reste des pièces, il n'est pas nécessaire de calculer les facteurs de sécurité puisque ceux-ci n'ont presque aucune contrainte.

## Évaluation des performances

Cette section établit la performance du bras conçu par l'équipe. Pour ce faire, la conception est comparée avec les spécifications présentées dans le cahier de charge et au début de ce rapport dans la section : Résumé du cahier de charge. Ci-dessous, les titres soulignés représentent les spécifications et l'objectif (cible visée). De plus, le résumé de l'évaluation des performances

tableau 28, à la fin de la section, présente le résumé de l'évaluation des performances ci-dessous.

### Oscillation maximale du bras (Objectif : 10 mm ou moins)

Il est difficile de mesurer l'oscillation maximale du bras théorique. En effet, l'équipe n'a aucun repère pour mesurer une quelconque oscillation puisque le bras n'existe pas physiquement. Pour cette raison, l'équipe s'abstient d'évaluer cette spécification.

### Distance à laquelle le préhenseur peut être utilisé (Objectif : 1,8 m ou plus)

En fonction de la conception, le bras mesure 1 750 mm lorsqu'il est à son plus long. Alors, il peut être utilisé à une distance de 1,75 m ce qui est 5 cm plus courts que le 1,8 m désiré.

### La longueur de la trajectoire linéaire possible (Objectif : 50 cm ou plus)

Le bras est en mesure d'effectuer une trajectoire linéaire d'un peu plus qu'un mètre. La trajectoire a été évaluée sur SolidWorks comme en témoigne la figure 66. Le plan le plus éloigné représente la distance du bras étendu et l'autre plan représente le plan le plus près du préhenseur tout en maintenant le préhenseur parallèle et à la même hauteur par rapport au sol. Ainsi, la distance entre ces deux plans est la longueur de la trajectoire linéaire possible, soit de 103 cm.

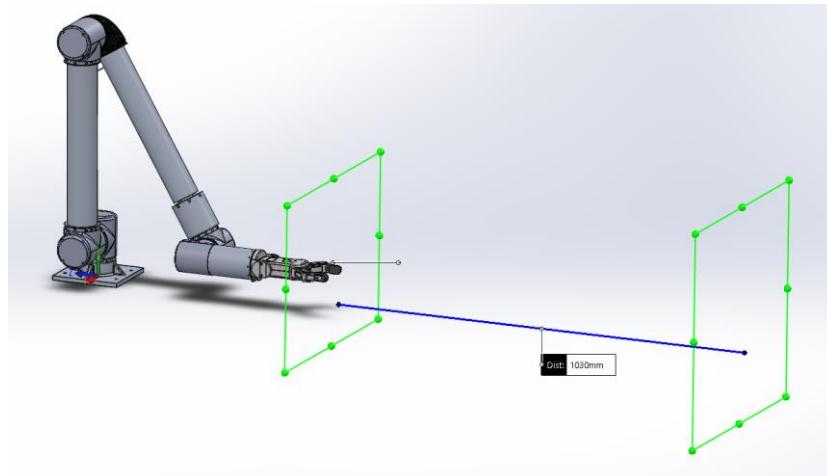


Figure 66: Trajectoire linéaire du bras

### Coût de fabrication (Objectif : 25 000 \$ CAD ou moins)

Comme abordé précédemment, l'achat des composants et la fabrication sont estimés à 19 000 \$ CAD. Cela est largement en dessous de la limite de 25 000 \$ CAD.

### Poids du bras (Objectif : 10 kg ou moins)

Selon la conception, le poids du bras est de 14,42 kg en comptant la base d'attache au robot et de 13,52 kg sans

compter la compter. Le bras pèse bien plus que l'objectif de 10 kg ou moins.

#### Nombre d'axes atteignables (Objectif : 5 axes ou plus)

Le bras est en mesure d'atteindre les 6 axes de l'espace. En effet, les six actionneurs rotatifs que le bras possède font en sorte qu'il peut atteindre toutes les poses.

#### Nombre de freins mécaniques (Objectif : 2 freins ou plus)

Les actionneurs de la compagnie « ZeroErr » ont été choisis en partie puisqu'ils sont munis de freins. Ainsi, le bras possède six freins, ce qui est trois fois plus que ce que la spécification demandait.

#### Précision du positionnement (Objectif : 10 mm ou moins)

La précision du positionnement est égale à l'addition des précisions des différents actionneurs et le préhenseur. La figure 67 présente le détail du calcul.

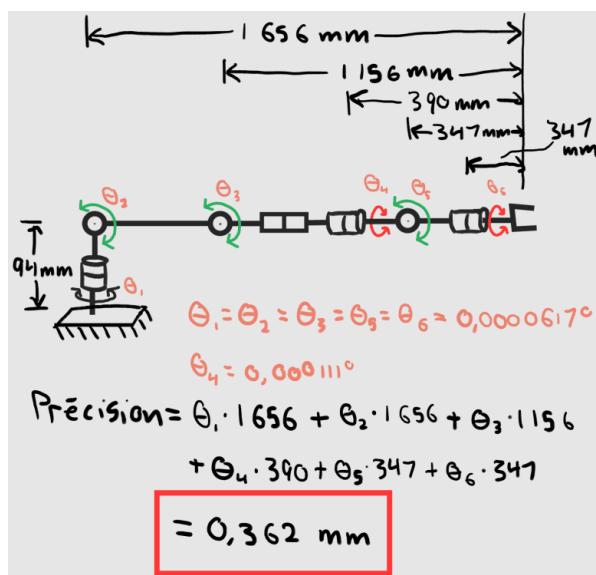


Figure 67: Précision du bras

La précision des angles provient des spécifications des actionneurs. Ainsi, en multipliant par la longueur du bras. Il est possible de déterminer la précision du mouvement. Cette dernière est de 0,362 mm ce qui est bien mieux que l'objectif de 10 mm.

#### Nombre de degrés de liberté (Objectif : 6 DDL ou plus)

Le bras est muni de six actionneurs rotatifs et un actionneur linéaire. Donc, le bras a 7 DDL. C'est un de plus que la spécification.

#### Bras arrête lors d'une collision (Objectif : oui)

Encore une fois, ce point est difficile à juger avant de le voir physiquement, mais c'est en partie pourquoi le bras possède plusieurs freins. Alors, étant donné les nombreux freins que le bras comprend, il est possible de croire que oui le bras s'arrêtera lors d'une collision. Le bras possède l'équipement pour arrêter. Il suffit ne suffit que de le programmer lors de la tâche de programmation.

Vitesse cartésienne linéaire du bras (Objectif : 25 cm/s ou plus)

Le calcul utilisé pour déterminer la vitesse cartésienne linéaire du bras est présenté sur la figure 68. La vitesse angulaire des actionneurs provient des spécifications du fournisseur. Donc, en faisant tourner les trois moteurs dans le même sens, une vitesse linéaire en résulte.

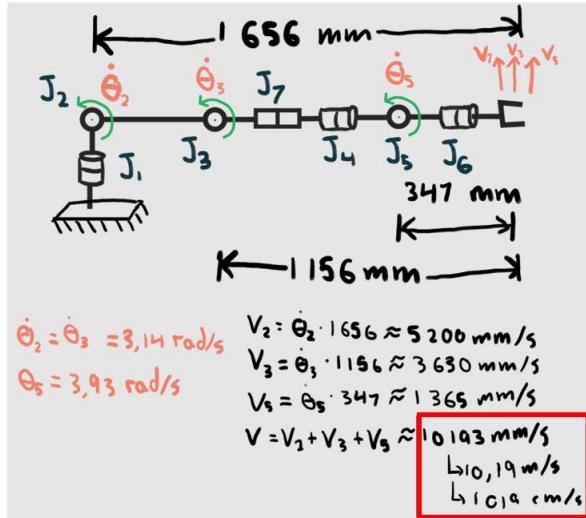


Figure 68: Vitesse cartésienne du bras

La vitesse obtenue est de 1 019 cm/s ce qui est extrêmement rapide. Toutefois, la vitesse utilisée correspond à la vitesse sans charge. Les courbes de la vitesse en fonction du couple ne sont pas disponibles sur le site du détaillant. Alors, l'équipe n'a pas eu le choix que d'utiliser les vitesses des actionneurs à vide, même si une charge y est appliquée. Il est impossible que cette vitesse soit réaliste. C'est beaucoup trop rapide.

Dernièrement, la vitesse calculée serait encore plus élevée si l'on faisait bouger tous les axes en mêmes temps. Ici, uniquement les actionneurs dans le même axe ont été évalués puisque c'est un cas que l'équipe jugeait réaliste pour un potentiel déplacement.

Indice d'étanchéité du bras (Objectif : IP55 ou plus)

L'étanchéité a été déterminée en trouvant la pièce critique. En effet, le bras ne peut être étanche qu'à l'étanchéité de la composante la moins étanche. En d'autres termes, l'IP d'un composant le plus faible correspond à l'étanchéité du bras.

Les actionneurs rotatifs ont un indice IP de 65. L'indice IP du préhenseur est de 54. Donc, le niveau d'étanchéité du bras est IP54.

Charge qu'il peut soulever (Objectif : 2,2 kg ou plus)

Le bras peut soulever une charge de 2,2 kg. En revanche, il ne peut pas le faire dans n'importe quelle position. Cela a été abordé précédemment dans le rapport. Le bras ne peut soulever la charge en extension totale de 1,75 m, mais il peut la soulever lorsqu'il est en position plus ergonomique comme le requiert la compétition auquel le club étudiant CAPRA va participer.

## Résumé de l'évaluation des performances

Tableau 28: Résumé de l'évaluation des performances

Évaluation des performances				
Spécification	Objectif	Cible	Réussi	Valeur
Oscillation maximale du bras (mm)	↓	10	-	-
La distance à laquelle le préhenseur peut être utilisé (m)	↑	1,8	Non	1,75
La longueur de la trajectoire linéaire possible (cm)	↑	50	Oui	103
Le coût de fabrication (\$ CAD)	↓	25 000	Oui	19 000
Le poids du bras (kg)	↓	10	Non	14,42
Le nombre d'axes atteignables	↑	5	Oui	6
Le nombre de freins mécaniques	↑	2	Oui	6
La précision du positionnement (mm)	↑	10	Oui	0,342
Le nombre de degrés de liberté du manipulateur	↑	6	Oui	7
Le bras arrête lors d'une collision	↑	Oui/Non	Oui	-
La vitesse cartésienne linéaire du bras (cm/s)	↑	25	Oui	-
L'indice d'étanchéité du bras	↑	IP55	Non	IP54
La charge qu'il peut soulever (kg)	↑	2,2	Oui	2,2

## **Conclusion et recommandations**

En guise de fermeture, nous avons partiellement atteint notre objectif. Nous avons réussi à accomplir la conception d'un bras robotique à 7 DDL et à présenter ces différents livrables :

1. Liste des composants à acheter
2. Liste des pièces à fabriquer
3. Coût total
4. Prototype virtuel sous forme de CAO
5. Schéma de l'espace de travail du robot
6. Contrôle direct du robot
7. Conception de l'interface de commande pour les actionneurs

Cependant cette conception ne respecte pas trois des critères de conception définis dans le cahier de charges :

1. Notre bras mesure seulement 1,75 m et donc nous n'avons pas atteint notre objectif de longueur de 1,80 m. En effet, nous comptions sur la conception de notre actionneur linéaire pour aller chercher une plus grande distance et le ratio de distance d'allongement/longueur rétractée désiré n'était pas atteignable.
2. Aussi, le bras pèse 14.42 kg et donc nous n'avons pas atteint notre objectif de poids de 10 kg.
3. L'indice d'étanchéité de IP55 n'est pas atteint.

Tous les autres critères sont respectés et les trois critères non respectés sont près de leur limite alors nous jugeons que notre conception est satisfaisante. Surtout au niveau du coût qui est drastiquement plus bas que ce qui était attendu (autour de 19 000 \$ au lieu de 25 000 \$). De plus, nous avons surmonté le principal défi d'ingénierie qui était d'être capable d'aller chercher une masse de 2,2 kg avec un bras permettant une longue étendue de 1,75 m grâce à la conception de notre actionneur linéaire.

Comme recommandations sur le projet, il serait pertinent de refaire ce qui est à la suite de l'actionneur linéaire. En effet, comme expliqué dans la section « Contrôle du robot » du rapport (Dans les livrables pour le club étudiant), le bras ne possède pas de centre dans son poignet et cela amène une complexité au niveau du contrôle joint par joint pour un utilisateur potentiel et aussi une difficulté logiciel au niveau de la résolution de l'équation de cinématique inverse. Mais tout n'est pas perdu, nous sommes confiants que les composants qui viennent avant le poignet (joint 1, 2, 3 et 7) sont bien conçus et seulement le poignet sera à refaire. De plus, cet été, un étudiant de génie de la production automatisée (gpa) aura la tâche de concevoir un préhenseur qui pourra être ajouté à notre projet afin de le compléter.

## Livrables pour le club étudiant CAPRA

Cette section fait part de tous livrables supplémentaires que le club étudiant CAPRA demande. L'équipe les ont mis à la fin puisque ceux-ci sont moins du domaine de la mécanique et plus du domaine du génie de la production automatisé (gpa). Néanmoins, il est pertinent de les présenter dans le rapport.

### Enveloppe de travail

L'enveloppe de travail du robot permet de visualiser les positions et orientations qu'il peut atteindre. Avec les longueurs présentées dans le tableau 19, il est possible de trouver la longueur totale du bras. Comme les longueurs L<sub>1</sub> et L<sub>5</sub> ne contribuent pas à la longueur totale du bras dû à leur orientation dans l'espace, le calcul de longueur totale est le suivant :

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + D_7 + L_4 + L_5 + L_6 = 1\ 750 \text{ mm}$$

Cette longueur maximale (L) est seulement atteinte lorsque le bras est placé à la verticale. La longueur maximale (L - L<sub>0</sub>) lorsque le bras est placé à l'horizontale est plutôt :

$$L - L_0 = L_2 + L_3 + D_7 + L_4 + L_5 + L_6 = 1\ 655,75 \text{ mm}$$

### Vue de côté, vue de haut et vue de face

Il aurait été intéressant de présenter des mesures en fonction de la distance du robot, mais comme il n'existe pas encore, cela n'est pas possible. Cependant, en visualisant les différentes vues de l'enveloppe du travail, il est possible d'arriver à certaines recommandations ; le bras devrait être positionné le plus possible vers l'avant du robot afin d'aller chercher un maximum de longueur vers l'avant et placé au centre par rapport aux côtés.

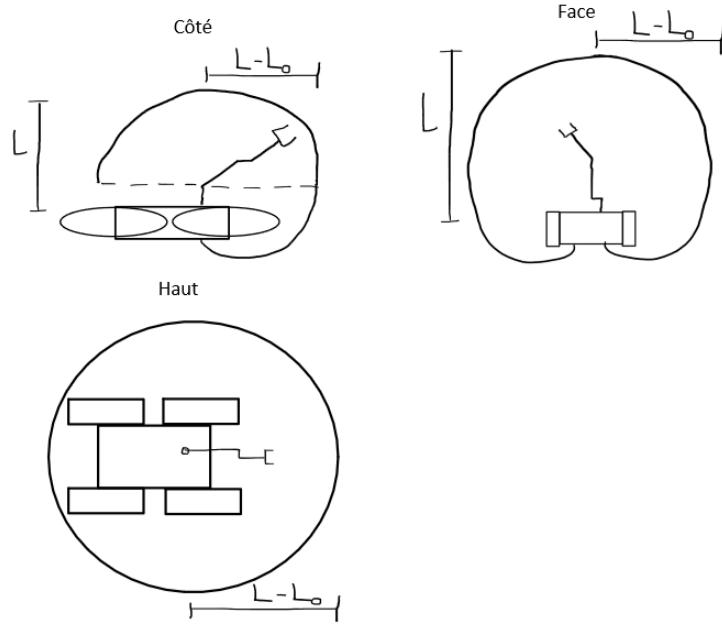


Figure 69: Enveloppe de travail du bras

NOTE : Les dessins ne sont pas à l'échelle

## Contrôle du robot

Afin de caractériser les différents repères (joints) de notre robot, la méthode Denavit-Hartenberg standard sera utilisée. Celle-ci permet de simplifier le travail, car elle permet de donner la position relative de 2 repères dans l'espace avec seulement 4 paramètres (au lieu de 6 avec d'autres méthodes). Elle permet de modéliser le robot à l'aide d'outil informatique. C'est aussi un standard en robotique pour les robots sériels à plusieurs degrés de liberté. Veuillez prendre note que l'axe z des référentiels représente l'axe de rotation des joints.

Voici les différents 4 paramètres qui seront utilisés :

$\theta_i$  : Angle pour aligner  $x_{i-1}$  et  $x_i$  autour de  $z_{i-1}$

$d_i$  : Distance de  $x_{i-1}$  vers  $x_i$  le long de  $z_{i-1}$

$a_i$  : Distance de  $z_{i-1}$  vers  $z_i$  le long de  $x_{i-1}$

$\alpha_i$  : Angle pour aligner  $z_{i-1}$  avec  $z_i$  autour de  $x_i$

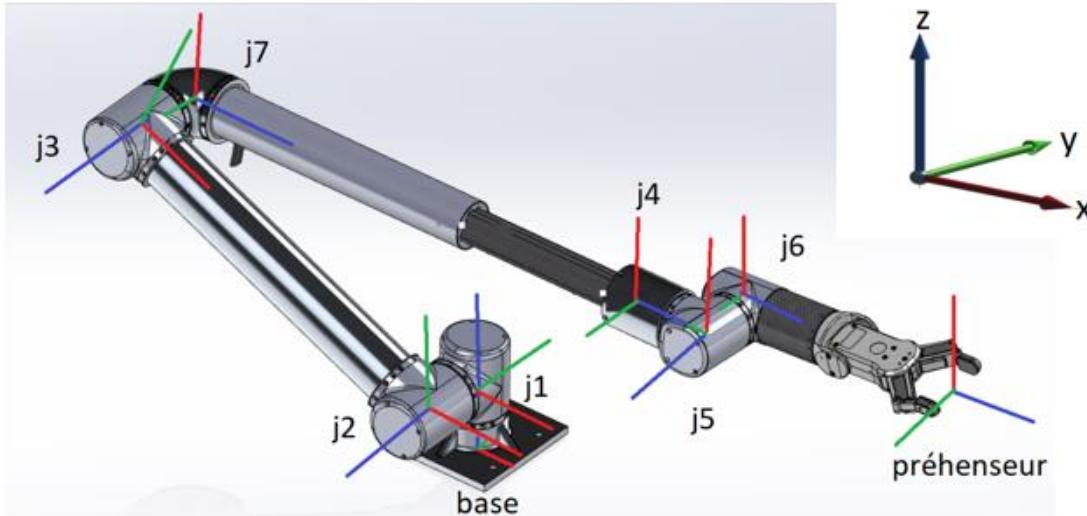


Figure 70: Référentiels des joints du robot

La configuration des joints de notre robot pour donc être exprimé par les paramètres suivant :

Tableau 29: Paramètres de la table DH

i	$\theta_i$ ( $^{\circ}$ )	$d_i$ (mm)	$a_i$ (mm)	$\alpha_i$ ( $^{\circ}$ )
1	$\Theta_1$	L0	0	0
2	$\Theta_2$	0	0	-90
3	$\Theta_3$	L1	L2	0
7	0	0	0	0
4	$\Theta_4$	103,2	0	-90
5	$\Theta_5$	L3+D7+L4	0	90
6	$\Theta_6$	L5	0	-90

### Cinématique directe

La cinématique directe permet de faire le contrôle du bras avec des mouvements joints. En connaissant l'angle de chaque joint, il est possible de calculer la position cartésienne et l'orientation du préhenseur à l'aide de la matrice de transformation  $H_{\text{outil}}^{\text{base}}$  qui serait déterminée ci-dessus.

D'abord, notre table DH nous permet de déterminer la matrice de transformation homogène entre chaque joint à l'aide de la formule suivante :

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_i^{i-1} &= \mathbf{H}_{\text{rot},z}(\theta_1) \mathbf{H}_{\text{trans}}(0, 0, d_i) \mathbf{H}_{\text{trans}}(a_i, 0, 0) \mathbf{H}_{\text{rot},x}(\alpha_1) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Voici les différentes matrices de transformation calculées entre les différents joints du robot :

$$H_{\text{base}}^1 = \begin{bmatrix} \cos(x1) & 0. & \sin(x1) & 0. \\ \sin(x1) & 0. & -\cos(x1) & 0. \\ 0. & 1. & 0. & 98. \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix} H^1_2 = \begin{bmatrix} \cos(x2) & 0. & -\sin(x2) & 0. \\ \sin(x2) & 0. & \cos(x2) & 0. \\ 0. & -1. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix} H^2_3 = \begin{bmatrix} \cos(x3) & 0. & -\sin(x3) & 500 \cdot \cos(x3) \\ \sin(x3) & 0. & \cos(x3) & 500 \cdot \sin(x3) \\ 0. & -1. & 0. & 98. \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix}$$

$$H^3_4 = \begin{bmatrix} \cos(x4) & 0. & -\sin(x4) & 0. \\ \sin(x4) & 0. & \cos(x4) & 0. \\ 0. & -1. & 0. & 103.2 \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix} H^4_5 = \begin{bmatrix} \cos(x5) & 0. & \sin(x5) & 0. \\ \sin(x5) & 0. & -\cos(x5) & 0. \\ 0. & 1. & 0. & d7+581.3 \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix} H^5_6 = \begin{bmatrix} \cos(x6) & 0. & -\sin(x6) & 0. \\ \sin(x6) & 0. & \cos(x6) & 0. \\ 0. & -1. & 0. & 85. \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix}$$

$$H_{\text{outil}}^6 = \begin{bmatrix} 1. & 0. & 0. & 0. \\ 0. & 1. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 1. & 347.03 \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix}$$

Ensuite, en multipliant toutes ces matrices entre-elles, il est possible de trouver la matrice de transformation du préhenseur par rapport au référentiel de la base (Annexe VII) :

$$H_{\text{base}}^1 * H^1_2 * H^2_3 * H^3_4 * H^4_5 * H^5_6 * H_{\text{outil}}^6 = H_{\text{outil}}^{\text{base}}$$

Finalement, cette matrice exprime la position et l'orientation du préhenseur par rapport à la base en fonction des coordonnées articulaires de chaque joint et permet d'utiliser le contrôle en cinématique directe.

### Position verticale

Dans la matrice de transformation homogène : les 3 premières lignes de la dernière colonne (le vecteur position T) expriment la position relative du préhenseur par rapport à la base en coordonnées cartésienne x,y,z ; alors que les 3 premières lignes des 3 premières colonnes (la matrice de rotation R) expriment l'orientation relative du préhenseur par rapport à la base. Dans la matrice suivante, on remarque que les référentiels sont dans la même orientation (diagonale de 1) et qu'ils sont seulement décalés de 90,15 mm en x et de 1 750 mm en z; la longueur recherchée.

$$H_{\text{base outil}}^{\text{base}} = \begin{bmatrix} 1. & 0. & 0. & 90.15 \\ 0. & 1. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 1. & 1750. \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix}$$

### Position compacte (position zéro)

Les 7 variables sont  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, D7, \Theta_4, \Theta_5, \Theta_6$ . En corrigeant les angles pour avoir la configuration désirée, on peut associer la position zéro du robot lorsque toutes les variables sont égales à 0 à la configuration compacte :

$$H_{\text{base outil}}^{\text{base}} = \begin{bmatrix} 1. & 0. & 0. & -79.19 \\ 0. & 0. & -1. & 231.93 \\ 0. & 1. & 0. & 200.29 \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix}$$

On remarque le vecteur position qui exprime la position relative ainsi que la matrice de rotation qui exprime une simple rotation autour de l'axe x de 90°.

### Cinématique inverse

La cinématique inverse permet de trouver l'angle des joints nécessaire pour un contrôle en position du préhenseur.

Le robot est redondant, car nous avons 7 axes afin de résoudre les 6 DDL dans l'espace. Notre solution est que le contrôle du joint 7 (prismatique) soit accompli indépendamment du reste du robot afin de contraindre le robot à 6 DDL lors de génération de trajectoires en cinématique inverse. La variable D7 est donc traitée comme une constance avec une valeur de 0 (rétracté) ou 227,42mm (étendu).

Le robot n'est pas découplable. C'est-à-dire que l'origine des axes des joints 4-5-6 ne s'intersecte pas à un point communément appelé « centre du poignet ». En général, cette configuration anthropomorphique est désirée dans un bras robot, car cela permet de séparer le calcul de cinématique inverse en deux dans le but de le simplifier. Les axes 1-2-3 seront responsables de la position alors que les axes 4-5-6 seront responsables de l'orientation afin d'atteindre la pose désirée.

Bref, la solution serait trop complexe à calculer et à présenter dû à la taille de la matrice trouvée (Annexe VII).

## **Contrôleur et interface de commande des moteurs**

### **Type de contrôleur**

Pour le contrôleur du bras robot, nous allons aller avec le Jetson Nano de NVIDIA.

Le Jetson Nano est un petit ordinateur puissant, il est composé de :

- GPU : Maxwell 128 cœurs,
- CPU : ARM A57 quadricœurs à 1.43GHZ
- Mémoire : 4Go LPDDR4 64 bits 25,6Go/s

À noter aussi que cette nouvelle version du Jetson Nano peut effectuer plusieurs réseaux de neurones en parallèle pour des applications d'intelligence artificielle.



**Figure 71: Kit de développement Jetson Nano**

### **Type de communication entre contrôleur, actionneurs et autre composant électronique**

Pour ce qui est de la communication proprement dite, nous allons utiliser un système d'exploitation ROS2 pour le contrôle des actionneurs.

Pour la commande des actionneurs, nous avons besoin de connaître les types de communications possibles avec les actionneurs :

- Pour les actionneurs rotatifs eRob, ils ont deux types de communication EtherCAT et CANopen,
- Pour l'actionneur linéaire de nous avons besoin d'un pilote de moteur DC
- Pour le préhenseur on peut communiquer par RS485 est un type de communication en série ou par communication parallèle (digital entrée/ sortie).

Le Jetson Nano possède des GPIO programmables et facilite la connexion entre le Jetson Nano et les actionneurs. De plus, nous allons utiliser une carte d'extension que nous allons monter sur le Jetson voir figure 72 gauche.

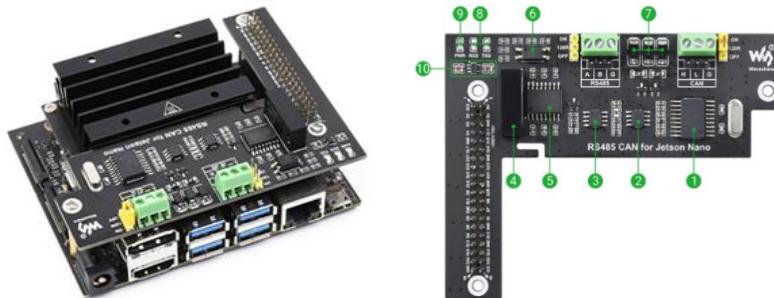


Figure 72: Montage Jetson Nano avec une carte d'extension RS485 CANopen

### Commande des actionneurs par le contrôleur

Pour réaliser la commande des actionneurs par le contrôleur, nous devons effectuer d'abord le câblage entre actionneurs et contrôleur puis installer les pilotes nécessaires à la commande de ces actionneurs enfin de programmer la commande.

### Câblages

- Câblage entre contrôleur et actionneur rotatif
- Câblage entre contrôleur et actionneur linéaire
- Câblage entre contrôleur et préhenseur

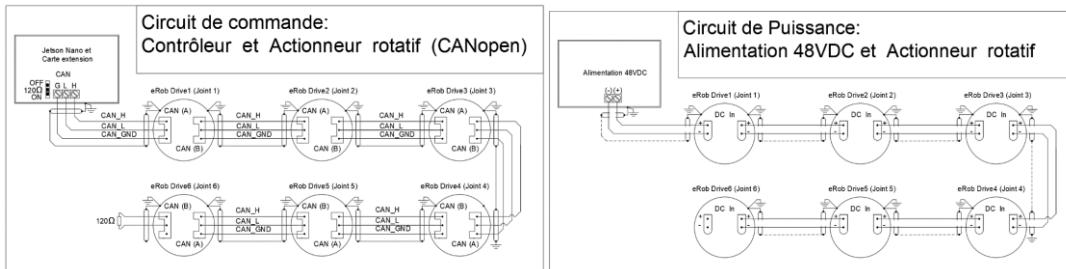


Figure 73: Circuit de commande et circuit de puissance

### Installation des pilotes

- Installation du pilote de la carte d'extension RS485 CANopen pour Jetson Nano
- Installations de système d'exploitation ROS2
- Installations de pilote CANopen pour ROS2

### Installation des bibliothèques de la carte d'extension RS485 CAN pour Jetson Nano

- sudo apt-get install minicom
- sudo apt-get install python-pip nano
- sudo pip installer pyserial
- sudo pip installer spidev==3.1

---

## Programmation

Pour contrôler le bras robot, on va utiliser un système d'exploitation propre au robot qu'on appelle ROS (Robot Operating System). Dans ce projet allons utiliser ROS2 version humble.

Dans cette partie nous allons faire un programme de test pour les moteurs en ROS2 CANopen.

### 1. Création du projet

```
$ mkdir -p ~/ovis_pfe_ws/src  
$ cd ~/ovis_pfe_ws  
$ colcon build --symlink-install  
$ sudo apt upgrade  
$ sudo rosdep init  
$ rosdep update
```

### 2. Clone du répertoire ROS2 CANopen

```
$ cd ~/ovis_pfe_ws/src  
$ git clone https://github.com/ros-industrial/ros2\_canopen.git  
$ cd ..  
$ rosdep install --from-paths src/ros2_canopen --ignore-src -r -y  
$ colcon build
```

### 3. Pour plus de détails, cliquez [ici](#)

## Références

- Bernard, M. (2022). PFE-MEC-H23-001-Conception d'un manipulateur robotique d'un véhicule de sauvetage pour le club étudiant CAPRA. Document inédit, Génie mécanique, ÉTS, Montréal.
- BostonDynamics. (s.d.). Spot Arm [PDF]. Repéré à <https://www.bostondynamics.com/sites/default/files/inline-files/spot-arm.pdf>
- Buymetal. (s.d.). Aluminum round bar 6061-T6\T613 [Site web]. Repéré à <https://store.buymetal.com/aluminum/round-bar/6061-t6-t651/aluminum-round-bar-6061-t6-t651-3.html>
- Capra. (2022). Capra : Robot. Repéré à : <https://www.clubcapra.com/>
- Fahim, S. R., Sarker, Y., & Sarker, S. K. (2020). Modeling and development of a five DoF vision based remote operated robotic arm with transmission control protocol. *SN Applied Science* (2020), 2(1263). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3039-y>
- Fedak, V., Ďurovsky, F., & Üveges, R. (2014). Analysis of Robotic System Motion in SimMechanics and MATLAB GUI Environment. MATLAB Applications for the Practical Engineer. <http://dx.doi.org/10.5772/58371>
- Gouvernement du Canada. (2018). Canadarm2, le bras robotisé canadien de la station spatiale : Fiche technique. Repéré à <https://www.asc-csa.gc.ca/fra/iss/canadarm2/>
- Habibian, S., Dadvar, M., & Peykari, B. (2021). Design and implementation of a maxi-sized mobile robot (Karo) for rescue missions. *Robomech journal*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40648-020-00188-9>
- Laifual Drive (s.d.). LSD shorten thin harmonic gearbox. Repéré à <https://www.laifualgroup.com/products/lsd-shorten-thin-harmonic-gearbox/#features>
- Made in China. (s.d.). 80 mm DC brosse//électrique avec moteur BLDC 90V (MB080FG200). Repéré à [https://fr.made-in-china.com/co\\_exmekmade/product\\_80mm-DC-Brush-Electrical-BLDC-Motor-with-90V-MB080FG200- hihingoog.html](https://fr.made-in-china.com/co_exmekmade/product_80mm-DC-Brush-Electrical-BLDC-Motor-with-90V-MB080FG200- hihingoog.html)
- Mayr. (2022). ROBA – servostop [PDF]. Repéré à [https://www.mayr.com/produkte/dokumentationen/p.898000.v05.fr\\_08\\_11\\_2022.pdf](https://www.mayr.com/produkte/dokumentationen/p.898000.v05.fr_08_11_2022.pdf)
- Megalingam, R. K., Raagul Vadivel, S. R., & Rajendraprasad, A. (2022). Development and evaluation of a search-and-rescue robot Paripreksya 2.0 for WRS 2020. *Advanced robotics*, 36(21), 1120-1133. <https://doi.org/10.1080/01691864.2022.2117575>
- Motion & control NSK. (2009). NSK standard ball screws : Compact FA Model [PDF]. Repéré à <https://www.nsk.com/common/data/ctrpPdf/precision/e3239b.pdf>
- Nanotec. (2023). DF45L024048-A2 – Brushless DC motor. Repéré à <https://us.nanotec.com/products/1787-df45l024048-a2>
- Onrobot. (s.d.). Datasheet : RG2 [PDF]. Repéré à [https://onrobot.com/sites/default/files/documents/Datasheet\\_RG2\\_v1.4\\_EN.pdf](https://onrobot.com/sites/default/files/documents/Datasheet_RG2_v1.4_EN.pdf)
- Rimpault, X. (s.d.). MEC592 : Projet de conception de machines. École de technologie supérieure
- Rhéaume, F-E., Champliaud, H., & Liu, Z. (2009). Understanding and modelling the torsional stiffness of harmonic drives through finite-element method. *Journal of mechanical engineering science*, 223(2), 515-524. Doi: <https://doi.org/10.1080/09541540802600010>

<https://doi.org/10.1243/09544062JMES949>

Robotiq. (s.d.). Mains à 2 doigts 2F-85 et 2F-140. Repéré à <https://robotiq.com/fr/produits/main-adaptative-a-2-doigts-2f85-140>

Robotis. (s.d.). Robotis hand RH-P12-RN. Repéré à <https://www.robotis.us/robotis-hand-rh-p12-rn/>

Senring. (s.d.). H through hole slip ring series (through bore slip ring). Repéré à <https://www.senring.com/through-hole-slip-ring/>

Wagnac, É., Guilbault, R. (2022). MEC795 : Projet de fin d'études en génie mécanique. École de technologie supérieure.

World robot summit. (2020). WRC: Challenge. Repéré à <https://wrs.nedo.go.jp/en/wrs2020/challenge/>

ZeroErr. (s.d.). eRob rotary actuators build robot fast. Repéré à [https://en.zeroerr.cn/rotary\\_actuators](https://en.zeroerr.cn/rotary_actuators)

## Annexe I

### Script Matlab des couples statiques

```

%% Initialisation
clear;
clc;
format longG; % Change de format scientifique à décimal

%% Définition des variables (À CHANGER PAR L'UTILISATEUR)
% Nombre d'actionneurs (Config à 6 ou 7 DDL)
DDL = 6;

% Charge dans le préhenseur (Charge à soulever)
m = 0; % kg

% Longueurs des membrures (Links) % Si 6 DDL, mettre l7 = 0 %
l1 = 100; % mm
l2 = 500; % mm
l3 = 100; % mm
l4 = 800; % mm
l5 = 0; % mm
l6 = 300; % mm
l7 = 0; % mm

% Masses des membrures (Links) % Si 6 DDL, mettre m_l7 = 0 %
m_l1 = 0; % kg
m_l2 = 0; % kg
m_l3 = 0; % kg
m_l4 = 0; % kg
m_l5 = 0; % kg
m_l6 = 0; % kg
m_l7 = 0; % kg

% Masses des actionneurs (Joints) % Si 6 DDL, mettre m_j7 = 0 %
m_j1 = 1.5; % kg
m_j2 = 2.6; % kg
m_j3 = 1.94; % kg

```

---

```
m_j4 = 0.93; % kg
m_j5 = 0.77; % kg
m_j6 = 1.25; % kg
m_j7 = 0; % kg

% Angles des actionneurs (Joints) % Rotation des 3 actionneurs selon Y %
% À 6 DDL,
a_1 = 0; % rad (Représente le DDL 2)
a_2 = 0; % rad (Représente le DDL 3)
a_3 = 0; % rad (Représente le DDL 5 si config à 6 DDL, Représente le DDL 6 si config à 7 DDL)

%% Calculs intermédiaires
% Poids de la masse
W = m*9.81; % N
% Centre de gravité des membrures
c1 = 0; % mm
c2 = (l2*cos(a_1))/2; % mm
c3 = (l3*cos(a_1+a_2))/2; % mm
c4 = (l4*cos(a_1+a_2))/2; % mm
c5 = (l5*cos(a_1+a_2))/2; % mm
c6 = (l6*cos(a_1+a_2+a_3))/2; % mm
c7 = (l7*cos(a_1+a_2+a_3))/2; % mm

% Poids des membrures
W_l1 = m_l1*9.81; % N
W_l2 = m_l2*9.81; % N
W_l3 = m_l3*9.81; % N
W_l4 = m_l4*9.81; % N
W_l5 = m_l5*9.81; % N
W_l6 = m_l6*9.81; % N
W_l7 = m_l7*9.81; % N

% Poids des actionneurs
W_j1 = m_j1*9.81; % N
W_j2 = m_j2*9.81; % N
W_j3 = m_j3*9.81; % N
W_j4 = m_j4*9.81; % N
W_j5 = m_j5*9.81; % N
```

W\_j6 = m\_j6\*9.81; % N

W\_j7 = m\_j7\*9.81; % N (Actuateur linéaire)

%% Calculs du couple aux joints (Moteurs/Actuateurs)

% Masse totale

M = m\_j1+m\_j2+m\_j3+m\_j4+m\_j5+m\_j6+m\_j7+m\_l1+m\_l2+m\_l3+m\_l4+m\_l5+m\_l6+m\_l7; % kg

% Longueur du bras étendu

L = c2\*2+c3\*2+c4\*2+c5\*2+c6\*2+c7\*2; % mm

% Couples aux joints

**if** DDL==7 T7 = W\*c7\*2 + W\_l7\*c7 % N.mm

T6 = W\*(c7+c6)\*2 + W\_l7\*(c7+c6\*2) + W\_j7\*c6\*2 + W\_l6\*c6 % N.mm

T5 = W\*(c7+c6+c5)\*2 + W\_l7\*(c7+c6\*2+c5\*2) + W\_j7\*(c6+c5)\*2 + W\_l6\*(c6+c5\*2) + W\_j6\*c5\*2 + W\_l5\*c5 % N.mm

T4 = W\*(c7+c6+c5+c4)\*2 + W\_l7\*(c7+c6\*2+c5\*2+c4\*2) + W\_j7\*(c6+c5+c4)\*2 + W\_l6\*(c6+c5\*2+c4\*2) + W\_j6\*(c5+c4)\*2 + W\_l5\*(c5+c4\*2) + W\_j5\*c4\*2 + W\_l4\*c4 % N.mm

---

```

T3 = W*(c7+c6+c5+c4+c3)*2 + W_l7*(c7+c6*2+c5*2+c4*2+c3*2) + W_j7*(c6+c5+c4+c3)*2 + W_l6*(c6+c5*2+c4*2+c3*2) + W_j6*(c5+c4+c3)*2 + W_l5*(c5+c4*2+c3*2) + W_j5*(c4+c3)*2 + W_l4*(c4+c3*2) + W_j4*c3*2 + W_l3*c3 % N.mm
T2 = W*(c7+c6+c5+c4+c3+c2)*2 + W_l7*(c7+c6*2+c5*2+c4*2+c3*2+c2*2) + W_j7*(c6+c5+c4+c3+c2)*2 + W_l6*(c6+c5*2+c4*2+c3*2+c2*2) + W_j6*(c5+c4+c3+c2)*2 + W_l5*(c5+c4*2+c3*2+c2*2) + W_j5*(c4+c3+c2)*2 + W_l4*(c4+c3*2+c2*2) +
W_j4*(c3+c2)*2 + W_l3*(c3+c2*2) + W_j3*c2*2 + W_l2*c2 % N.mm
T1 = T2; % N.mm

elseif DDL==6
    T6 = W*c6*2 + W_l6*c6 % N.mm
    T5 = W*(c6+c5)*2 + W_l6*(c6+c5*2) + W_j6*c5*2 + W_l5*c5 % N.mm
    T4 = W*(c6+c5+c4)*2 + W_l6*(c6+c5*2+c4*2) + W_j6*(c5+c4)*2 + W_l5*(c5+c4*2) + W_j5*c4*2 + W_l4*c4 % N.mm
    T3 = W*(c6+c5+c4+c3)*2 + W_l6*(c6+c5*2+c4*2+c3*2) + W_j6*(c5+c4+c3)*2 + W_l5*(c5+c4*2+c3*2) + W_j5*(c4+c3)*2 + W_l4*(c4+c3*2) + W_j4*c3*2 + W_l3*c3 % N.mm
    T2 = W*(c6+c5+c4+c3+c2)*2 + W_l6*(c6+c5*2+c4*2+c3*2+c2*2) + W_j6*(c5+c4+c3+c2)*2 + W_l5*(c5+c4*2+c3*2+c2*2) + W_j5*(c4+c3+c2)*2 + W_l4*(c4+c3*2+c2*2) + W_j4*(c3+c2)*2 + W_l3*(c3+c2*2) + W_j3*c2*2 + W_l2*c2 % N.mm
    T1 = T2; % N.mm
    %T1 = W*(c6+c5+c4+c3+c2+c1)*2 + W_l6*(c6+c5*2+c4*2+c3*2+c2*2+c1*2) + W_j6*(c5+c4+c3+c2+c1)*2 + W_l5*(c5+c4*2+c3*2+c2*2+c1*2) + W_j5*(c4+c3+c2+c1)*2 + W_l4*(c4+c3*2+c2*2+c1*2) + W_j4*(c3+c2+c1)*2 + W_l3*(c3+c2*2+c1*2) +
    W_j3*(c2+c1)*2 + W_l2*(c2+c1*2) + W_j2*c1*2 + W_l1*c1 % N.mm
elseif DDL>7
    fprintf('DDL doit être 6 ou 7')
else
    fprintf('DDL doit être 6 ou 7')
end

```

## Annexe II

Analyse statique en changeant les longueurs des membrures de la configuration à 6 DDL.

Itération #1									Itération #2											
Spécification du bras									Spécification du bras											
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	asse actuate	Valeur	Unité	Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	asse actuate	Valeur	Unité			
L1	100	mm	m_L1	0,56	kg	m_J1	0	kg	L1	100	mm	m_L1	0,56	kg	m_J1	0	kg			
L2	800	mm	m_L2	4,44	kg	m_J2	0	kg	L2	800	mm	m_L2	4,44	kg	m_J2	0	kg			
L3	150	mm	m_L3	0,83	kg	m_J3	0	kg	L3	100	mm	m_L3	0,56	kg	m_J3	0	kg			
L4	750	mm	m_L4	4,17	kg	m_J4	0	kg	L4	700	mm	m_L4	3,89	kg	m_J4	0	kg			
L5	50	mm	m_L5	0,28	kg	m_J5	0	kg	L5	100	mm	m_L5	0,56	kg	m_J5	0	kg			
L6	50	mm	m_L6	0,28	kg	m_J6	0	kg	L6	100	mm	m_L6	0,56	kg	m_J6	0	kg			
Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur									Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur											
M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité	M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité	M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	
	T6	69	N.mm		T6	2521	N.mm		T6	274,68	N.mm		T6	5180	N.mm	T6	274,68	N.mm		
	T5	275	N.mm		T5	5160	N.mm		T5	1098,72	N.mm		T5	10903	N.mm	T5	275	N.mm		
	T4	19735	N.mm		T4	61428	N.mm		T4	22146,08	N.mm		T4	66231	N.mm	T4	22146,08	N.mm		
	T3	27306	N.mm		T3	76356	N.mm		T3	27335,57	N.mm		T3	76231	N.mm	T3	27335,57	N.mm		
	T2	88364	N.mm		T2	176654	N.mm		T2	88471	N.mm		T2	176761	N.mm	T2	88471	N.mm		
	T1	88364	N.mm		T1	176654	N.mm		T1	88471	N.mm		T1	176761	N.mm	T1	88471	N.mm		
Itération #3									Itération #4											
Spécification du bras									Spécification du bras											
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	asse actuate	Valeur	Unité	Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	asse actuate	Valeur	Unité			
L1	100	mm	m_L1	1,94	kg	m_J1	0	kg	L1	100	mm	m_L1	0,15	kg	m_J1	0	kg			
L2	360	mm	m_L2	1,94	kg	m_J2	0	kg	L2	800	mm	m_L2	1,26	kg	m_J2	0	kg			
L3	360	mm	m_L3	1,94	kg	m_J3	0	kg	L3	100	mm	m_L3	0,15	kg	m_J3	0	kg			
L4	360	mm	m_L4	1,94	kg	m_J4	0	kg	L4	600	mm	m_L4	0,95	kg	m_J4	0	kg			
L5	360	mm	m_L5	1,94	kg	m_J5	0	kg	L5	0	mm	m_L5	0	kg	m_J5	0	kg			
L6	360	mm	m_L6	1,94	kg	m_J6	0	kg	L6	300	mm	m_L6	0,47	kg	m_J6	0	kg			
Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur									Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur											
M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité	M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité	M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	
	T6	3426	N.mm		T6	21084	N.mm		T6	2457	N.mm		T6	17172	N.mm	T6	2457	N.mm		
	T5	13703	N.mm		T5	49019	N.mm		T5	2457	N.mm		T5	17172	N.mm	T5	2457	N.mm		
	T4	30831	N.mm		T4	83805	N.mm		T4	22087	N.mm		T4	66232	N.mm	T4	22087	N.mm		
	T3	54810	N.mm		T3	125442	N.mm		T3	27267	N.mm		T3	76317	N.mm	T3	27267	N.mm		
	T2	85641	N.mm		T2	173931	N.mm		T2	88324	N.mm		T2	176614	N.mm	T2	88324	N.mm		
	T1	85641	N.mm		T1	173931	N.mm		T1	88324	N.mm		T1	176614	N.mm	T1	88324	N.mm		
Itération #5									Itération #6											
Spécification du bras									Spécification du bras											
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	asse actuate	Valeur	Unité	Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	asse actuate	Valeur	Unité			
L1	100	mm	m_L1	0,56	kg	m_J1	0	kg	L1	100	mm	m_L1	0,56	kg	m_J1	0	kg			
L2	1500	mm	m_L2	8,33	kg	m_J2	0	kg	L2	100	mm	m_L2	0,56	kg	m_J2	0	kg			
L3	100	mm	m_L3	0,56	kg	m_J3	0	kg	L3	100	mm	m_L3	0,56	kg	m_J3	0	kg			
L4	100	mm	m_L4	0,56	kg	m_J4	0	kg	L4	1500	mm	m_L4	8,33	kg	m_J4	0	kg			
L5	0	mm	m_L5	0	kg	m_J5	0	kg	L5	0	mm	m_L5	0	kg	m_J5	0	kg			
L6	100	mm	m_L6	0,56	kg	m_J6	0	kg	L6	100	mm	m_L6	0,56	kg	m_J6	0	kg			
Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur									Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur											
M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité	M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité	M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	
	T6	275	N.mm		T6	5180	N.mm		T6	275	N.mm		T6	5180	N.mm	T6	275	N.mm		
	T5	275	N.mm		T5	5180	N.mm		T5	275	N.mm		T5	5180	N.mm	T5	275	N.mm		
	T4	1099	N.mm		T4	10909	N.mm		T4	69803	N.mm		T4	148283	N.mm	T4	69803	N.mm		
	T3	2472	N.mm		T3	17187	N.mm		T3	78799	N.mm		T3	162183	N.mm	T3	78799	N.mm		
	T2	88481	N.mm		T2	176771	N.mm		T2	88344	N.mm		T2	176634	N.mm	T2	88344	N.mm		
	T1	88481	N.mm		T1	176771	N.mm		T1	88344	N.mm		T1	176634	N.mm	T1	88344	N.mm		

### Annexe III

Analyse statique en changeant le poids des actionneurs de la configuration à 6 DDL.

Itération #11								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Isse actuate	Valeur	Unité
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg
L2	800	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg
L3	150	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg
L4	750	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg
L5	50	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1	kg
L6	50	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,5	kg

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur

M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité
	T6	0	N.mm		T6	2453	N.mm
T5	245	N.mm	T5	5150	N.mm		
T4	11282	N.mm	T4	52974	N.mm		
T3	14960	N.mm	T3	64010	N.mm		
T2	44390	N.mm	T2	132680	N.mm		
T1	44390	N.mm	T1	132680	N.mm		

Itération #12								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membru	Valeur	Unité	Isse actuate	Valeur	Unité
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg
L2	800	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg
L3	100	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg
L4	700	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg
L5	100	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1	kg
L6	100	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,5	kg

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur

M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité
	T6	0	N.mm		T6	4905	N.mm
T5	491	N.mm	T5	10301	N.mm		
T4	10791	N.mm	T4	54936	N.mm		
T3	13244	N.mm	T3	62294	N.mm		
T2	42674	N.mm	T2	130964	N.mm		
T1	42674	N.mm	T1	130964	N.mm		

Itération #13								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Isse actuate	Valeur	Unité
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg
L2	360	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,25	kg
L3	360	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg
L4	360	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg
L5	360	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1	kg
L6	360	mm	m_L6	0	kg	m_J6	1	kg

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur

M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité
	T6	0	N.mm		T6	17658	N.mm
T5	3532	N.mm	T5	38848	N.mm		
T4	10595	N.mm	T4	63569	N.mm		
T3	21190	N.mm	T3	91822	N.mm		
T2	36199	N.mm	T2	124489	N.mm		
T1	36199	N.mm	T1	124489	N.mm		

Itération #14								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membru	Valeur	Unité	Isse actuate	Valeur	Unité
L1	100	mm	m_L1	0,15	0	m_J1	1,5	kg
L2	800	mm	m_L2	1,26	0	m_J2	1,75	kg
L3	100	mm	m_L3	0,15	0	m_J3	1,25	kg
L4	600	mm	m_L4	0,95	0	m_J4	1	kg
L5	0	mm	m_L5	0	0	m_J5	1	kg
L6	300	mm	m_L6	0,47	0	m_J6	0,5	kg

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur

M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité
	T6	0	N.mm		T6	14715	N.mm
T5	0	N.mm	T5	14715	N.mm		
T4	8829	N.mm	T4	52974	N.mm		
T3	11282	N.mm	T3	60332	N.mm		
T2	40712	N.mm	T2	129002	N.mm		
T1	40712	N.mm	T1	129002	N.mm		

Itération #15								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Isse actuate	Valeur	Unité
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg
L2	1500	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg
L3	100	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg
L4	100	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg
L5	0	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1	kg
L6	100	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,5	kg

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur

M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité
	T6	0	N.mm		T6	4905	N.mm
T5	0	N.mm	T5	4905	N.mm		
T4	1472	N.mm	T4	11282	N.mm		
T3	3924	N.mm	T3	18639	N.mm		
T2	59105	N.mm	T2	147395	N.mm		
T1	59105	N.mm	T1	147395	N.mm		

Itération #16								
Spécification du bras								
Longueur	Valeur	Unité	Masse membru	Valeur	Unité	Isse actuate	Valeur	Unité
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg
L2	100	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg
L3	100	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg
L4	1500	mm	m_L4	0	kg	m_J4	0,5	kg
L5	0	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1	kg
L6	100	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,5	kg

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur

M=0 kg	Couple	Valeur	Unité	M=5 kg	Couple	Valeur	Unité
	T6	0	N.mm		T6	4905	N.mm
T5	0	N.mm	T5	4905	N.mm		
T4	22073	N.mm	T4	100553	N.mm		
T3	24035	N.mm	T3	107420	N.mm		
T2	27713	N.mm	T2	116003	N.mm		
T1	27713	N.mm	T1	116003	N.mm		

## Annexe IV

Analyse statique en changeant le poids des actionneurs de la configuration à 7 DDL

Configuration à 7 DDL - Itération #1									
Spécification du bras									
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Masse actuateurs	Valeur	Unité	
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg	
L2	600	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg	
L3	100	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg	
L4	200	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg	
L5	[300 600]	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1,25	kg	
L6	150	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,75	kg	
L7	150	mm	m_L7	0	kg	m_J7	0,5	kg	

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actuateur linéaire fermé)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	
T7	0	N.mm	T7	7358	N.mm	T7	0	N.mm	
T6	734	N.mm	T6	15451	N.mm	T6	0	N.mm	
T5	4415	N.mm	T5	33845	N.mm	T5	3679	N.mm	
T4	9320	N.mm	T4	48560	N.mm	T4	6131	N.mm	
T3	12753	N.mm	T3	56898	N.mm	T3	9565	N.mm	
T2	40712	N.mm	T2	114286,5	N.mm	T2	46843	N.mm	
T1	40712	N.mm	T1	114286,5	N.mm	T1	46843	N.mm	

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actuateur linéaire ouvert)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	
T7	0	N.mm	T7	7358	N.mm	T7	0	N.mm	
T6	736	N.mm	T6	15451	N.mm	T6	0	N.mm	
T5	8093	N.mm	T5	52238	N.mm	T5	37358	N.mm	
T4	12998	N.mm	T4	66953	N.mm	T4	3810	N.mm	
T3	16432	N.mm	T3	75292	N.mm	T3	12344	N.mm	
T2	44390	N.mm	T2	132680	N.mm	T2	50522	N.mm	
T1	44390	N.mm	T1	132680	N.mm	T1	50522	N.mm	

Configuration à 7 DDL - Itération #3									
Spécification du bras									
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Masse actuateurs	Valeur	Unité	
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg	
L2	700	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg	
L3	200	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg	
L4	0	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg	
L5	[300 600]	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1,25	kg	
L6	150	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,75	kg	
L7	150	mm	m_L7	0	kg	m_J7	0,5	kg	

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actuateur linéaire fermé)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	
T7	0	N.mm	T7	7358	N.mm	T7	0	N.mm	
T6	736	N.mm	T6	15451	N.mm	T6	0	N.mm	
T5	4415	N.mm	T5	33845	N.mm	T5	38405	N.mm	
T4	4415	N.mm	T4	33845	N.mm	T4	7358	N.mm	
T3	11282	N.mm	T3	50522	N.mm	T3	10791	N.mm	
T2	43900	N.mm	T2	117475	N.mm	T2	34090	N.mm	
T1	43900	N.mm	T1	117475	N.mm	T1	34090	N.mm	

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actuateur linéaire ouvert)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	
T7	0	N.mm	T7	7358	N.mm	T7	0	N.mm	
T6	736	N.mm	T6	15451	N.mm	T6	0	N.mm	
T5	8093	N.mm	T5	52238	N.mm	T5	3910	N.mm	
T4	8093	N.mm	T4	52238	N.mm	T4	12263	N.mm	
T3	14960	N.mm	T3	68915	N.mm	T3	15696	N.mm	
T2	47579	N.mm	T2	135869	N.mm	T2	38995	N.mm	
T1	47579	N.mm	T1	135869	N.mm	T1	38995	N.mm	

Configuration à 7 DDL - Itération #2									
Spécification du bras									
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Masse actuateurs	Valeur	Unité	
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg	
L2	800	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg	
L3	100	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg	
L4	100	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg	
L5	[300 600]	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1,25	kg	
L6	0	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,75	kg	
L7	200	mm	m_L7	0	kg	m_J7	0,5	kg	

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actuateur linéaire fermé)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	
T7	0	N.mm	T7	9810	N.mm	T7	0	N.mm	
T6	9810	N.mm	T6	9810	N.mm	T6	0	N.mm	
T5	28204	N.mm	T5	46598	N.mm	T5	3679	N.mm	
T4	35561	N.mm	T4	53955	N.mm	T4	16131	N.mm	
T3	43900	N.mm	T3	54336	N.mm	T3	9565	N.mm	
T2	120418	N.mm	T2	102760	N.mm	T2	117475	N.mm	
T1	120418	N.mm	T1	102760	N.mm	T1	10791	N.mm	

Configuration à 7 DDL - Itération #4									
Spécification du bras									
Longueur	Valeur	Unité	Masse membrures	Valeur	Unité	Masse actuateurs	Valeur	Unité	
L1	100	mm	m_L1	0	kg	m_J1	1,5	kg	
L2	500	mm	m_L2	0	kg	m_J2	1,75	kg	
L3	100	mm	m_L3	0	kg	m_J3	1,25	kg	
L4	100	mm	m_L4	0	kg	m_J4	1	kg	
L5	[400 800]	mm	m_L5	0	kg	m_J5	1,25	kg	
L6	0	mm	m_L6	0	kg	m_J6	0,75	kg	
L7	300	mm	m_L7	0	kg	m_J7	0,5	kg	

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actuateur linéaire fermé)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	
T7	0	N.mm	T7	14715	N.mm	T7	0	N.mm	
T6	14715	N.mm	T6	14715	N.mm	T6	0	N.mm	
T5	39240	N.mm	T5	63765	N.mm	T5	4905	N.mm	
T4	46598	N.mm	T4	71123	N.mm	T4	37358	N.mm	
T3	54336	N.mm	T3	79461	N.mm	T3	10791	N.mm	
T2	102760	N.mm	T2	127285	N.mm	T2	34090	N.mm	
T1	102760	N.mm	T1	127285	N.mm	T1	34090	N.mm	

Couple aux joints avec et sans masse dans le préhenseur (Actuateur linéaire ouvert)									
Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	Couple	Valeur	Unité	
T7	0	N.mm	T7	14715	N.mm	T7	0	N.mm	
T6	14715	N.mm	T6	14715	N.mm	T6	0	N.mm	
T5	39240	N.mm	T5	63765	N.mm	T5	4905	N.mm	
T4	46598	N.mm	T4	71123	N.mm	T4	37358	N.mm	
T3	54336	N.mm	T3	79461	N.mm	T3	10791	N.mm	
T2	102760	N.mm	T2	127285	N.mm	T2	34090	N.mm	
T1	102760	N.mm	T1						

## Annexe V

### Itération 2 du calcul des couples et choix des actionneurs

Itération #2					
Données			Calculs		
Moteur (J6)					
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
Modèle	eRob70HxxT	-	r (ouverture pince /2)	0,075	m
Masse	1,24	kg	$\omega_{mot}$	6,28	rad/s
Dimensions (ODxLxD)	73x99x18	mm	$t_{acc}$	0,25	s
Couple Max	46	N.m	Masse	2,2	kg
Couple Nominal	7	N.m	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
Vitesse rot. Moteur	60	RPM	Axe X		
Inertie de rotor (I <sub>m</sub> )	0,051	kg*m <sup>2</sup>	Couple au joint 6 (T <sub>6X</sub> )	1,504	N.m
Préhenseur			Couple admissible	7	N.m
Variables			Axe Y		
Masse	0,78	kg	Couple (T <sub>4Y</sub> )	10,43	N.m
Dimensions (LxIxEx)	213x149x36	mm			
Données bras					
Variables	Valeurs	Unités			
Masse membre L6 (m <sub>L6</sub> )	0,166	kg			
Longueur membre L6 (L <sub>6</sub> )	0,347	m			

Itération #2					
Données			Calculs		
Moteur (J5)					
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
Modèle	eRob70HxxT	-	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Dimensions (ODxLxD)	73x99x18	mm	Couple Max	61	N.m
Couple Max	61	N.m	Couple Nominal	10	N.m
Vitesse rot. Moteur	37,5	RPM	Vitesse rot. Moteur	37,5	RPM
Inertie de rotor (I <sub>m</sub> )	0,051	kg*m <sup>2</sup>	Axe Y		
Préhenseur			Inertie de rotor (I <sub>m</sub> )	0,051	kg*m <sup>2</sup>
Variables			Couple au joint 5 (T <sub>5</sub> )		
Masse	0,78	kg	12,28 N.m		
Dimensions (LxIxEx)	213x149x36	mm	Couple admissible		
Données bras			61 N.m		
Variables	Valeurs	Unités			
Masse membre L6 (m <sub>L6</sub> )	0,166	kg			
Longueur membre L6 (L <sub>6</sub> )	0,347	m			
Masse actionneur joint J6 (m <sub>J6</sub> )	1,24	kg			
Masse membre L5 (m <sub>L5</sub> )	0	kg			
Longueur membre L5 (L <sub>5</sub> )	0,043	m			
Masse actionneur joint J5 (m <sub>J5</sub> )	1,24	kg			
Masse membre L4 (L <sub>4</sub> )	0,24	kg			
Longueur membre L4 (L <sub>4</sub> ) (6 DDL)	0,6	m			
Longueur membre L4 (L <sub>4</sub> ) (7 DDL)	0,091	m			

Itération #2					
Données			Calculs		
Moteur (J4)					
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
Modèle	eRob70HxxT	-	r (Ø moteur /2)	0,0365	m
Masse	0,93	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Dimensions (ODxLxD)	73x99x18	mm	$t_{acc}$	0,25	s
Couple Max	61	N.m	Masse	2,2	kg
Couple Nominal	10	N.m	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
Vitesse rot. Moteur	37,5	RPM	Axe X		
Inertie de rotor (I <sub>m</sub> )	0,051	kg*m <sup>2</sup>	Couple au joint 4 (T <sub>4X</sub> )	0,862	N.m
Préhenseur			Couple admissible	10	N.m
Variables			Axe Y		
Masse	0,78	kg	Couple (T <sub>4Y</sub> ) (6 DDL)	46,09776879	N.m
Dimensions (LxIxEx)	213x149x36	mm	Couple (T <sub>4Y</sub> ) (7 DDL)	17,40632445	N.m
Données bras					
Variables	Valeurs	Unités			
Masse membre L6 (m <sub>L6</sub> )	0,166	kg			
Longueur membre L6 (L <sub>6</sub> )	0,347	m			
Masse actionneur joint J6 (m <sub>J6</sub> )	1,24	kg			
Masse membre L5 (m <sub>L5</sub> )	0	kg			
Longueur membre L5 (L <sub>5</sub> )	0,043	m			
Masse actionneur joint J5 (m <sub>J5</sub> )	1,24	kg			
Masse membre L4 (L <sub>4</sub> )	0,24	kg			
Longueur membre L4 (L <sub>4</sub> ) (6 DDL)	0,6	m			
Longueur membre L4 (L <sub>4</sub> ) (7 DDL)	0,091	m			

Itération #2					
Données			Calculs		
Préhenseur			Moteur (J7)		
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
Masse	0,78	kg	$\omega_{mot}$	0,00	rad/s
Dimensions (LxIxEx)	213x149x36	mm	$t_{acc}$	0,25	s
Données bras			Masse		
Variables	Valeurs	Unités	Masse	0	kg
Masse membre L6 (m <sub>L6</sub> )	0,166	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L6 (L <sub>6</sub> )	0,347	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J6 (m <sub>J6</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L5 (m <sub>L5</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L5 (L <sub>5</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J5 (m <sub>J5</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L4 (L <sub>4</sub> )	0,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L4 (L <sub>4</sub> ) (6 DDL)	0,6	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L4 (L <sub>4</sub> ) (7 DDL)	0,091	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J4 (m <sub>J4</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L3 (m <sub>L3</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L3 (L <sub>3</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J3 (m <sub>J3</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L2 (L <sub>2</sub> )	0,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L2 (L <sub>2</sub> ) (6 DDL)	0,6	m	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L2 (L <sub>2</sub> ) (7 DDL)	0,091	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J2 (m <sub>J2</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L1 (L <sub>1</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L1 (L <sub>1</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J1 (m <sub>J1</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L0 (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L0 (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J0 (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Longueur membre L (L <sub>0</sub> )	0,043	m	$t_{acc}$	0,25	s
Masse actionneur joint J (m <sub>J0</sub> )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,93	rad/s
Masse membre L (L <sub>0</sub> )	0	kg	$t$		

Itération #2					
Préhenseur			Moteur (J1)		
Variables	Valeurs	Unités	Variables	Valeurs	Unités
Masse	0,78	kg	Modèle	eRob80HxxT	-
Dimensions (LxIxE)	213x149x36	mm	Masse	1,94	kg
Données bras			Dimensions (ODxLxID)	85x111,8x18	mm
Variables	Valeurs	Unités	Couple Max	143	N.m
Masse membrure L6 ( $m_{L6}$ )	0,166	kg	Couple Nominal	31	N.m
Longueur membrure L6 ( $L_6$ )	0,347	m	Vitesse rot. Moteur	30	RPM
Masse actionneur joint J6 ( $m_{J6}$ )	1,24	kg	Inertie de rotor ( $I_m$ )	0,071	kg*m <sup>2</sup>
Masse membrure L5 ( $m_{L5}$ )	0	kg	Calculs		
Longueur membrure L5 ( $L_5$ )	0,043	m	Variables	Valeurs	Unités
Masse actionneur joint J5 ( $m_{J5}$ )	1,24	kg	$\omega_{mot}$	3,14	rad/s
Masse membrure L4 ( $L_4$ )	0,24	kg	$t_{acc}$	0,25	s
Longueur membrure L4 ( $L_4$ ) (6 DDL)	0,6	m	Masse	0	kg
Longueur membrure L4 ( $L_4$ ) (7 DDL)	0,091	m	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
Masse actionneur joint J4 ( $m_{J4}$ )	0,93	kg	Axe Z		
Masse actionneur J7 ( $m_{J7}$ )	1,5	kg	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) (6 DDL)	À déterminer avec le 3D	N.m
Longueur actionneur D7 ( $D_7$ )	0,392	m	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,4m$ (7 DDL)	À déterminer avec le 3D	N.m
Longueur actionneur D7 ( $D_7$ )	0,627	m	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,7m$ (7 DDL)	À déterminer avec le 3D	N.m
Masse membrure J3 ( $m_{J3}$ )	0,327	kg	Couple admissible	143	N.m
Longueur membrure L3 ( $L_3$ )	0,048	m	Axe Y		
Masse actionneur joint J3 ( $m_{J3}$ )	1,94	kg	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) (6 DDL)	76,74	N.m
Masse membrure L2 ( $m_{L2}$ )	0,77	kg	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,4m$ (7 DDL)	73,44	N.m
Longueur membrure L2 ( $L_2$ ) (6 DDL)	0,7	m	Couple au joint 1 ( $T_1$ ) avec $D_7=0,7m$ (7 DDL)	85,76	N.m
Longueur membrure L2 ( $L_2$ ) (7 DDL)	0,5	m			
Masse actionneur joint J2 ( $m_{J2}$ )	1,94	kg			

## Annexe VI

Conditions frontières des différentes analyses par éléments finis.

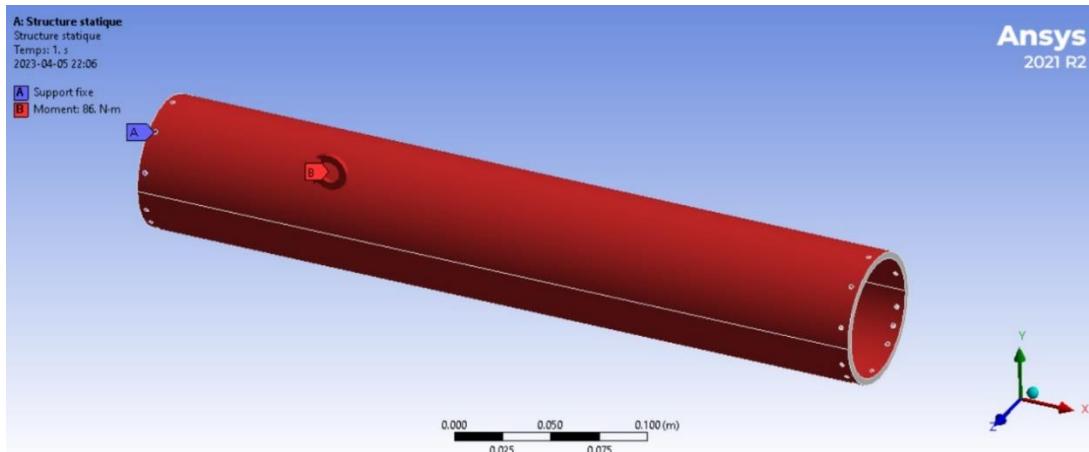


Figure 74: Conditions frontières de l'analyse par élément fini de la membrure 2

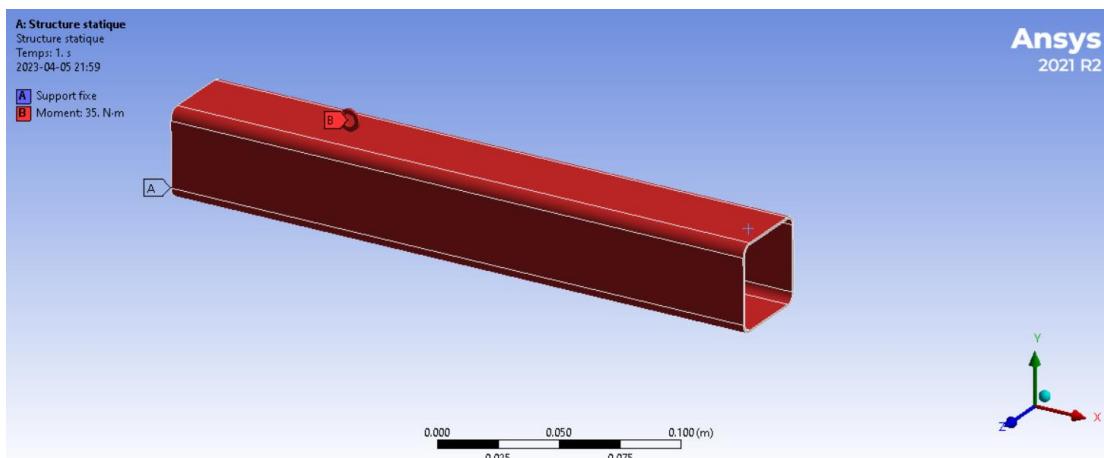


Figure 75: Conditions frontières de l'analyse par élément fini de l'actionneur linéaire

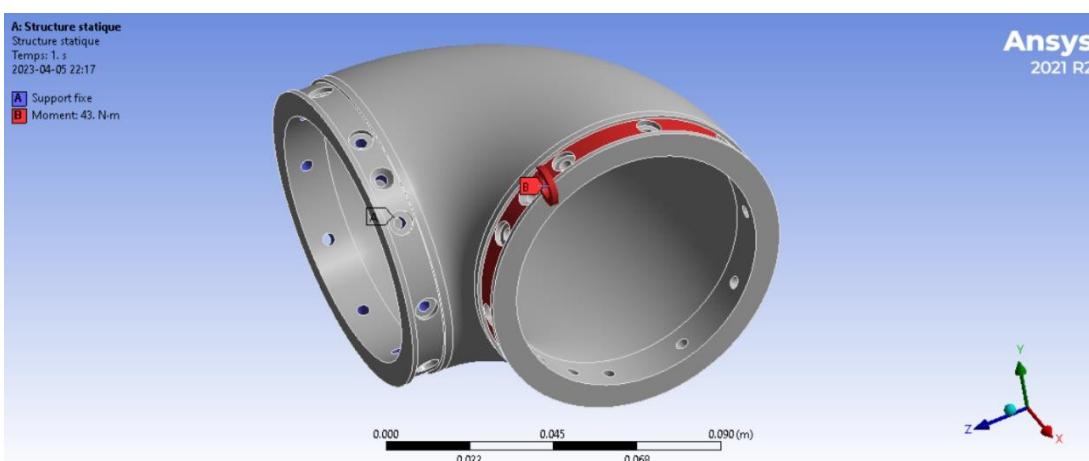


Figure 76: Conditions frontières de l'analyse par élément fini du coude

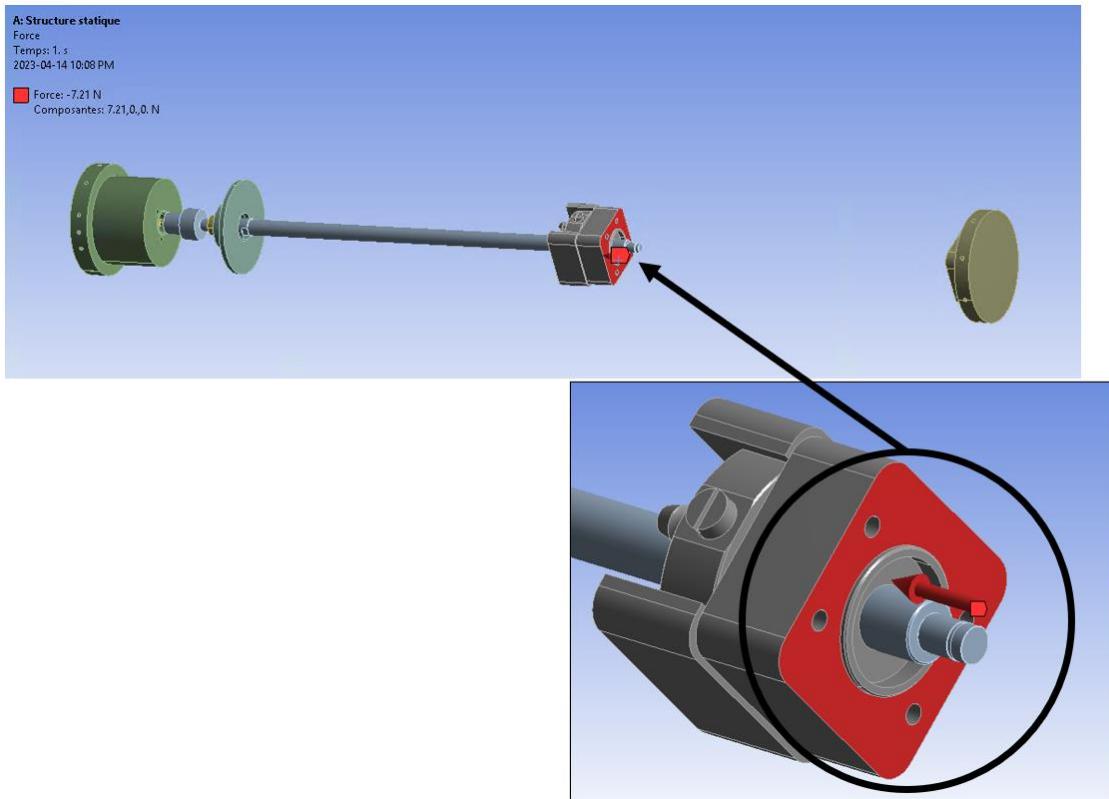


Figure 77 : Condition frontière de la force 7.21 N de l'actionneur linéaire

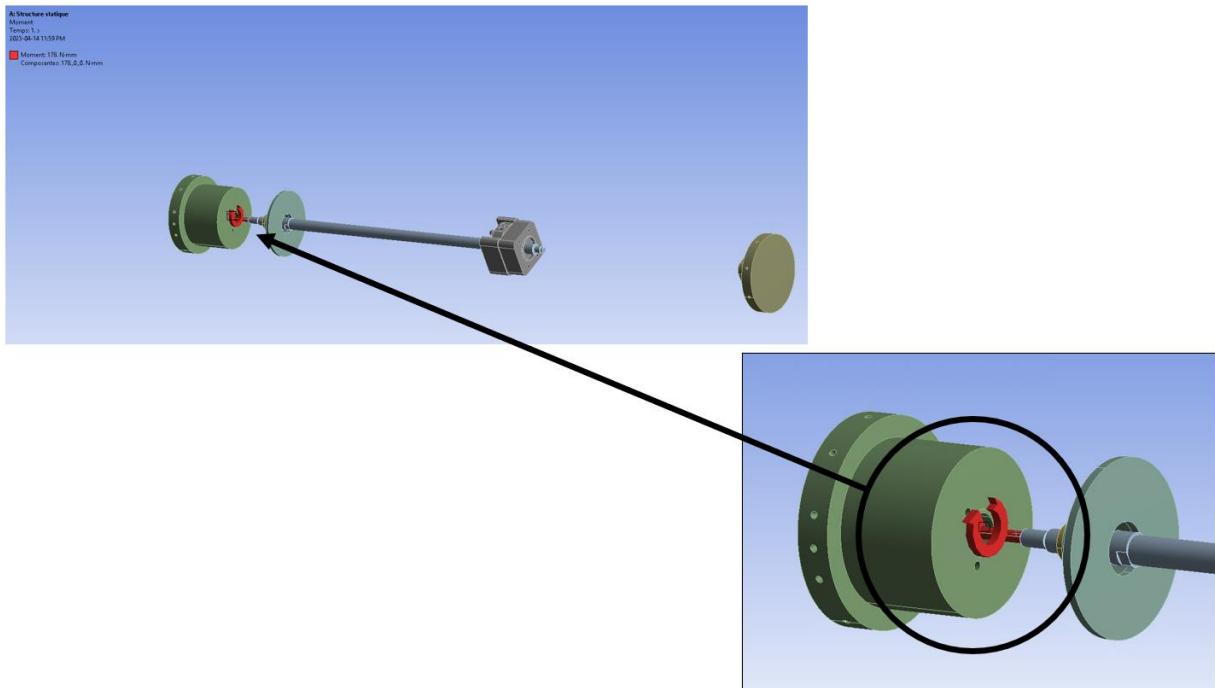


Figure 78 : Condition frontière du moment (178 Nmm) de l'actionneur linéaire

## Annexe VII

[[cos(x1)\*(cos(x2)\*(cos(x3)\*(cos(x4)\*cos(x5)\*cos(x6)-sin(x4)\*sin(x6))+sin(x3)\*(-cos(x4)\*sin(x6)-sin(x4)\*cos(x5)\*cos(x6)))+sin(x2)\*sin(x5)\*cos(x6))+sin(x1)\*(cos(x3)\*(-cos(x4)\*sin(x6)-sin(x4)\*cos(x5)\*cos(x6))+sin(x3)\*(sin(x4)\*sin(x6)-cos(x4)\*cos(x5)\*cos(x6))),-(cos(x1)\*(cos(x2)\*(cos(x3)\*cos(x4)-sin(x3)\*sin(x4)))\*sin(x5)-sin(x2)\*sin(x6))+sin(x1)\*(cos(x3)\*(sin(x4)\*cos(x5)\*sin(x6)-cos(x4)\*cos(x5)\*sin(x6))-cos(x4)\*cos(x6))+sin(x3)\*(cos(x4)\*cos(x5)\*sin(x6)+sin(x4)\*cos(x6)),d7\*(cos(x1)\*cos(x2)\*(cos(x3)\*sin(x4)+sin(x3)\*cos(x4))+sin(x1)\*(cos(x3)\*cos(x4)-sin(x3)\*sin(x4)))+cos(x1)\*(cos(x2)\*(cos(x3)\*(cos(x4)\*(85.\*sin(x5)-347.03\*cos(x5)\*sin(x6))+sin(x4)\*(-347.03\*cos(x6)-581.3)+499.9999999998)+sin(x3)\*(cos(x4)\*(-347.03\*cos(x6)-581.3)+sin(x4)\*(347.03\*cos(x5)\*sin(x6)-85.\*sin(x5))))+sin(x2)\*(-85.\*cos(x5)-347.03\*sin(x5)\*sin(x6)-103.2))+sin(x1)\*(cos(x3)\*(cos(x4)\*(-347.03\*cos(x6)-581.3)+sin(x4)\*(347.03\*cos(x5)\*sin(x6)-85.\*sin(x5)))+sin(x3)\*(cos(x4)\*(347.03\*cos(x5)\*sin(x6)-85.\*sin(x5))+sin(x4)\*(347.03\*cos(x6)+581.3)-499.9999999998)+98.000000000001)][cos(x1)\*(cos(x3)\*(cos(x4)\*sin(x6)+sin(x4)\*cos(x5)\*cos(x6))+sin(x3)\*(cos(x4)\*cos(x5)\*cos(x6)-sin(x4)\*sin(x6))+sin(x1)\*(cos(x2)\*(cos(x3)\*(cos(x4)\*cos(x5)\*cos(x6)-sin(x4)\*sin(x6))+sin(x3)\*(-cos(x4)\*sin(x6)-sin(x4)\*cos(x5)\*cos(x6)))+sin(x2)\*sin(x5)\*cos(x6)),-(cos(x1)\*(cos(x3)\*sin(x4)+sin(x3)\*cos(x4))\*sin(x5)+sin(x1)\*(cos(x2)\*(cos(x3)\*cos(x4)-sin(x3)\*sin(x4)))\*sin(x5)-sin(x2)\*sin(x6)),cos(x1)\*(cos(x3)\*(cos(x4)\*cos(x6)-sin(x4)\*sin(x6))+sin(x3)\*(-cos(x4)\*cos(x5)\*sin(x6)-sin(x4)\*cos(x6))+sin(x1)\*(cos(x2)\*(cos(x3)\*(-cos(x4)\*cos(x5)\*sin(x6)-cos(x4)\*cos(x6))+sin(x3)\*(sin(x4)\*cos(x5)\*sin(x6)-cos(x4)\*cos(x6)))-sin(x2)\*sin(x5)\*sin(x6),d7\*(cos(x1)\*(cos(x3)\*cos(x4)-sin(x3)\*sin(x4)))-sin(x1)\*cos(x2)\*(cos(x3)\*sin(x4)+sin(x3)\*cos(x4))+cos(x1)\*(cos(x3)\*(cos(x4)\*(347.03\*cos(x6)+581.3)+sin(x4)\*(85.\*sin(x5)-347.03\*cos(x5)\*sin(x6))+sin(x3)\*(cos(x4)\*(-347.03\*cos(x6)-581.3)+499.9999999998)-98.000000000001)+sin(x1)\*(cos(x2)\*(cos(x3)\*(cos(x4)\*(85.\*sin(x5)-347.03\*cos(x5)\*sin(x6))+sin(x2)\*(-85.\*cos(x5)-347.03\*sin(x5)\*sin(x6)-103.2)))]][sin(x2)\*(cos(x3)\*(cos(x4)\*cos(x5)\*cos(x6)-sin(x4)\*sin(x6))+sin(x3)\*(-cos(x4)\*sin(x6)-sin(x4)\*cos(x5)\*cos(x6)))-cos(x2)\*sin(x5)\*cos(x6),-(cos(x2)\*cos(x5)+sin(x2)\*(cos(x3)\*cos(x4)-sin(x3)\*sin(x4)))\*sin(x5),cos(x2)\*sin(x5)\*sin(x6)+sin(x2)\*(cos(x3)\*(-cos(x4)\*cos(x5)\*sin(x6)-sin(x4)\*cos(x6))+sin(x3)\*(sin(x4)\*cos(x5)\*sin(x6)-cos(x4)\*cos(x6))),-d7\*sin(x2)\*(cos(x3)\*sin(x4)+sin(x3)\*cos(x4))+cos(x2)\*(85.\*cos(x5)+347.03\*sin(x5)\*sin(x6)+103.2)+sin(x2)\*(cos(x3)\*(cos(x4)\*(85.\*sin(x5)-347.03\*cos(x5)\*sin(x6))+sin(x4)\*(-347.03\*cos(x6)-581.3)+499.9999999998)+sin(x3)\*(cos(x4)\*(-347.03\*cos(x6)-581.3)+sin(x4)\*(347.03\*cos(x5)\*sin(x6)-85.\*sin(x5))))+98.000000000001][0.,0.,0.,1.]]]