

PROJET DE FIN D'ETUDE

Rapport final

Conception et commande de l'organe terminal d'un robot médical



Matthias BOUDAUX, Zhuzhi FAN
19/06/2018

Table des matières

Remerciements	2
I. Description du projet	3
a. En quoi consiste-t-il ?	3
b. Objectif et évolution du projet.....	3
I. Partie I : Conception de la phase terminale du robot.....	4
a. Analyse fonctionnelle du besoin	4
i. Partie terminale du robot	4
ii. Support Amovible	7
b. Recherche de solutions	10
i. Partie perceuse.....	10
ii. Solutions techniques pour le mandrin	11
iii. Solutions techniques pour la glissière	18
c. Conception d'un prototype	21
i. Prototype	21
ii. Commande et pilotage du prototype.....	22
II. Partie II : Détermination des caractéristiques de perçage.....	27
a. Objectifs	27
b. Tests de perçage	27
c. Mise à jour du cahier des charges.....	37
i. Tableau récapitulatif	37
ii. Dimensionnement du système moteur + réducteur	38
III. Difficultés rencontrées pendant ce projet	40
IV. Suites possibles du projet	41
V. Conclusion.....	42
VI. Annexes	43
a. Annexe 1 : Caractéristiques de l'avant-bras du robot STAÜBLI TX60	43
b. Annexe 2 : Démontage de la perceuse Black et Decker :	44
c. Annexe 3 : Complément les informations envoyées par l'ordinateur à l'Arduino	47

Remerciements

Au terme de ce projet, nous tenions à remercier tout particulièrement Mr Richard MOREAU, enseignant chercheur au laboratoire Ampère à l'INSA de Lyon pour nous avoir aidé dans la réalisation de ce projet. Pendant ces cinq derniers mois, Richard nous a accompagné et apporté les différentes connaissances nécessaires pour passer les différentes étapes.

Nous tenons également à remercier Romain BUTTIN, Directeur scientifique à Sylorus Robotics, et Gautier DAUNE pour leurs explications, leur accompagnement et leur disponibilité lorsque nous en avons besoin.

Enfin, nous voulons remercier toutes les personnes du laboratoires Ampère qui nous ont aidé de près ou de loin dans ce projet.

I. Description du projet

a. En quoi consiste-t-il ?

L'entreprise Sylorus Robotics est une start-up créée en 2017 ayant pour objectif de développer un prototype de robot chirurgical capable d'assister des praticiens spécialistes du rachis pour la pose de vis pédiculaires dans le cadre d'une procédure courante appelée arthrodèse rachidienne par voie postérieure. Il s'agit d'une technique en chirurgie de la colonne vertébrale qui consiste à bloquer un segment mobile (disque intervertébral et articulaire postérieure) à long terme. Cette procédure longue, relativement complexe (Faible visibilité des corps anatomiques/ détermination de l'angulation etc.) et très risquée (une vis mal placée pouvant entraîner des complications neurologiques ou mécaniques sévères) peut être automatisée et sécurisée par un workflow robotique couplé à de l'imagerie médicale.

b. Objectif et évolution du projet

L'objectif du projet est de proposer un organe terminal pour un robot médical. Deux points seront principalement traités :

- Modification de l'organe terminal du robot industriel afin de porter les différents outils nécessaires pour réaliser l'opération.
- Intégration globale du robot et des accessoires dans la salle d'opération.

Cependant, différentes évolutions ont eu lieu au cours de ces trois derniers mois. Ce projet a démarré mi-février par une recherche documentaire sur l'opération d'arthrodèse rachidienne ainsi que sur une recherche des caractéristiques mécaniques de l'os de la colonne vertébrale. Cette dernière partie n'a pas abouti à des résultats concrets puisqu'aucun test n'a été effectué dans le passé. Cette zone étant trop complexe d'accès, aucun laboratoire de recherche n'a pu faire des expériences et sortir des caractéristiques mécaniques précises. Il nous était alors impossible de dimensionner la perceuse visseuse qui est censée faire cette opération chirurgicale.

De ce fait, il a été décidé avec Sylorus de modifier les objectifs principaux de ce projet. Il était peu productif de concevoir une solution non dimensionnée pour qu'elle soit abandonnée en Septembre prochain. Le nouvel objectif a donc été de concevoir un prototype afin de pouvoir réaliser des tests de perçage et ainsi connaître le couple et l'effort de compression nécessaire pour pouvoir réaliser l'opération d'arthrodèse rachidienne. Ceci permettra de compléter et de détailler le cahier des charges.

Dans ce rapport nous allons donc traiter deux parties. La première présentera la recherche de solution pour la perceuse. Elle permettra ainsi de déterminer la conception du prototype. Dans la deuxième partie, nous traiterons des tests réalisés pour connaître les caractéristiques de perçage.

I. Partie I : Conception de la phase terminale du robot

a. Analyse fonctionnelle du besoin

i. Partie terminale du robot

Fonctions principales

Cette partie du projet doit répondre aux deux fonctions principales ci-après :

- FP1 : Réaliser les opérations de perçage et de vissage au niveau de la colonne vertébrale du patient.
- FP2 : Doit permettre d'accueillir les trois outils spécifiques à cette opération (Fraise boule, foret, tournevis)

Fonctions contraintes

Plusieurs fonctions contraintes doivent être respectées :

- FC1 : Doit accueillir les outils d'une manière simple, rapide et sécurisable
- FC2 : Doit fonctionner à l'électricité
- FC3 : Etre petit et léger
- FC4 : Doit respecter les normes de salles blanches
- FC5 : Doit fonctionner de manière autonome
- FC6 : Doit être monté sur le robot STAÜBLI
- FC7 : Doit être utilisé sans danger

Diagramme des interacteurs

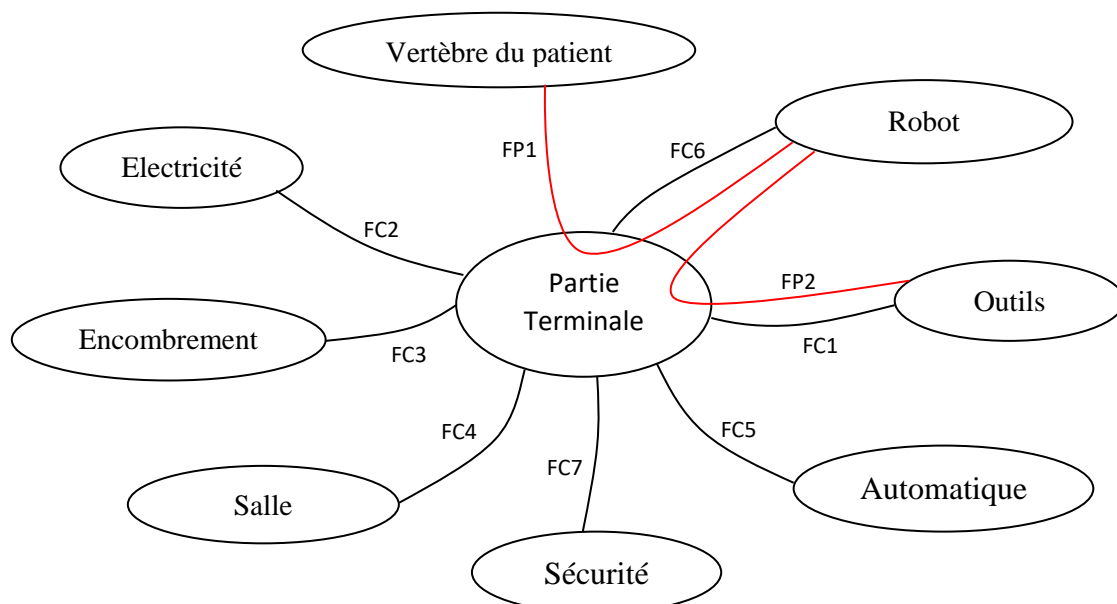


Figure 1 : Diagramme des interacteurs partie terminale

Caractérisation des fonctions

N°	Désignation de la fonction	Critère	Niveau	Limites	Flexibilité
FP1	Réaliser les opérations de perçage et de vissage au niveau de la colonne vertébrale du patient.	Vitesse de rotation Course Couple à transmettre	1000 tr/min 80mm 8 N.m	+/- 2mm +/- 2 N.m	F1
FP2	Doit accueillir les trois outils spécifiques à cette opération (Fraise boule, foret, tournevis)	Adaptabilité	Plans outils		F0
FC1	Doit accueillir les outils d'une manière simple, rapide et sécurisable	Sécurité Simplicité Rapidité	Test		F1
FC2	Doit fonctionner à l'électricité	Alimentation du laboratoire	Test		F0
FC3	Etre petit et léger	Volume limité Poids	6kg	+3 kg	F0
FC4	Doit respecter les normes de salles blanches	Stérilisation du système pour salles blanches	Normes ISO 14644-1		F0
FC5	Doit fonctionner de manière autonome	Capteur position Capteur d'effort sur outils			F1
FC6	Doit être monté sur le robot STAÜBLI	Adaptabilité sur Robot STAÜBLI TX60	Cf. annexe 1		F0
FC7	Doit être utilisé sans danger	Sécurité	Normes		F0

Détail des fonctions principales et contraintes

Fonctions principales :

FP1 : « Réaliser les opérations de perçage et de vissage au niveau de la colonne vertébrale du patient. »

But : Réaliser des perçages pour insérer des vis dans ces derniers

Raison : Aider les chirurgiens dans ces opérations qui apportent peu de valeur ajoutée si elles sont faites par le chirurgien.

Conclusion : Cette fonction permet de réduire le nombre d'opérations du chirurgien afin qu'il se concentre plus particulièrement sur les aspects médicaux. Il n'y a pas besoin d'être chirurgien pour faire des perçages et mettre des vis. Pour réaliser ces opérations, le système doit pouvoir mettre en rotation des outils ainsi qu'effectuer une translation. De plus, la rotation est gérée indépendamment de la translation. La fonction est validée.

FP2 : « Doit accueillir les trois outils spécifiques à cette opération (Fraise boule, foret, tournevis) »

But : S'adapter aux trois outils utilisés pendant l'opération

Raison : Les outils sont de formes différentes et il est important de pouvoir les monter sur le système

Conclusion : Trois outils (une fraise boule diam 10/12 mm ; un foret double : partie distale diam 3.2 mm, L=30mm, Partie proximale diam 4.5mm, L=50mm ; un tournevis : plans fournis par Sylorus Robotics) doivent pouvoir se monter sur le système de mise en rotation. Les outils

seront montés manuellement par les chirurgiens. La forme de l'outil au niveau du mandrin n'est pas prédéfinie. La fonction est validée.

Fonctions contraintes :

FC1 : « Doit accueillir les outils d'une manière simple, rapide et sécurisable »

But : Montage rapide et simple des outils sur le système

Raison : Limiter le temps de changement d'outils

Conclusion : Le système doit permettre un changement d'outil simple et rapide pour perdre le moins de temps possible lors de ces opérations annexes comparée à celles des opérations chirurgicales. La fonction est validée.

FC2 : « Doit fonctionner à l'électricité »

But : Tout le système doit fonctionner à l'électricité

Raison : Il n'est pas autorisé d'utiliser d'autre forme d'énergie dans des salles opératoires.

Conclusion : La fonction est validée.

FC3 : « Etre petit et léger »

But : Prendre le moins de place possible et ne pas surcharger le robot

Raison : Le robot nous impose une charge maximale de 9kg en bout de bras. L'environnement nous impose d'avoir un système avec un encombrement minimal

Conclusion : Il sera préférable d'avoir un système avec un poids de 6kg pour s'assurer de la bonne utilisation du robot. La fonction est validée.

FC4 : « Doit respecter les normes de salles blanches »

But : Etre utilisé dans les salles d'opération

Raison : Pour limiter les risques d'infection, les opérations chirurgicales ont lieu dans des salles stérilisées. Tous les équipements qui se trouvent à l'intérieur doivent donc être stérile de tous virus et bactéries.

Conclusion : Le système doit pouvoir être stérilisé pour respecter la norme ISO 14644-1. La fonction est validée.

FC5 : « Doit fonctionner de manière autonome »

But : Aucune intervention humaine

Raison : Simplicité d'utilisation

Conclusion : Des capteurs de position et des capteurs d'effort doivent être installés pour renseigner le chirurgien sur les opérations en cours et lui faire un retour sur l'état de l'opération. Les opérations de perçage et de vissage doivent être faites de manière complètement autonome. La mise en rotation et la translation doivent être gérées automatiquement sans intervention humaine. Le changement d'outils est fait manuellement par le chirurgien. La fonction est validée.

FC6 : « Doit être monté sur le robot STAÜBLI »

But : Etre utilisé avec le robot STAÜBLI TX60

Raison : Le robot a été choisi par Syrolus Robotics et le changement est impossible.

Conclusion : Le modèle du robot est imposé et le système doit s'adapter à celui-ci. La fonction est validée. Vous trouverez en annexe 1 les caractéristiques techniques (dimensionnement et sorties électriques de l'avant-bras du robot).

FC7 : « Doit être utilisé sans danger »

But : Assurer à l'utilisateur le respect des normes de sécurité

Raison : Il n'est pas possible de vendre un produit sans une homologation au préalable qui atteste du respect de la sécurité des utilisateurs.

Conclusion : Seuls les produits certifiés garantissent aux utilisateurs qualité et sécurité d'utilisation. La fonction est validée.

ii. Support Amovible

Fonctions principales

Cette partie du projet doit répondre aux deux fonctions principales ci-après :

- FP1 : Supporter le robot
- FS1 : Supporter le robot STAÜBLI avec les efforts qui sont engendrés par son utilisation
- FS2 : Contenir l'ordinateur de commande
- FP2 : Ranger les outils non utilisés et les présenter au robot quand nécessaire
- FS3 : Ranger les outils
- FS4 : Ranger les implants
- FS5 : Contenir divers outils des chirurgiens (scalpel...)

Fonctions contraintes

Plusieurs fonctions contraintes doivent être respectées :

- FC1 : Hauteur réglable
- FC2 : Doit respecter les normes de salles blanches
- FC3 : Doit fonctionner à l'électricité

Diagramme des interacteurs

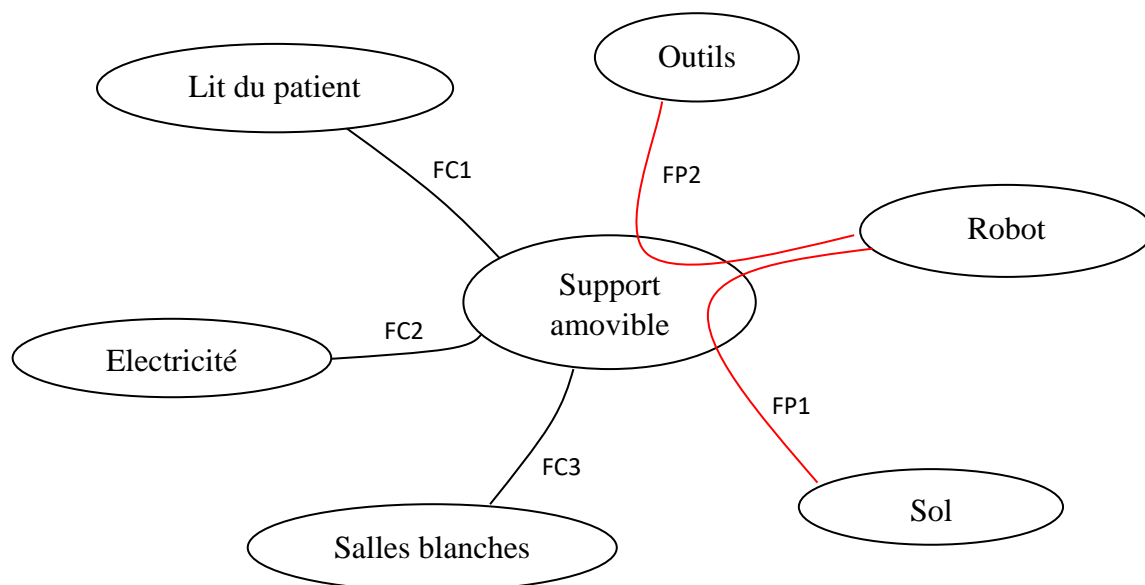


Figure 2 : Diagramme des interacteurs support amovible

Caractérisation des fonctions

N°	Désignation de la fonction	Critère	Niveau	Limites	Flexibilité
FP1	Supporter le robot				
FS1	Supporter le robot STAÜBLI avec les efforts qui sont engendrés par son utilisation	Poids Effort pendant l'opération	60 kg Test		F0
FS2	Contenir l'ordinateur de commande				F0
FP2	Ranger les outils non utilisés et les présenter au robot quand nécessaire				
FS3	Ranger les outils	Démontable Nettoyable Accès facile pour le robot	Test		F0
FS4	Ranger les implants	Emplacements pour implants	8	+/-2	F1
FS5	Contenir divers outils des chirurgiens (scalpel...)	Démontable Nettoyable			
FC1	Hauteur réglable	Course	Test		F0
FC2	Doit respecter les normes de salles blanches	Stérilisation du système pour salles blanches	Normes ISO 14644-1		F0
FC3	Doit fonctionner à l'électricité	Alimentation du laboratoire	Test		F0

Détail des fonctions principales et contraintes

Fonctions principales :

FP1 : « Supporter le robot »

But : Supporter le robot pour le mettre à l'emplacement voulu

Raison : Positionner le robot correctement par rapport au patient

Conclusion : Le support doit supporter le robot. Ce dernier doit être stable pendant l'opération mais il doit être déplaçable dans la salle d'opération lorsqu'il n'est pas utilisé. La fonction est validée.

FS1 : « Supporter le robot STAÜBLI avec les efforts qui sont engendrés par son utilisation »

But : Maintenir en place le robot pendant toute la durée de l'opération et pendant sa non utilisation

Raison : Le robot doit être au plus près du patient

Conclusion : Le support doit maintenir le robot STAÜBLI dans toutes les conditions (utilisation et repos) afin qu'il ait une position précise par rapport au patient. La fonction est validée.

FS2 : « Contenir l'ordinateur de commande »

But : Supporter l'ordinateur de commande du robot

Raison : Le robot est commandé par un ordinateur qui doit être présent à côté de lui

Conclusion : Le support doit permettre l'intégration de l'ordinateur de commande. La fonction est validée.

FP2 : « Ranger les outils non utilisés et les présenter au chirurgien quand nécessaire »

But : Ranger les outils, implants et outils divers

Raison : De nombreux outils et implants sont utilisés pendant l'opération.

Conclusion : Les outils et les implants doivent être rangés lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Ils doivent aussi être facilement accessibles par le robot. Les racks de rangements doivent être démontables du support pour être nettoyés. La fonction est validée.

FS3 : « Ranger les outils »

But : Ranger à proximité du robot les outils non utilisés et permettre une accessibilité à ces derniers.

Raison : Trois outils sont utilisés à différents moments de l'opération chirurgicale.

Conclusion : Les outils doivent être présents dans un rack de rangement qui est démontable du support pour être nettoyé. Il doit présenter les outils facilement pour que le robot puisse changer d'outils de manière autonome. La fonction est validée.

FS4 : « Ranger les implants »

But : Ranger et positionner les implants

Raison : Plusieurs implants sont utilisés dans un certain ordre.

Conclusion : Les implants sont rangés dans un certain ordre par le chirurgien. Ils sont ensuite utilisés par le robot. Ils doivent alors être facilement accessibles par le robot. Les racks de rangement doivent être démontables du support pour être nettoyés. La fonction est validée.

FS5 : « Contenir divers outils des chirurgiens (scalpel...) »

But : Contenir divers outils utilisés par le chirurgien

Raison : Divers outils sont utilisés pour préparer la zone de travail du robot

Conclusion : Les outils utilisés doivent pouvoir être posés facilement. Cette zone doit être également démontable du support pour être nettoyé. La fonction est validée.

Fonctions contraintes :

FC1 : « Doit être modifiable en hauteur »

But : S'adapter à la hauteur du patient dans la salle d'opération

Raison : Pour permettre les meilleures conditions de travail, la hauteur du patient peut varier

Conclusion : Le support doit être réglable en hauteur pour s'ajuster à la hauteur du patient. La fonction est validée.

FC2 : « Doit respecter les normes de salles blanches »

But : Être utilisé dans les salles d'opération

Raison : Pour limiter les risques d'infection, les opérations chirurgicales ont lieu dans des salles stérilisées. Tous les équipements qui se trouvent à l'intérieur doivent donc être stérile de tous virus et bactéries.

Conclusion : Le système doit pouvoir être stérilisé pour respecter la norme ISO 14644-1. La fonction est validée.

FC3 : « Doit fonctionner à l'électricité »

But : Tout le système doit fonctionner à l'électricité

Raison : Il n'est pas autorisé d'utiliser d'autre forme d'énergie dans des salles opératoires.

Conclusion : La fonction est validée.

b. Recherche de solutions

Pour pouvoir répondre à ce cahier des charges, nous avons décomposé la partie organe terminal du robot en deux sous-ensembles. Une partie perceuse et une partie glissière. Ces deux ensembles doivent fonctionner indépendamment dans le cas des perçages mais ils doivent aussi fonctionner ensemble dans le cas du vissage. Nous avons alors considéré deux sous-ensembles indépendants avec une motorisation pour chaque fonction. Il nous sera tout de même possible de piloter ces deux moteurs pour qu'ils soient cohérents.

Ces solutions ont été envisagées dans le cadre de la production d'un prototype. Ce dernier nous permettra alors de réaliser les différents tests de perçages que nous souhaitons. De plus, ces solutions permettront de faire une première étude pour la solution finale qui sera utilisée en tant qu'organe terminal. Nous apporterons pour chaque sous-ensemble, la solution qui répond le plus possible aux différents critères définis précédemment.

i. Partie perceuse

Les premières recherches de solutions sur cette fonction ont porté sur une perceuse qui pourrait directement être achetée dans le commerce. Cette solution nous paraissait le plus simple dans la conception mais également dans la production puisque tout le système de mise en rotation était fabriqué par un fournisseur extérieur. Cependant, toutes les perceuses existantes dans le commerce ne permettaient pas de répondre à toutes les contraintes que nous avons. Le choix a donc été fait de concevoir une nouvelle perceuse.

Afin de comprendre le fonctionnement d'une perceuse et de voir comment étaient agencés les différents composants, nous avons démonté une perceuse de la marque Black et Decker. Voir en annexe 2 le descriptif du démontage de la perceuse avec les caractéristiques de chaque composant.

Eléments devant être présents dans notre perceuse :

- Moteur électrique + driver
- Réducteur
- Mandrin

Le dimensionnement sera fait à la suite des tests décrits en partie II. Nous nous sommes fixés dans un premier temps des contraintes de 1000 tr/min et un couple maximum transmissible de 10 N.m.

Dans le cadre du prototype, nous allons utiliser le moteur et le réducteur double vitesse présents sur la perceuse Black et Decker. Il nous permettra de réaliser correctement les tests puisque nous savons qu'il est surdimensionné par rapport à l'application voulue.

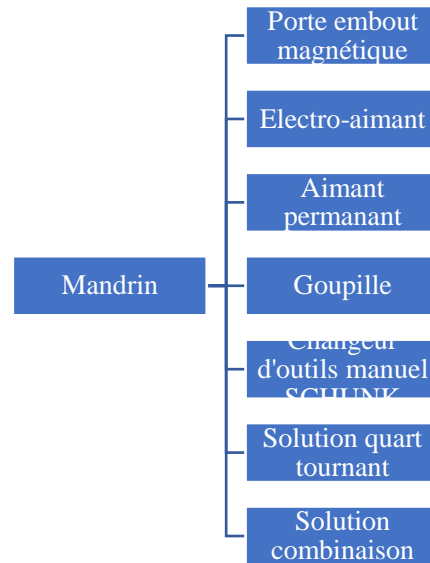
ii. Solutions techniques pour le mandrin

Le mandrin doit répondre aux contraintes suivantes :

- Doit accueillir un foret, une fraise boule et un tournevis.
- Les outils doivent être montés et démontés sur la perceuse par le chirurgien facilement.
- Être le moins encombrant et le moins lourd possible

Plusieurs solutions ont été trouvées et vous seront présentées dans la suite. Elle sera suivie d'une comparaison pour déterminer la solution la plus adaptée.

Présentation des solutions techniques



Porte embout magnétique

Description de la solution : Cette solution s'appuie sur un porte embout magnétique que nous pouvons trouver dans le commerce. (Voir ci-dessous).



Figure 3 : Porte embout magnétique acheté dans le commerce

Cet élément, en plus d'être peu volumineux et pas cher, il permet un changement d'outils rapide et sécurisé. La forme en six pans permet de transmettre la rotation avec un couple important et le maintien en position est effectué par un aimant directement monté sur cet embout.

Vous pouvez voir sur la vue de coupe 3D ci-dessous la solution finale.

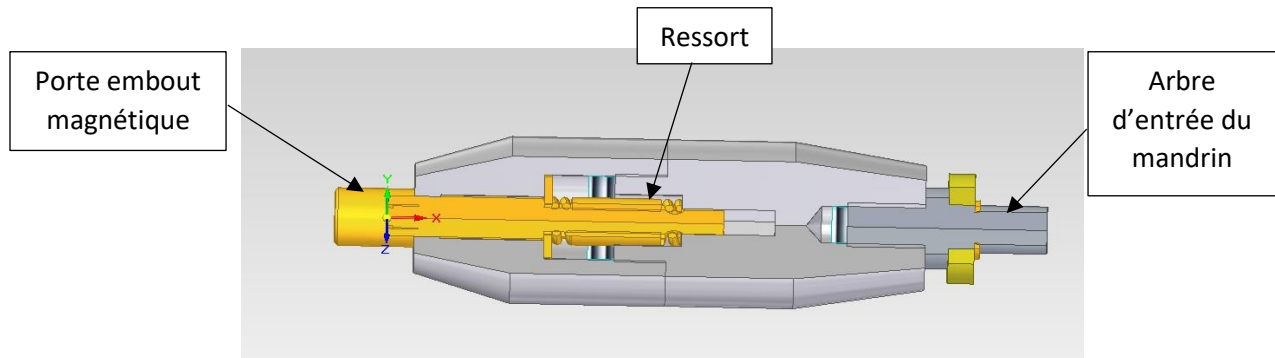


Figure 4 : Modèle CAO de la solution

Le ressort permet une sécurité lors de l'opération de vissage. Comme nous l'avons dit au début de cette partie, pendant cette opération, il faut que la translation et la rotation de l'outil soient dépendantes. Cependant, il y a risque qu'un décalage est lieu. C'est pourquoi si la translation est plus rapide que prévue, la différence peut être compensée par le ressort. Le porte embout s'enfoncera permettant ainsi à la vis de ne pas détruire le filet qu'elle est en train de créer. Cette fonctionnalité sera présente sur la solution finale mais pour des soucis de compréhension, elle ne sera plus représentée sur la suite des solutions.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Solution achetée dans le commerce - Solution peu couteuse - Solution simple à mettre en place 	<ul style="list-style-type: none"> - Jeu présent et perte de précision - Nécessité de connaître le déplacement de l'embout dû au ressort pour connaître la précision exacte de la pointe de l'outil

Electro-aimant

Description de la solution : Cette solution comporte deux parties (cf. ci-dessous). La première est fixée sur l'outil alors que la deuxième est solidaire à l'arbre de sortie du réducteur. La rotation entre ce dernier et l'outils est transmis à l'aide d'une forme hexagonale. Le maintien en position des deux parties du mandrin est fait par un électro-aimant. Il est naturellement alimenté c'est-à-dire que pour changer l'outil, le chirurgien appui sur un bouton pour couper l'alimentation. Cette coupure peut se faire à l'aide d'un bouton poussoir qui serait activé avec la main ou alors avec une pédale. Cette dernière solution permettrait de libérer une des mains du chirurgien et ainsi de pouvoir limiter les opérations.

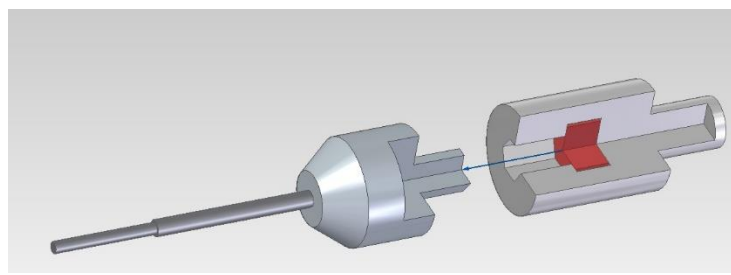


Figure 5 : Solution avec électro-aimant

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Simple d'utilisation - Possibilité d'actionner le mécanisme avec le pied - Pas de jeu au niveau de l'outil - Couple transmissible important 	<ul style="list-style-type: none"> - Conception complexe - Impossibilité d'acheter la solution directement dans le commerce. Nécessité de la fabriquer en interne. - Solution coûteuse

Aimant permanent

Description de la solution : Cette solution est la même que celle décrite précédemment (cf. figure 5). Nous avons toujours un mandrin en deux parties dans laquelle on a l'outil monté serré dans la première partie et un aimant permanent dans la deuxième. Une forme hexagonale permet la mise en rotation et la transmission du couple.

L'intérêt de mettre un aimant permanent à la place d'un électro-aimant est que nous retirons l'alimentation électrique. La conception est donc simplifiée. Cependant, le chirurgien doit exercer un effort plus important pour désolidariser les deux parties.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Conception plus facile, simplifiée - Pas de jeu entre outils et mandrin - Moins coûteuse que l'électro-aimant - Transmission de couple important 	<ul style="list-style-type: none"> - Effort plus important lors du changement d'outil - Solution introuvable dans le commerce. Nécessité d'une fabrication en interne.

Changeur d'outils manuel SCHUNK

Description de la solution : Cette solution est composée du changeur d'outils manuel SCHUNK (cf. photo ci-dessous). La partie supérieure est attachée à l'aide de vis au mandrin supérieur. Quant à la partie inférieure, elle est fixée par vis au mandrin contenant l'outil. Chaque outil est donc fixé à un mandrin et à la partie inférieure.



Figure 6 : Changeur d'outil manuel SCHUNK

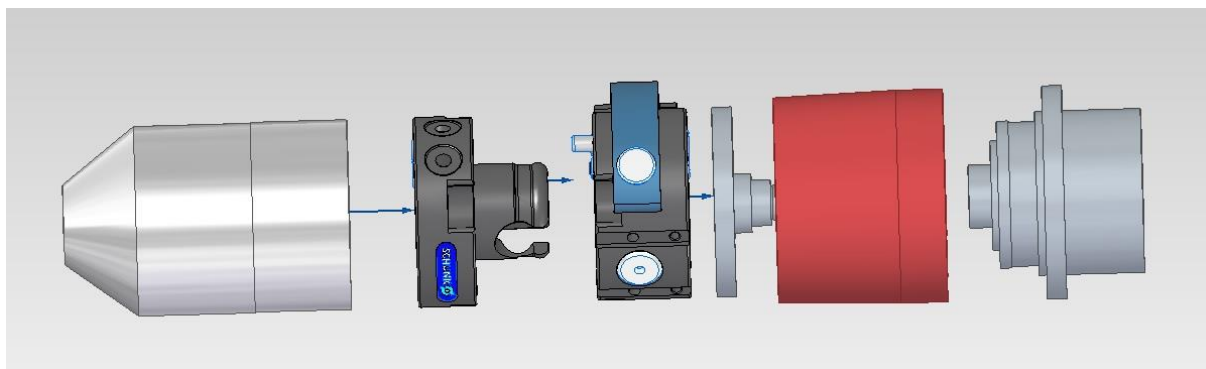


Figure 7 : Solution avec le changeur d'outils SCHUNK

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Solution simple, achetée directement dans le commerce - La conception est simple. Chaque partie peut être vissée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'acheter 3 dispositif, un pour chaque outil - Le chirurgien doit exercer une force importante en bout de robot pour verrouiller la fixation - Solution très coûteuse

Goupille

Description de la solution : Cette solution consiste à transmettre la rotation et de bloquer la translation à l'aide d'une goupille démontable (cf. ci-dessous)



Figure 8 : Goupille démontable

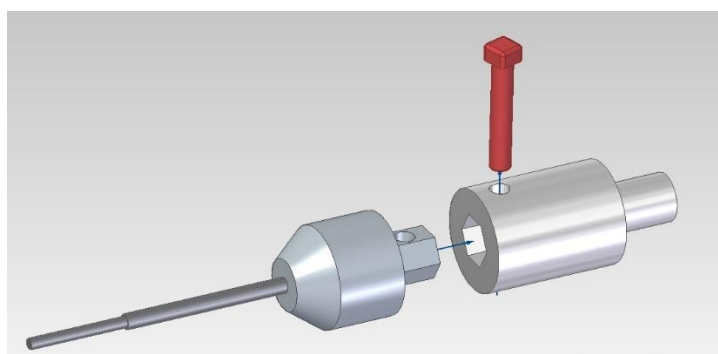


Figure 9 : Solution avec une goupille

Cette goupille est facilement trouvable ce qui permet de faire diminuer les coûts et d'assurer une maintenance rapide auprès des clients.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Conception facile - Coût abordable - Pièce de rechange facilement trouvable 	<ul style="list-style-type: none"> - Jeu présent important - Le chirurgien doit utiliser ses deux mains pour changer l'outil

Solution quart tournant

Description de la solution : Le mandrin est composé de deux parties distinctes. La première est fixée à l'outil via un montage serré alors que la deuxième est fixée au mandrin supérieur. Ces deux parties sont reliées entre elle par un système de quart de tour (comme présent sur la photo ci-dessous en bout de vis). La solution serait adaptée à notre mandrin (cf. figure 11). Cette fixation est possible puisque les opérations de perçage et de vissage se font toujours dans le même sens de rotation. Il n'y a donc pas de risque de désolidariser ces deux parties pendant les différentes opérations.



Figure 10 : Vis quart de tour

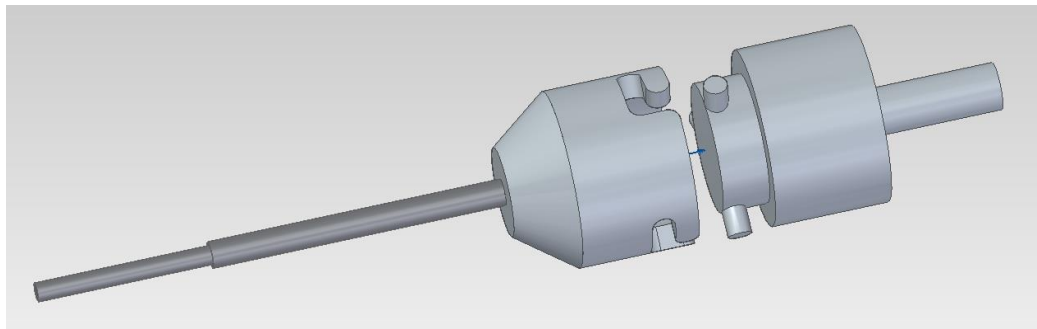


Figure 11 : Solution quart de tour

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Simple d'utilisation - Changement d'outils rapide - Couple transmissible important 	<ul style="list-style-type: none"> - La perceuse ne peut tourner que dans un seul sens - Nécessité d'utiliser deux mains pour faire le changement d'outils - Solution qui ne s'achète pas dans le commerce

Solution combinant l'aimant permanent et le quart tournant

Description de la solution : Cette solution est une combinaison de la solution avec l'aimant permanent et celle en quart de tour. Elle consiste à bloquer la translation à l'aide d'un aimant permanent et à transmettre la rotation à l'aide du quart tournant (cf. figure ci-dessous). Comme la solution précédente, les deux parties composant le mandrin sont fixées séparément à l'outil et à l'arbre de sortie du réducteur.

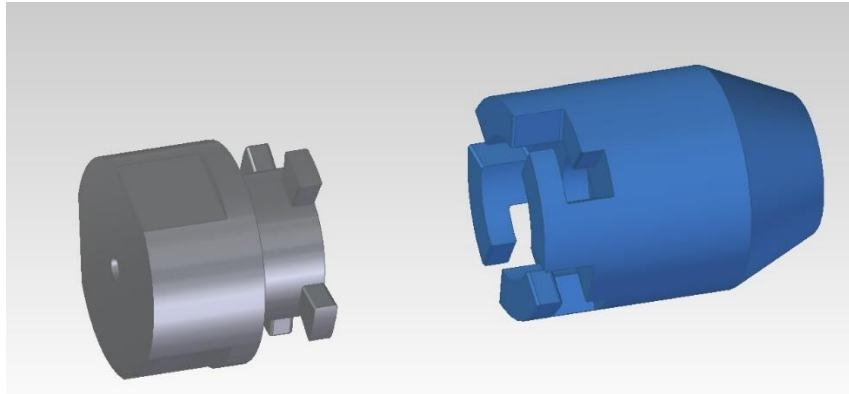


Figure 12 : Mandrin combinant l'aimant et le quart de tour

Le maintien en position de la partie inférieure du mandrin se fait par le contact avec l'aimant. Cette partie est en acier. Les pions extérieurs permettent quant à eux de transmettre le couple à l'outil. Lorsque l'ensemble est entièrement monté, il n'y a aucun jeu radial et axial. La précision est donc améliorée. Enfin, la forme complexe de l'enlèvement de matière sur la partie supérieure du mandrin permet de sécuriser l'ensemble. Elle permet d'éviter la chute de la partie inférieure si jamais l'aimant ne remplit plus sa fonction.

La combinaison des deux solutions (aimant permanent et quart de tour) permet de simplifier la conception et la production. Par exemple, il n'y a plus l'usinage de la forme hexagonale présent sur la première solution.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Simple d'utilisation - Changement d'outils rapide - Couple transmissible important - Possibilité de tourner dans les deux sens - Pas de risque de chute de l'outil 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'utiliser deux mains pour faire le changement d'outils - Solution qui ne s'achète pas dans le commerce - Conception complexe malgré sa simplification

Comparaison de toutes les solutions techniques précédentes à l'aide d'une matrice des contraintes

Afin de comparer ces différentes solutions, nous les comparons à l'aide d'une matrice des contraintes. Pour pouvoir réaliser cette matrice, nous avons déterminé les critères qui nous étaient les plus importants et nous avons attribué une note entre 1 et 5 (avec « 1 » qui n'est pas d'accord avec le critère et « 5 » qui répond parfaitement au critère).

Critère	Porte embout magnétique	Électro-aimant	Aimant permanent	Solution SCHUNK	Goupille	Solution quart de tour	Solution combinant
Précision	2	5	5	4	2	5	5
Change-ment d'outil rapide	5	5	5	3	3	4	5
Conception simple	4	3	3	4	5	3	2
Encombrement	4	4	4	3	4	5	5
Poids	5	3	5	3	5	5	5
Mainten-ance	4	3	4	3	5	4	4
Sécurité	4	4	4	4	5	4	5
Total	28	27	30	24	29	30	31

D'après ce tableau, nous pouvons voir que trois solutions répondent le mieux à toutes nos contraintes. Il s'agit de la solution avec un aimant permanent, la solution quart tournant et celle combinant les deux. Toutes les trois nous permettent d'avoir une bonne précision, de changer d'outils rapidement et d'avoir un encombrement et un poids minimisés.

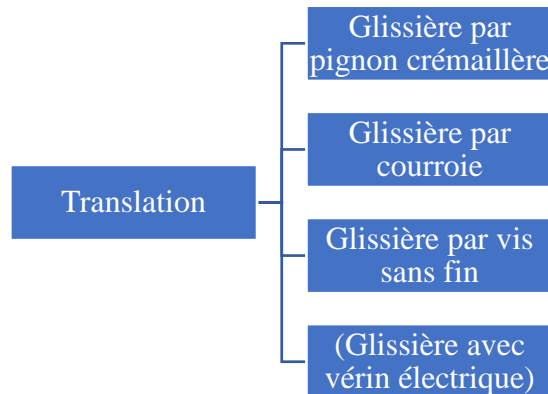
Les critères dans lesquels il y a quelques différences sont la conception, la maintenance et la sécurité. En effet, dans le cas de la première solution, la conception nécessite une forme hexagonale qui est compliquée à produire alors que pour la deuxième solution, la fabrication est plus accessible. Il sera alors plus simple de trouver des fournisseurs permettant de réaliser les pièces. Enfin, l'avantage avec la solution quart de tour est qu'il n'y a pas besoin de pièce vendues dans le commerce. L'entreprise a donc moins de fournisseur pour sa production du robot. Quant à la sécurité, bien que les deux premières solutions soient assez sûres, il y a un risque de chute d'outils si jamais l'aimant ne remplit plus correctement sa fonction, pour le quart tournant, si la rotation est inversée, la partie inférieure du mandrin n'est plus maintenu en position. Pour la solution combinant les deux technologies, il n'y a plus le risque de chute d'outils et la rotation peut avoir lieu dans les deux sens. Il y a donc une double sécurité pour garder en position les deux parties du mandrin l'une par rapport à l'autre.

La solution la plus adaptée est donc celle en combinant la solution aimant permanent et la solution quart tournant. Elle permettra par une simple rotation entre les deux parties du mandrin de les assembler.

iii. Solutions techniques pour la glissière

La translation de la perceuse est réalisée à l'aide d'une liaison glissière qui doit avoir une course de 80 mm et qui doit là encore être peu encombrant. De plus, la glissière doit être alimentée électriquement et la position de la perceuse doit être connue à tout instant. Pour simplifier la conception et la fabrication par Sylorus, nous nous sommes intéressés à différentes solutions qui existaient dans commerce.

Solutions techniques trouvées



Glissière par pignon crémaillère

Description de la solution : Cette solution consiste à mettre la perceuse en translation par le biais d'un pignon et d'une crémaillère. Un moteur est fixé sur le pignon qui reste fixe par rapport au robot alors que la perceuse est quant à elle fixée sur la crémaillère. Vous trouverez ci-dessous une glissière pignon crémaillère présente dans le commerce :



Figure 13 : Glissière pignon crémaillère

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - La perceuse est plus facile à positionner 	<ul style="list-style-type: none"> - Encombrement important avec le moteur perpendiculaire à la crémaillère - Le moteur doit bloquer la translation de la crémaillère

Glissière par courroie

Description de la solution : Cette solution consiste à mettre en translation la perceuse à l'aide d'une courroie (cf. ci-dessous). La courroie est mise en mouvement par un moteur électrique.

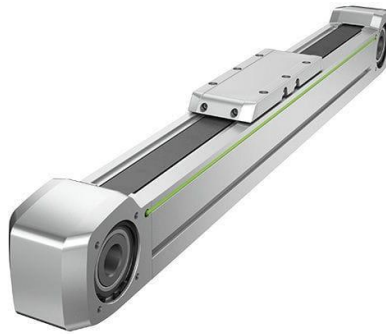


Figure 14 : Glissière par courroie

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Solution simple - Moteur électrique d'entraînement moins puissant que pour la solution avec le pignon 	<ul style="list-style-type: none"> - Course supérieure à 80 mm et donc encombrement plus important - Précision dans le déplacement. Il faut rajouter un capteur de distance. - Le moteur doit bloquer la translation

Glissière par vis sans fin

Description de la solution : Comme vous pouvez le voir sur la photo ci-dessous, cette solution est composée d'un plateau et d'une tige filetée. Un moteur électrique vient mettre en rotation cette dernière qui permet la translation du plateau. Cette solution est réversible c'est-à-dire qu'elle permet de faire translater le plateau dans les deux sens.

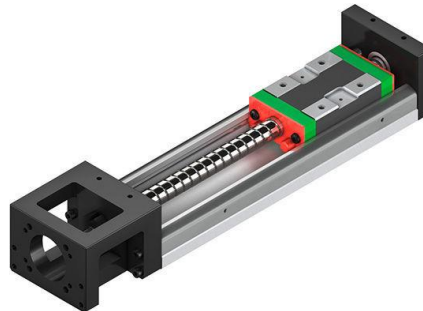


Figure 15 : Glissière par tige filetée

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Dimension pour une course de 80 mm - Grande précision pour le déplacement - La tige filetée permet de bloquer la translation lorsqu'elle n'est pas mise en rotation. Le moteur n'est pas soumis à d'efforts à l'arrêt 	<ul style="list-style-type: none"> - Axe moteur dans l'axe de la tige filetée

Glissière commandée par vérin électrique

Description de la solution : Cet ensemble est composé d'un rail de glissière (cf. photo ci-dessous) sur lequel vient se fixer la perceuse. La translation se fait par un vérin électrique.

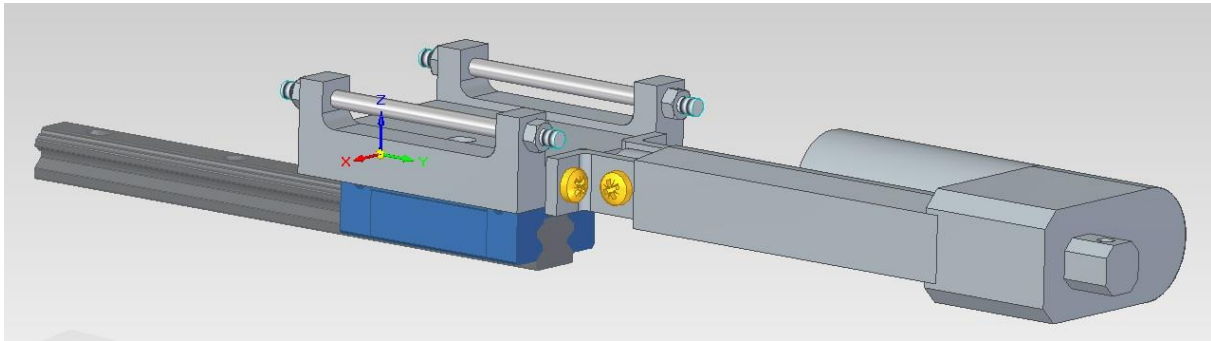


Figure 16 : Glissière commandée par vérin électrique

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Facilement commandable - La position de la tige du vérin est facilement connue par un capteur intégré à l'ensemble 	<ul style="list-style-type: none"> - Encombrement maximal

Cette solution ne peut être retenue pour la solution finale puisqu'elle ne respecte pas les contraintes d'encombrement. Elle sera cependant utilisée pour le prototype puisque nous avons tous les éléments sur place. Il n'y avait donc aucun achat à faire et nous n'étions pas limiter en volume. De plus, cette solution était facilement programmable.

Choix final

Le choix final s'est porté sur la dernière solution puisque comparée à la glissière avec une courroie, elle permet d'avoir des dimensions qui correspondent à une course de 80 mm. Celle par courroie était de dimension beaucoup plus grande ce qui posait un problème lorsque le robot bougerait. Il y aurait un effet hélicoptère ce qui aurait pu engendrer des dommages importants aussi bien sur le robot que sur les équipements environnants.

Pour ce qui est de la solution pignon crémaillère, l'encombrement était là aussi trop important puisque cette solution est généralement utilisée pour des déplacements et des charges beaucoup plus grands que dans le cas de notre utilisation. Nous avons donc choisi la solution technique avec une tige filetée.

Remarques : Sur la fin du projet, Sylorus a pu réaliser des tests avec le robot STAÜBLI TX 60 notamment sur la commande de sa trajectoire. Ils se sont rendu compte que le pilotage du robot permettait de lui faire faire directement la fonction de translation. Il a donc été définie de ne plus utiliser de glissière indépendante pour l'organe terminal. Le perçage et le vissage seront réaliser par une perceuse et le robot. Ce changement de cahier des charges permet de simplifier l'ensemble final ainsi que de diminuer l'encombrement et le poids. La solution de glissière déterminée précédemment est tout de même retenue si jamais l'entreprise se rend compte pendant les tests finaux, que le robot n'est plus capable de réaliser cette fonction.

c. Conception d'un prototype

i. Prototype

L'objectif du prototype créé est de réaliser les tests de perçage décrits dans la partie II ci-après. Ils consisteront à déterminer les caractéristiques de perçage et de vissage pendant l'opération d'arthrodèse rachidienne. Vous trouverez à la page suivante, le modèle CAO du prototype.

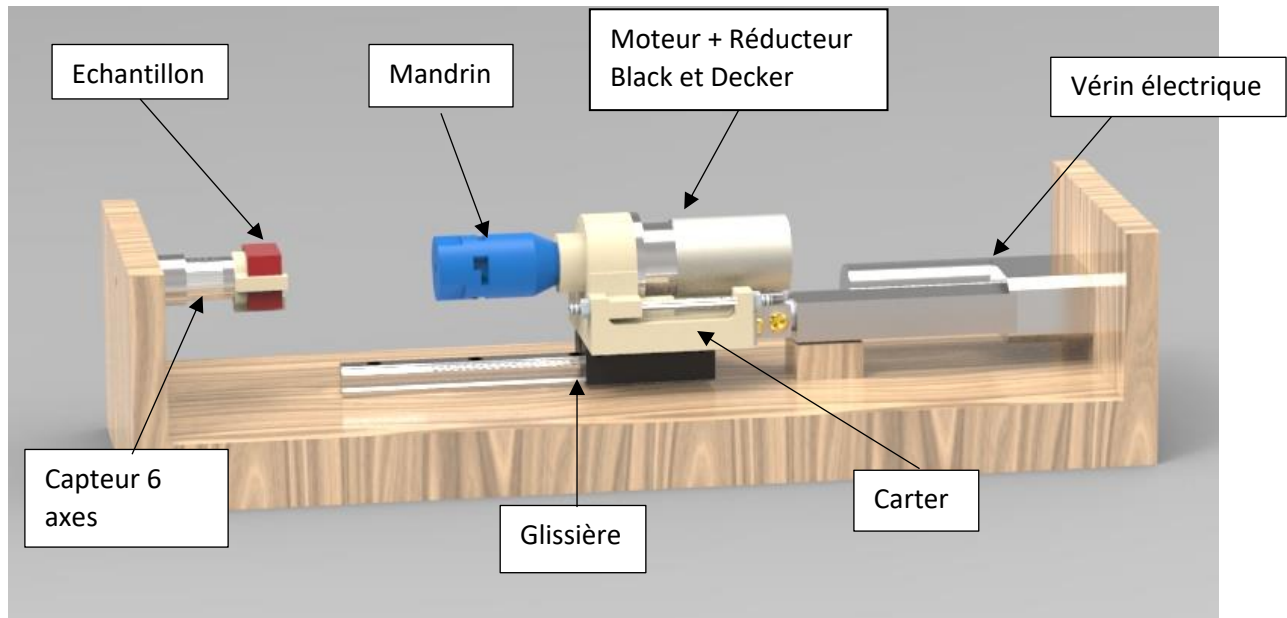


Figure 17 : CAO du prototype

Pour pouvoir le concevoir, nous sommes partis du moteur et du réducteur de la perceuse Black et Decker démontée pour comprendre son fonctionnement. Nous avons également récupéré l'arbre de sortie du réducteur pour pouvoir faire la liaison entre ce dernier et le mandrin. Vous trouverez en annexe 2 les caractéristiques techniques de cet ensemble.

Le mandrin reprend les caractéristiques de celui choisi dans la partie précédente. Nous pouvons retrouver la fixation à l'aide du quart tournant ainsi que l'aimant. Cependant, la particularité est qu'il a été fabriqué en impression 3D. Le matériau est donc de l'ABS contrairement à celui de la solution finale. Ce procédé nous permet de pouvoir fabriquer la pièce rapidement en interne à l'INSA sans passer par un prestataire extérieur. De plus, avec l'impression 3D, nous avons pu modifier certaines dimensions pour s'adapter directement à notre utilisation. C'est le cas, par exemple, des vis de pression qui ne sont pas présentes sur la solution finale mais qui nous permettent d'avoir une seule pièce pour les deux outils utilisés (foret et tournevis).

Le carter est lui aussi fabriqué en impression 3D pour les mêmes raisons que le mandrin (rapidité et fabrication en interne). Comme vous pouvez le voir, le moteur de la perceuse est monté sur un système de guidage avec des ressort. Ce mécanisme permet de contrer la différence entre la vitesse d'avance de l'ensemble et la vitesse de rotation dans l'opération de perçage. Ceci évite donc que la vis ne détériore le taraudage. Cette fonction sera également présente sur la solution finale.

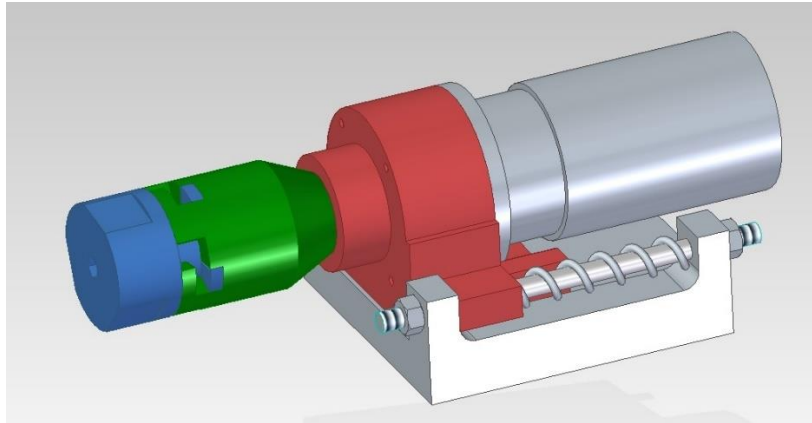


Figure 18 : Montage de la perceuse avec la fonction ressort

Pour le choix de la glissière, nous n'avons pas acheté celle choisie pour la solution finale du fait de son prix (452€) et un délai de livraison compris entre trois et quatre semaines. Nous avons opté pour la solution avec un rail et le vérin électrique puisque nous avons déjà tout ce matériel sur place. Cette solution était acceptable puisque nous n'avons plus la contrainte d'encombrement. Ce prototype nous permettra comme nous l'avons dit précédemment de réaliser les tests. Il ne sera en aucun cas monté sur le robot final.

Pour pouvoir mesurer les efforts de compression et le couple pendant le perçage et le vissage, nous avons choisi un capteur *6 axes NANO25-E Transducer*¹. Nous allons récupérer les données du capteur avec dDesk et le logiciel ControlDesk. D'autant plus qu'il peut mesurer des efforts de compression allant jusqu'à 500 N et des couples allant jusqu'à 3 N.m. L'ensemble du prototype est assemblé à l'aide de planche en bois. Ceci permet de s'assurer de la position du capteur par rapport à l'outil. Pour avoir des résultats les plus précis possibles, il faut s'assurer de l'alignement de ces deux éléments.

ii. Commande et pilotage du prototype

Le prototype est piloté par une carte Arduino, avec deux moteurs shield, un pour le moteur de la perceuse (cf. figure 120) et un pour le moteur du vérin (cf. figure 21). Tout cela est commandé via un ordinateur. Cette carte nous permet aussi bien de piloter le moteur de la perceuse que le vérin. Nous pouvons ainsi faire varier la vitesse d'avance et la vitesse de rotation indépendamment l'une de l'autre. Nous pouvons enfin les rendre cohérentes pour pouvoir réaliser les opérations de vissage. Vous trouverez ci-dessous la carte Arduino que nous utilisons avec les différentes entrées/sorties qui sont utilisées.

¹ Plus d'informations sur le site suivant : http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Nano25

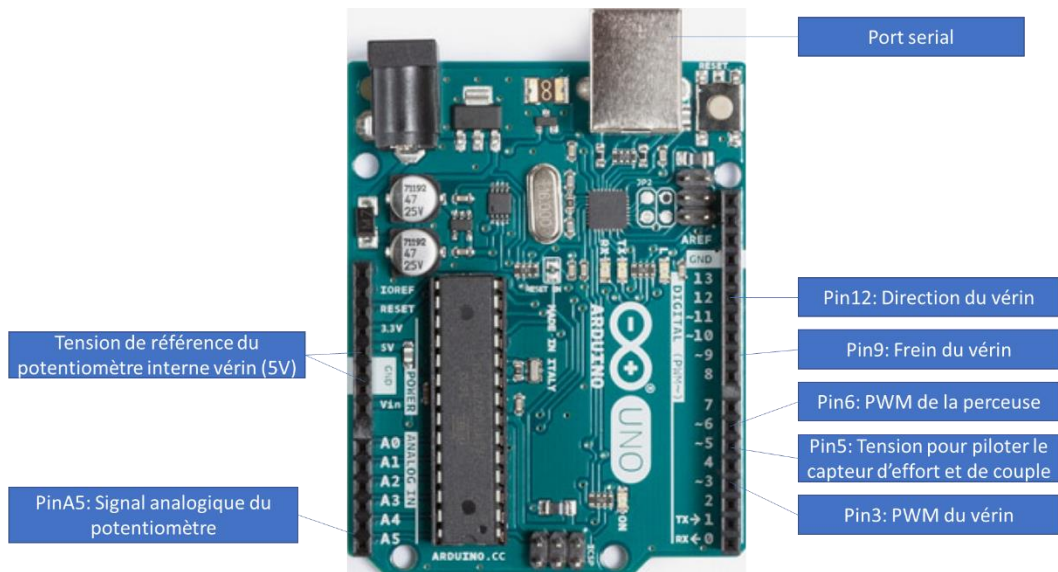


Figure 19 : Platine Arduino avec détails des entrées/sorties utilisées

Comme vous pouvez le voir sur la figure 19, on emploie deux Pins générant des PWM, le Pin3 et le Pin6. Ils permettent d'actionner séparément le moteur du vérin et celui de la perceuse. Les Pins 12 et 9 sont employés indépendamment pour contrôler l'entrée et la sortie de la tige du vérin. De plus, l'entrée A5 est un pin CAN (convertisseur analogique-numérique), c'est-à-dire qu'il collecte les signaux du potentiomètre présent dans le vérin. Le port serial est aussi bien un port de communication entre la platine et l'ordinateur qu'un port d'alimentation électrique. Le Pin 5 est un pin qui n'est pas utilisé dans notre prototype mais il permettrait de piloter le capteur d'effort à la place de dDesk. Ceci permettrait à l'entreprise de pouvoir refaire des tests avec la platine Arduino.

Sur l'image suivante, vous trouverez la carte électronique de commande pour piloter le moteur de la perceuse.

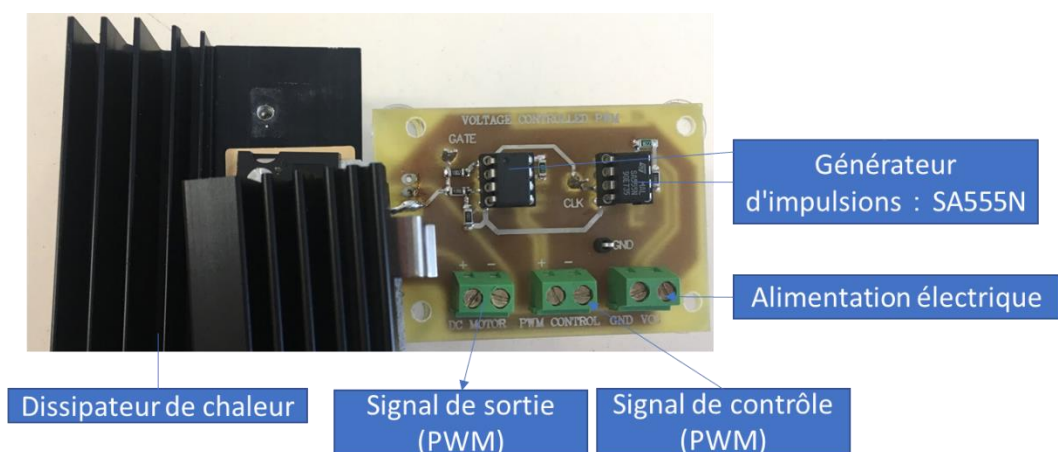


Figure 20 : Carte électronique de commande pour le pilotage du moteur de la perceuse

Comme présenté sur l'image ci-dessus, nous utilisons le chip SA555N, développé par STMicroelectronics, pour générer le signal de sortie et ainsi piloter le moteur de perceuse. Ce chip permet d'avoir une tension d'entrée d'environ 16V. De plus, avec cette carte, le rapport

cyclique de PWM de sortie est ajustable et synchronisé avec celui du signal de contrôle. Il est alors possible de piloter la vitesse de rotation en sortie du moteur en changeant le rapport cyclique de la PWM. Quant à la perceuse, nous n'avons besoin que d'un seul sens de rotation, d'où la simplification de cette carte par rapport à des Motors Shields que nous pouvons trouver dans la commerce.

Nous avons, cependant, garder dans le code de programmation la possibilité de pouvoir faire tourner le moteur dans les deux sens de rotation au vu des différentes applications futures.

Sur l'image suivante, vous trouverez l'Arduino Motor Shield qui permet de contrôler le vérin.

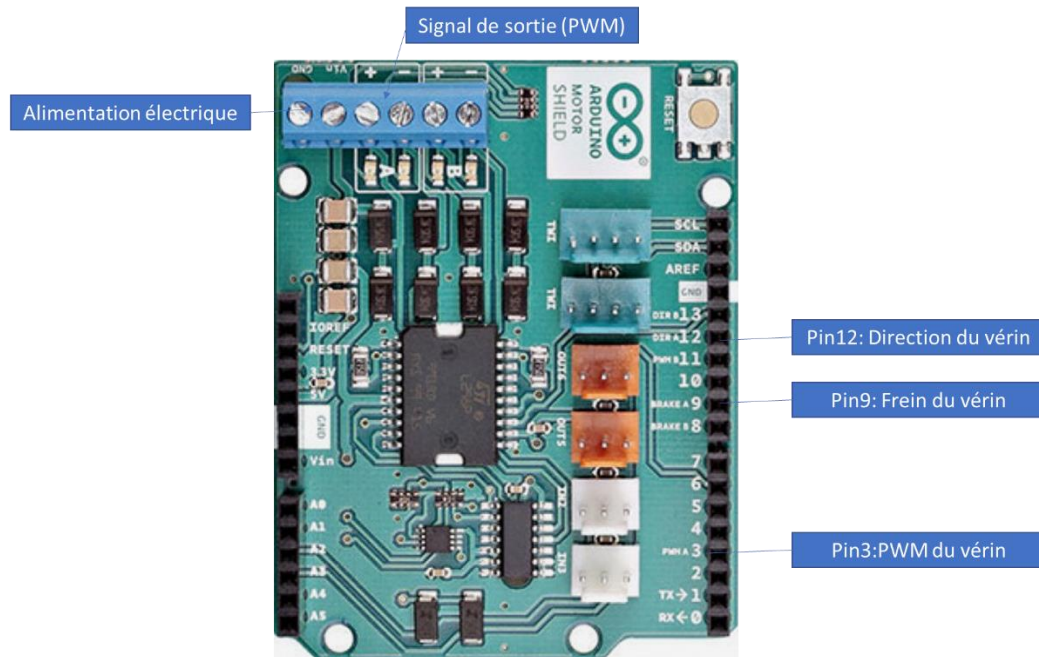


Figure 21 : Arduino Motor Shield pour le pilotage du vérin⁷

Cette carte étant reliée directement à la platine Arduino, nous utilisons les mêmes pins que sur cette dernière pour piloter le moteur du vérin. Le chip utilisé ici pour générer la PWM est STMicroelectronics L298, un double pont complet moteur, pilote. Il délivre une tension maximale de 50V et un courant maximal de 3A. De peur de griller cette carte, nous ne l'utilisons que pour piloter le moteur de vérin (il pourrait cependant servir à piloter le moteur de la perceuse, suivant ces caractéristiques). Du fait qu'il ait un double pont complet, nous pouvons piloter le moteur du vérin dans les deux sens et ainsi faire rentrer ou sortir la tige du vérin comme souhaité.

Pour finir, afin de simplifier la manipulation du prototype pendant les tests, nous avons développé une interface graphique avec Matlab. Sa fonction principale est de rendre plus ergonomique l'interface de commande pour l'utilisateur. Il permet également d'envoyer les instructions à l'Arduino pour piloter le prototype et de récupérer les informations en temps réel sur la position du vérin. Vous trouverez ci-dessous l'interface graphique utilisée.

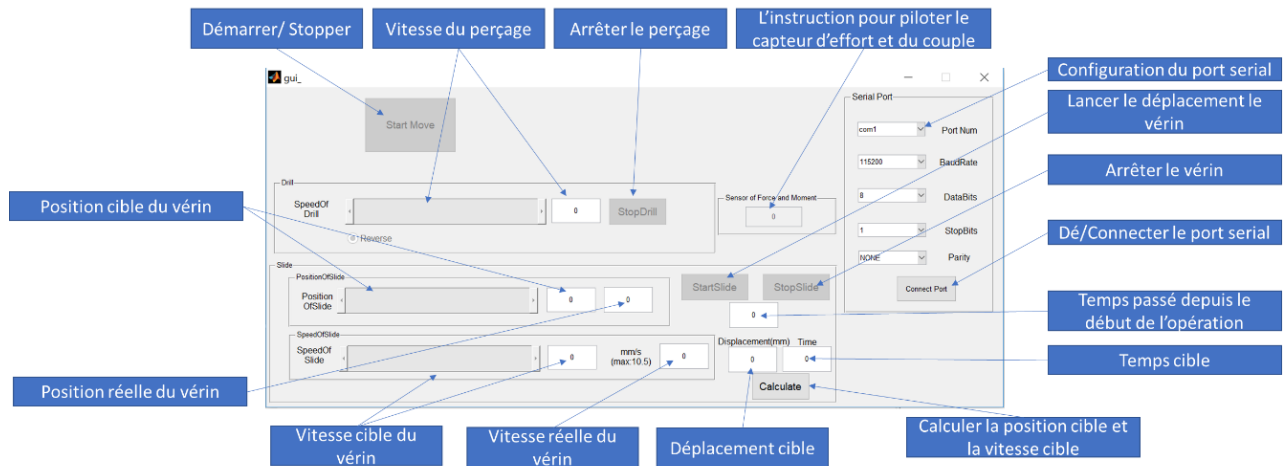


Figure 22 : Interface graphique utilisateur

Avec cette Interface Graphique, nous connaissons tous les éléments tels que le temps, la position et la vitesse des différents moteurs. Enfin, nous pouvons programmer la vitesse du vérin par Simulink pour gagner du temps.

Le principe de contrôle par Arduino

Les deux systèmes principaux du prototype (la perceuse et le vérin) sont pilotés différemment. En effet, la perceuse est pilotée en vitesse en boucle ouverte. Nous n'avons pas de capteur qui puisse renvoyer l'information sur la vitesse en temps réel. Nous envoyons donc une tension qui permet de faire tourner le mandrin et l'outil. Cette tension sera toujours la même pendant toute la durée du perçage ou du vissage. Cependant, le vérin est quant à lui commandé en position et en vitesse en boucle fermée. Des capteurs renvoient en temps réel les informations qui permettent d'ajuster les commandes. Ce système se commande à l'aide d'un PID. Dans la suite de cette partie, nous allons vous présenter l'algorithme qui permet de contrôler ce prototype à l'aide de la platine Arduino et des moteurs shields.

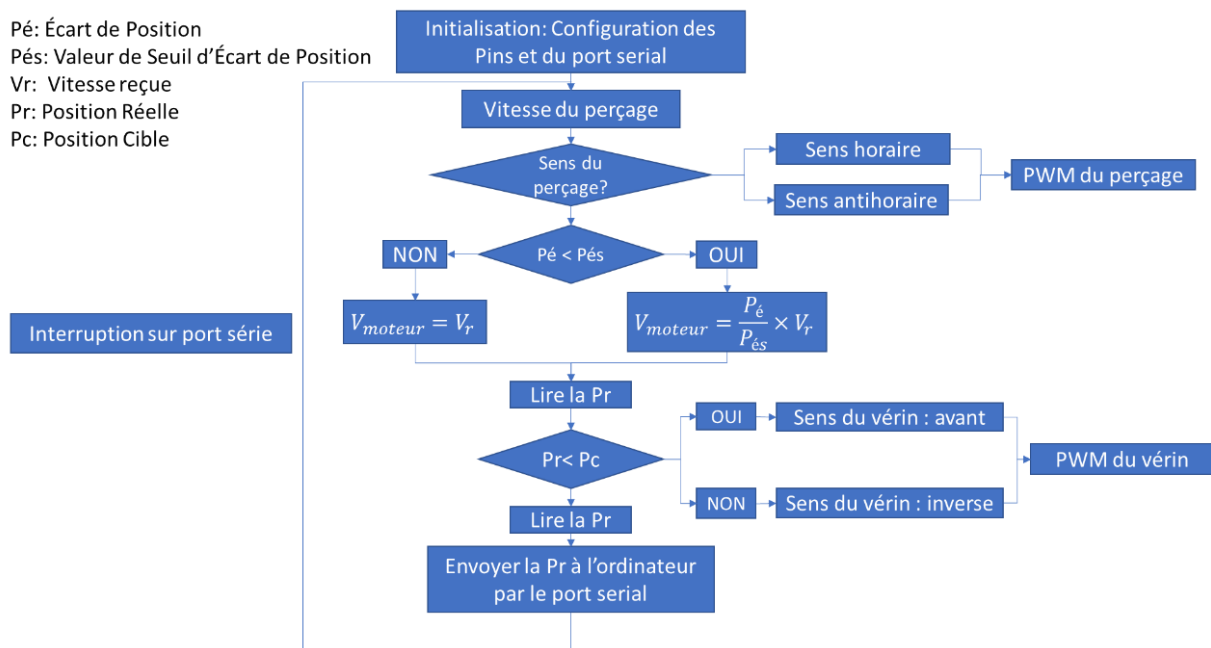


Figure 23 : Organigramme de l'algorithme principal

Comme vous pouvez le voir sur l'algorithme ci-dessus, dans la boucle principale, nous faisons fonctionner les deux moteurs pour générer les deux PWMs. Nous pouvons retrouver les trois fonctions suivantes : le contrôle du sens de rotation, la consigne sur la position du vérin et l'ajustement de la vitesse du vérin lorsque celui-ci est sur le point d'atteindre sa position cible. À la fin de la boucle, l'algorithme détermine la position finale du vérin et envoie cette valeur à l'ordinateur pour l'utilisateur.

C'est à l'aide de cet algorithme que nous pouvons contrôler la vitesse de rotation du moteur de la perceuse et du vérin en ajustant le rapport cyclique des PWMs. Le changement de signe de la tension permet de modifier le sens de rotation. Le microcontrôleur peut ainsi générer des PWMs en temps réel pour ajuster la position et les vitesses.

Vous trouverez en annexe 3 un complément sur les informations envoyées par l'ordinateur à l'Arduino.

Piloter le vérin

Le pilotage du vérin est effectué par la position et la vitesse de déplacement de la tige. Pour contrôler la position, nous avons défini un écart maximal possible c'est-à-dire l'écart maximal qu'il peut y avoir entre la valeur de la consigne et la valeur réelle. Lorsque nous sommes dans cet intervalle, la vitesse de déplacement de la tige du vérin est contrôlée proportionnellement à cette valeur. Dans les autres cas, la vitesse correspond à celle définie par l'utilisateur.

L'ordinateur envoie la vitesse après le calcul par Simulink. Avec la position du vérin, nous pouvons calculer sa vitesse réelle. Par la suite, le programme calcule l'écart entre cette vitesse et celle demandée par l'utilisateur. Cet écart s'emploie comme le signal d'entrée du PID (cf. organigramme ci-dessous). A la sortie, un ajustement de la vitesse à lieu ce qui modifie la PWM.

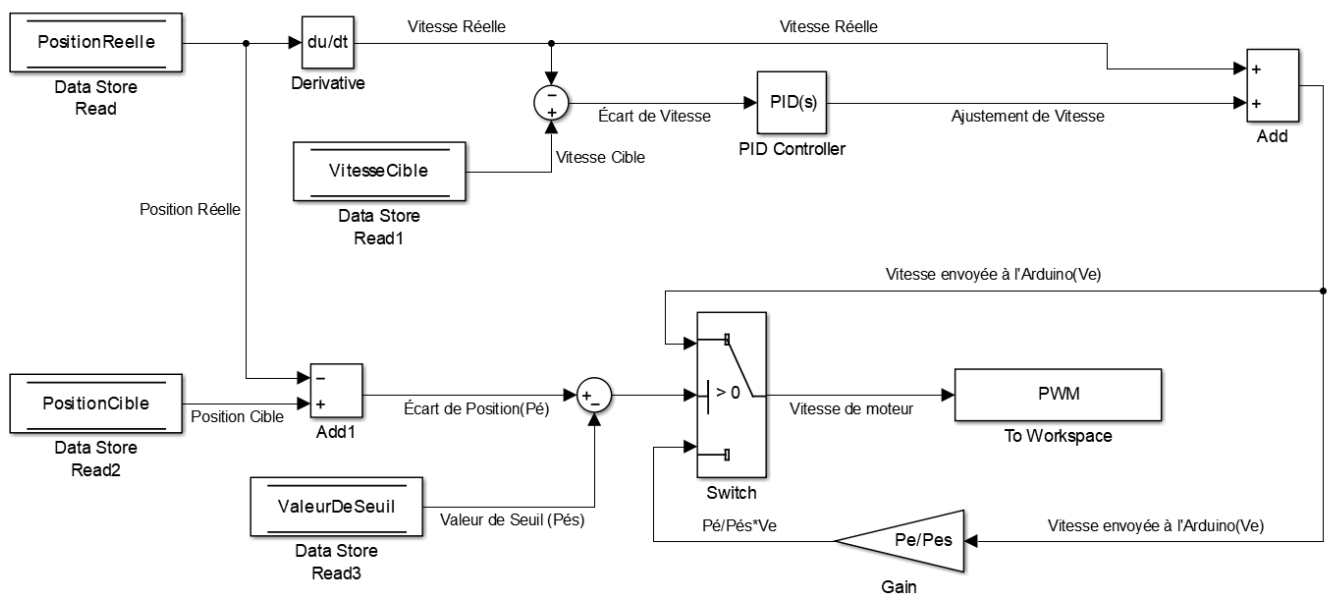


Figure 24 : Organigramme de l'algorithme de commande du vérin

Piloter le moteur de la perceuse et détecter l'effort et le moment pendant l'opération

La commande du moteur de la perceuse consiste à piloter sa vitesse de rotation. Cependant, nous n'avons pas de capteur de vitesse intégrer à notre prototype. Nous ne pouvons donc pas contrôler cette vitesse en boucle fermée. La vitesse du mandrin est donc approximative. La vitesse choisie est celle pour une charge à vide. Elle peut être différentes pendant les opérations de perçage et de vissage. Pour contrôler cette vitesse de rotation, nous changeons le rapport cyclique du signal d'entrée (de 20% à 100%) c'est-à-dire que nous changeons la tension de la consigne entre 1V et 5V.

Remarque : Pour la mesure de l'effort de compression et du couple pendant les différentes opérations, nous utilisons un autre logiciel ControlDesk. Il est possible de collecter ces mesures à l'aide de la carte Arduino mais pour des soucis de simplification de la conception finale, nous avons opté pour la première solution. Ces données peuvent par la suite être analysées par Matlab.

II. Partie II : Détermination des caractéristiques de perçage

a. Objectifs

Les tests présentés ci-dessous ont différents objectifs. Ils permettront dans un premier temps de déterminer le couple et l'effort de compression maximal lors des opérations de perçage et de vissage (les deux opérations qui devront être réalisées par le robot). Ces données nous permettront ainsi de détailler et de préciser le cahier des charges (cf. partie I analyse fonctionnelle) qui sera donné à l'entreprise à la fin de ce projet. De plus, ces valeurs nous permettront de déterminer les paramètres de coupe optimaux qui aideront à dimensionner le plus précisément possibles les composants de la perceuse (moteur, réducteur).

Il y aura trois tests réalisés. Le premier sera un test à vide afin de caractériser la perceuse du prototype alors que les deux suivants permettront de définir les valeurs recherchées (couple et effort de compression).

b. Tests de perçage

1ère partie : Vérifications des caractéristiques du prototype à vide.

L'objectif de cette partie est de déterminer la vitesse de rotation à la sortie de la perceuse en fonction de la tension de consigne qui est fournie par la platine Arduino. Ce test permet de compléter le programme de commande et de connaître plus précisément les caractéristiques de l'ensemble moteur, réducteur utilisé dans ce prototype.

Matériel et montage :

- Prototype (perceuse + programme)
- Tachymètre optique
- Multimètre



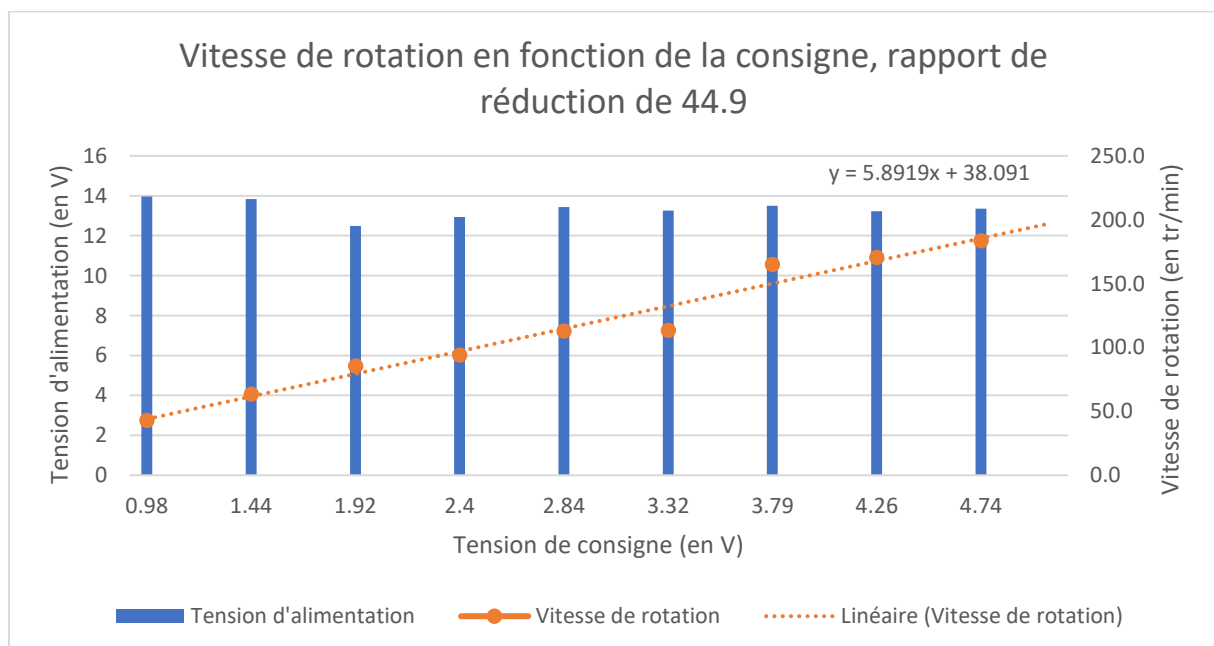
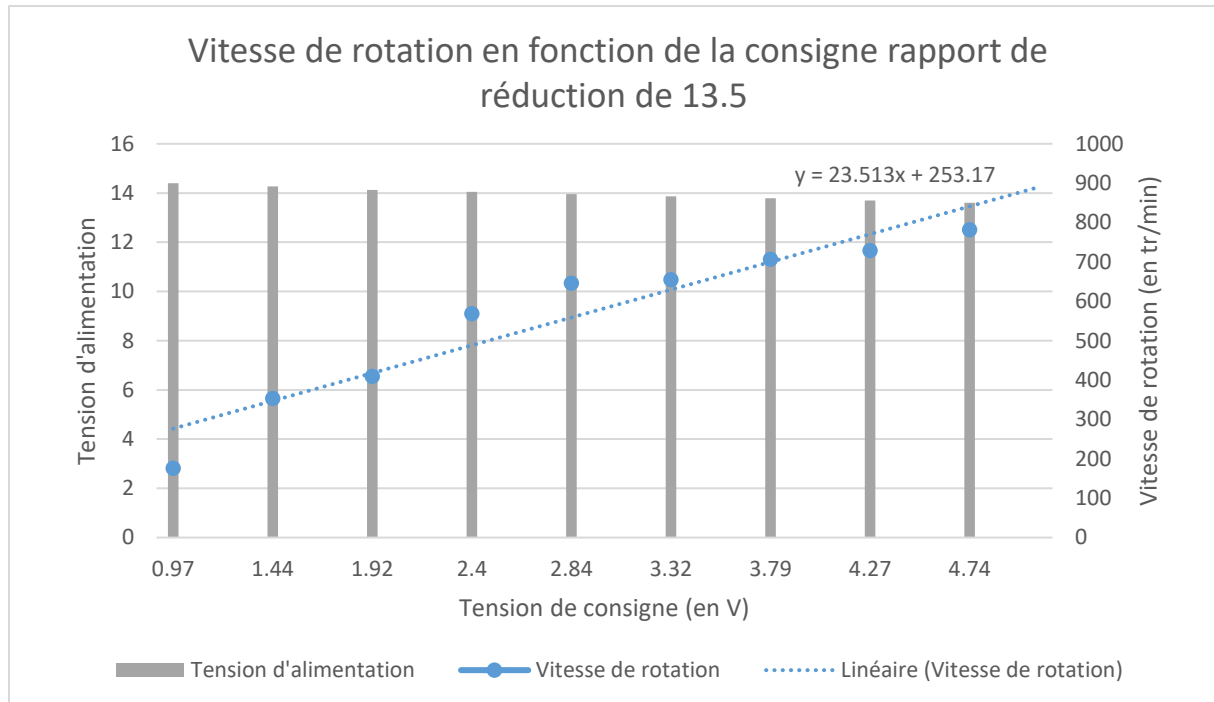
Figure 25 : Montage pour mesurer la vitesse de rotation du mandrin et de l'outil

Description du protocole :

Pour connaître la vitesse de rotation en sortie du réducteur, nous faisons varier la vitesse de consigne entre 1 et 5V que nous vérifions à l'aide d'un multimètre. Nous relevons ensuite la vitesse de rotation à l'aide d'un tachymètre optique (cf. photo ci-dessus). Ce test est répété trois fois pour chaque tension de consigne afin de minimiser les erreurs relatives à l'instrument de mesure.

Le prototype est alimenté par la batterie de la perceuse démontée au préalable. Ceci nous permet d'avoir la puissance nécessaire ce qui n'était pas possible avec une alimentation du laboratoire. La tension d'alimentation est donc vérifiée au cours de la manipulation pour s'assurer qu'elle reste quasiment constante (dans notre cas, elle sera comprise entre 12.5 et 14V)

Résultats : Nous avons obtenu les différentes valeurs de vitesse de rotation en fonction de tension de consigne ainsi que le rapport de réduction du réducteur.



D'après ces graphiques, nous pouvons faire varier la vitesse de rotation en sortie de réducteur de 43 tr/min à 782 tr/min.

Par la suite, nous porterons une attention particulière à la tension d'alimentation afin de s'assurer qu'elle soit toujours comprise entre 12.5 et 14V afin d'avoir les mêmes conditions que ces premiers tests.

2ième partie : Caractérisation des percages

L'objectif de cette partie est de déterminer le couple et les efforts de compression nécessaires pour réaliser les percages. Plusieurs étapes seront faites. Nous utilisons dans un premier temps, la mousse beige (15 PCF), puis dans un second temps la mousse rouge (30 PCF). Cette dernière mousse est deux fois plus dure que la première ce qui permettra de représenter les deux couches de l'os (os cortical et os spongieux).

Dans un premier temps, nous allons étudier l'influence de la vitesse de rotation sur le couple et l'effort. Puis dans un second temps, nous étudierons l'influence de la vitesse d'avance pour une vitesse de rotation donnée.

Matériel :

- Prototype
- Capteur 6 axes NANO25-E Transducer
- Mousse corticale
- Foret à bois diamètre 4 et foret à métaux diamètre 4

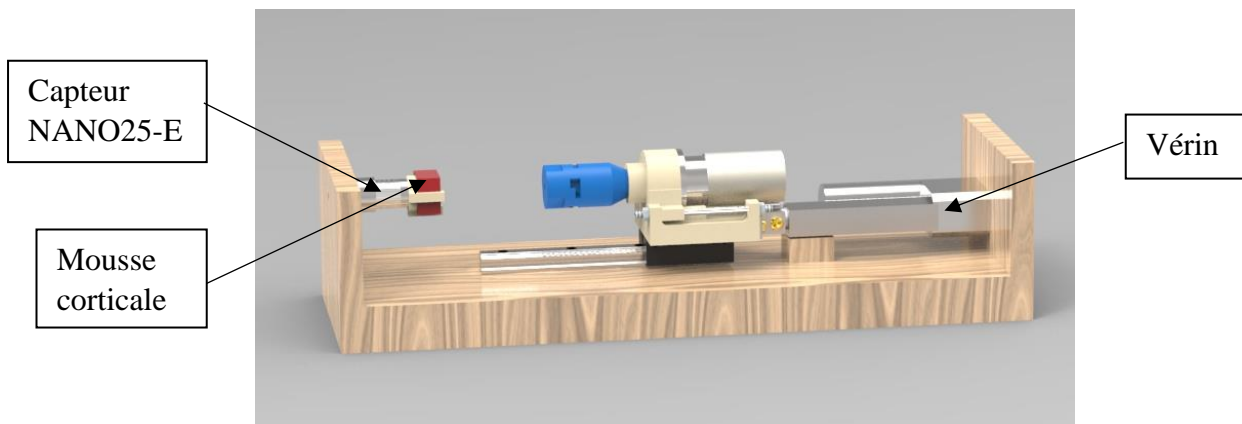


Figure 26 : Descriptif des éléments du prototype

Description du protocole :

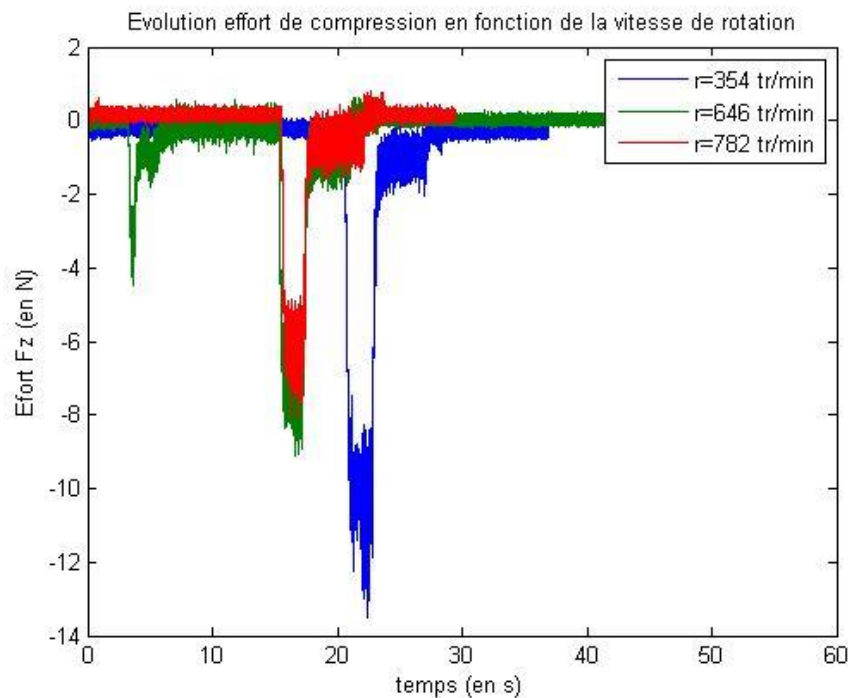
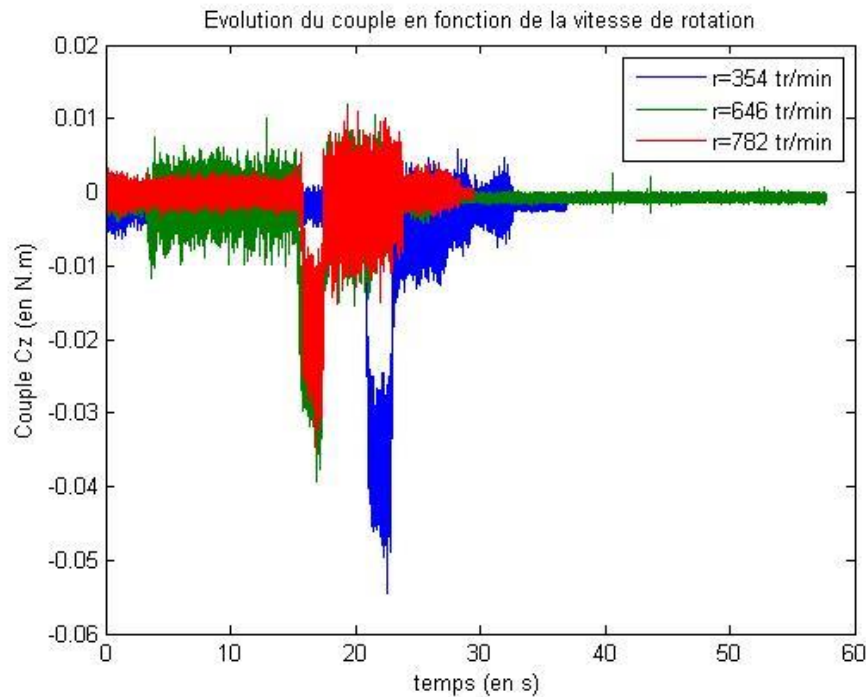
Le couple et l'effort de compression sont mesurés en temps réel par le capteur 6 axes sur laquelle est fixée la mousse corticale. Les résultats sont enregistrés à l'aide du logiciel ControlDesk et ils sont traités à l'aide de Matlab.

Pour étudier l'influence de la vitesse de rotation, nous fixons la vitesse d'avance à 10 mm/s et nous prenons trois vitesses de rotation différentes (354, 646 et 782 tr/min). Ces premiers tests sont réalisés avec un foret à bois. Dans la deuxième partie de l'expérience, la vitesse de rotation sera fixée à 782 tr/min et la vitesse d'avance variera de 5 mm/s à 10 mm/s.

Remarques : Les résultats mesurés par cette méthode ne seront pas très précis. Le fait de fixer directement l'échantillon sur le capteur et ainsi mesurer le couple et l'effort résultants, nous oblige à considérer que le matériau et son support n'absorbent aucun effort. Nous allons prendre cette considération pour toute la suite des tests.

Résultats :

Après le traitement des données, nous pouvons tracer le couple et l'effort de compression en fonction du temps. Les graphiques ci-dessous sont les résultats obtenus avec la mousse à 15 PCF lorsque nous faisons varier la vitesse de rotation. Vous trouverez en annexe les résultats pour la mousse à 30 PCF ainsi que les résultats pour différentes vitesses d'avance.

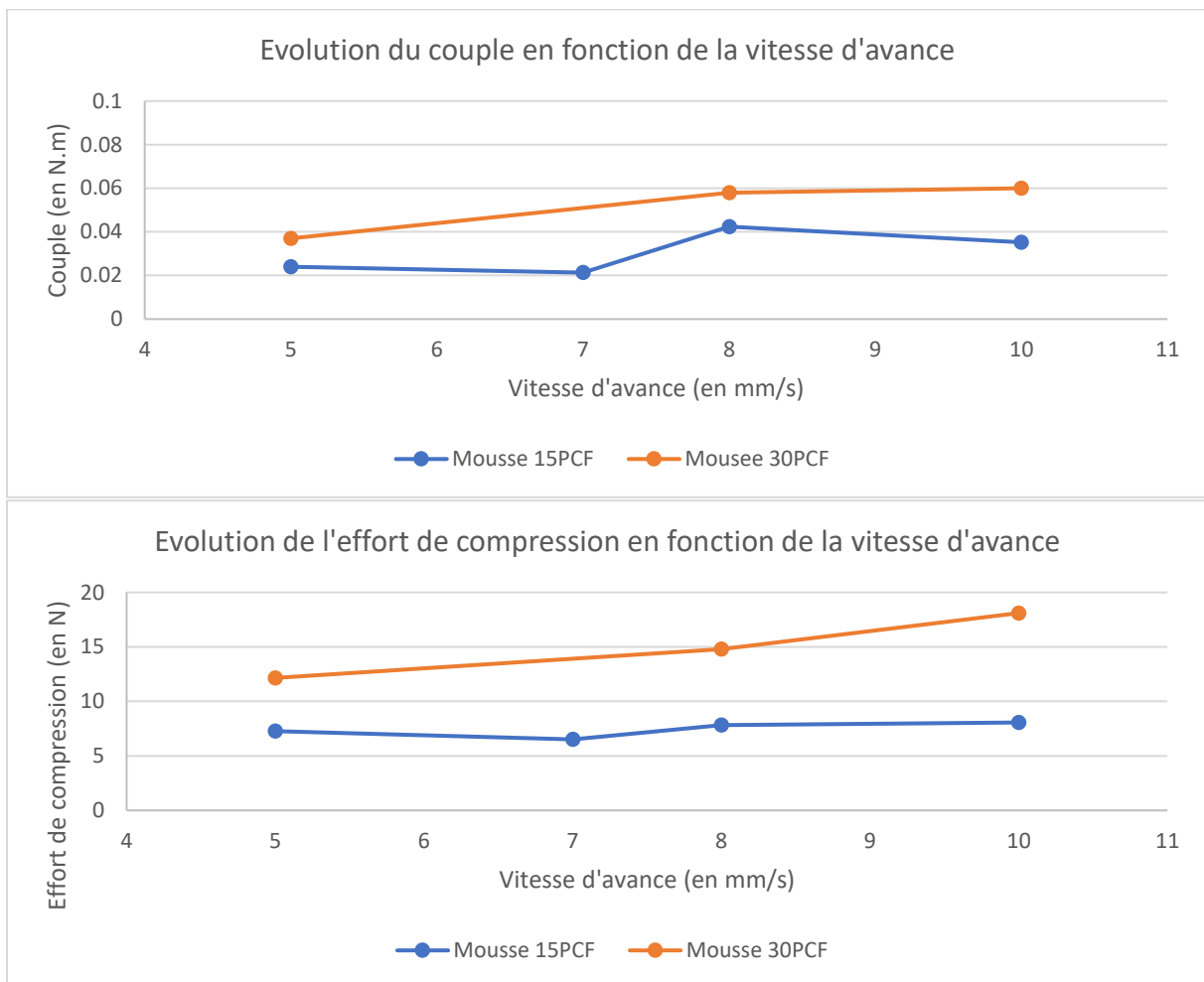


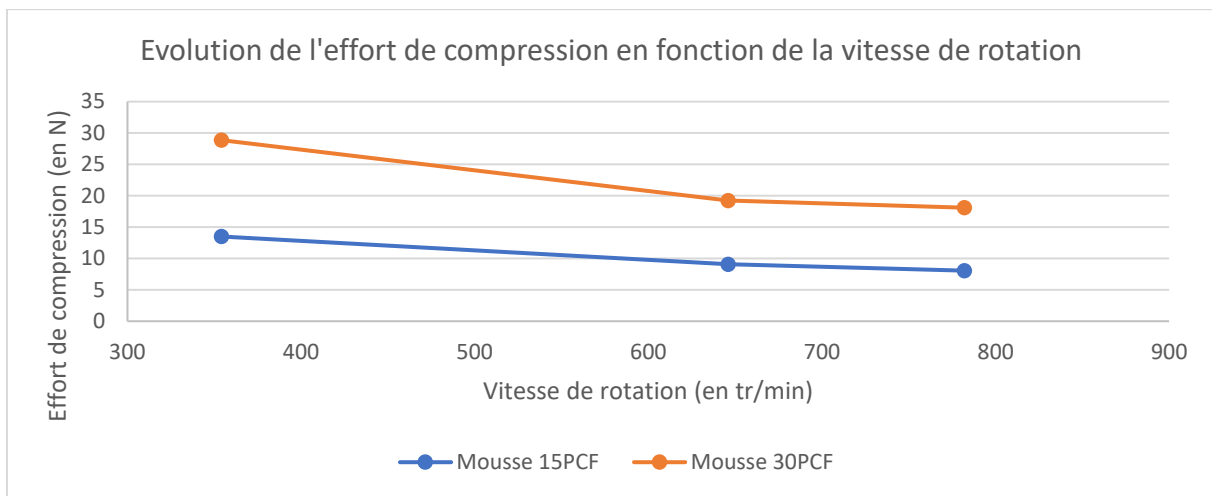
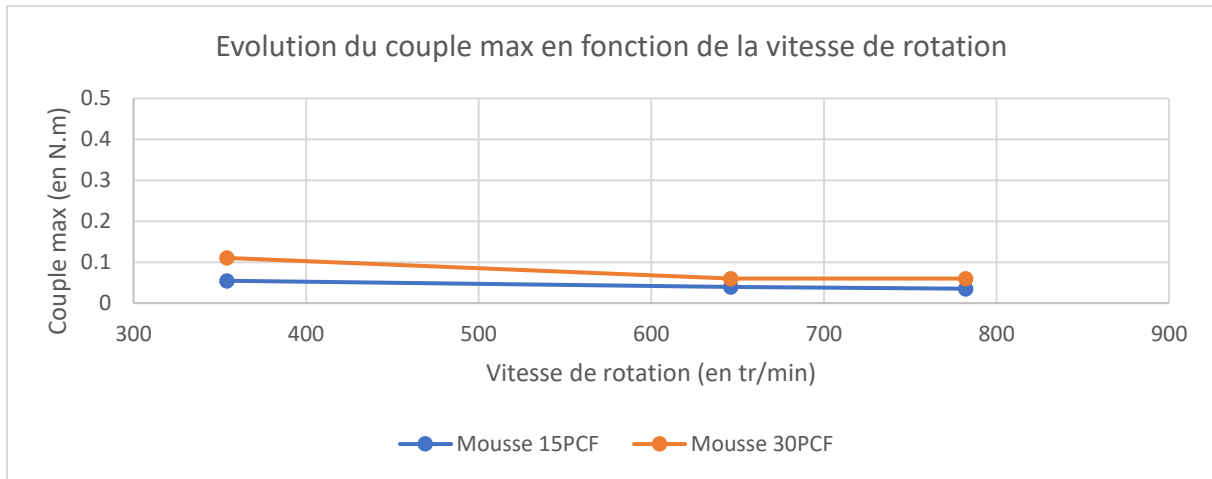
Quel que soit la vitesse de rotation choisie, nous pouvons remarquer un pic qui correspond à l'entrée du foret dans la matière. Le perçage est effectué sur une profondeur

d'environ 35 mm. Nous pouvons voir que très rapidement, le couple devient maximum et reste constant tout le temps du perçage. Il diminue pour s'annuler une fois ce dernier terminé.

Les variations présentes sur ces graphiques sont dues à la non coaxialité du mandrin et de l'outil avec l'axe de rotation. Cette erreur de fabrication est due au procédé utilisé, l'impression 3D.

Par la suite, nous allons nous intéresser plus particulièrement au couple et à l'effort de compression maximal. Vous pouvez trouver sur les graphiques ci-après l'évolution de l'effort et du couple maximal en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse d'avance.



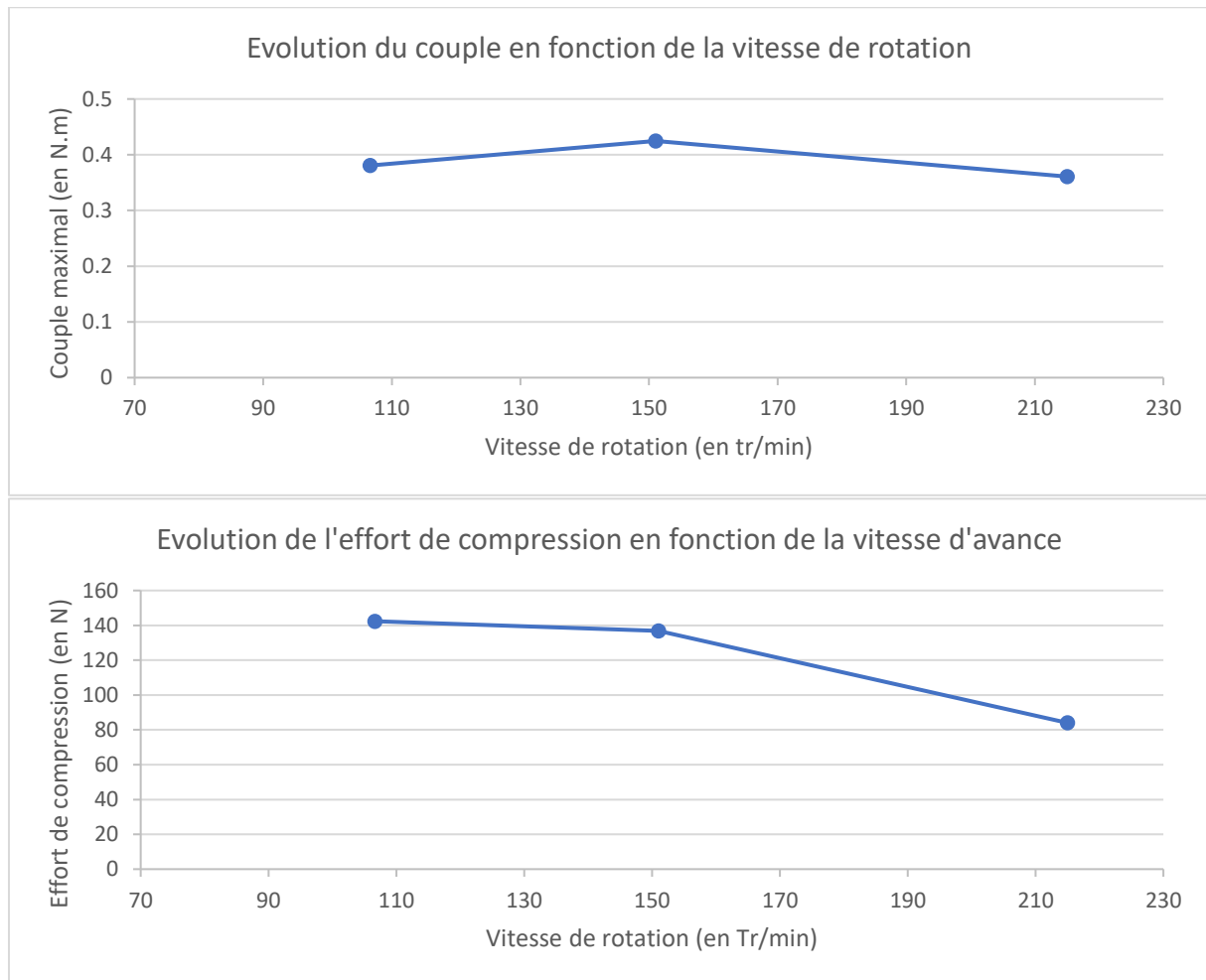


Nous remarquons d'après ces graphiques que la vitesse d'avance joue un rôle important sur l'effort de compression puisque nous passons par exemple de 13 N à 18N pour une vitesse respective de 5 et 10 mm/s pour le cas avec de la mousse 30 PCF. Cependant, le couple reste à peu près constant à environ 0.06 N.m. La vitesse de rotation modifie elle plus le couple maximal puisque nous passons de 0,06 N.m à 0.3 N.m pour une vitesse respective de 354 tr/min et 782 tr/min.

Nous pouvons donc en conclure, d'après ces résultats, que pour minimiser le couple maximal et donc réduire les efforts qui s'appliquent sur le foret, il faut prendre une vitesse de rotation la plus grande possible. Pour ce qui est de la vitesse d'avance, il faut la prendre la plus petite possible, afin de diminuer les efforts de compression et ainsi diminuer les efforts qui seront appliqués sur le bout du robot.

Après certains échanges avec les chirurgiens, nous nous sommes rendu compte que la vitesse de rotation de l'outil était inférieure à celles que nous avons étudiée précédemment. De plus, le foret à bois propose des caractéristiques de coupe plus éloignée que celle obtenue par le foret utilisé en général. Un foret à métaux possède les caractéristiques se rapprochant le plus des conditions réelles d'opération. Nous avons donc refait de nouveaux tests afin d'évaluer le couple et l'effort maximaux. Nous n'allons pas faire varier la vitesse d'avance puisque les résultats devraient être sensiblement les mêmes.

Ci-dessous, vous trouverez l'évolution du couple et de l'effort en fonction du temps dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire pour la mousse la plus dure (30 PCF).



Nous pouvons observer les mêmes résultats que pour le foret à bois à savoir que l'effort de compression et le couple maximal diminue avec la vitesse de rotation. Vous trouverez dans le tableau ci-dessous un récapitulatifs des efforts et des couples maximums en fonction du matériau utilisé et du forêt.

Foret à bois		
	Mousse 15 PCF	Mousse 30 PCF
Vitesse de rotation (tr/min)	354	354
Couple maximal (N.m)	0.0546	0.1104
Effort maximal (N)	13.5046	28.8658
Foret à métaux		
	Mousse 15 PCF	Mousse 30 PCF
Vitesse de rotation (tr/min)	106.6	106.6
Couple maximal (N.m)	0.2210	0.3807
Effort maximal (N)	59.9468	142.37

Les valeurs mesurées dans la deuxième configuration sont bien supérieures à celles déterminées pendant les premiers essais. Ce sont donc ces valeurs qui seront retenues pour dimensionner les éléments de la perceuse.

Parti 3 : Caractérisation du vissage

L'objectif de cette partie est relativement similaire aux tests précédents. Il s'agit de là encore de mesurer le couple et l'effort de compression pendant le vissage des implants sur les deux mêmes mousses. Cependant, contrairement à la partie précédente, nous allons faire des tests que pour une seule vitesse de rotation et une vitesse d'avance. Cette dernière étant fixée par le robot.

Matériel :

- Prototype
- Capteur 6 axes NANO25-E Transducer
- Mousse corticale
- Clé Allen et implant chirurgical

Description du protocole :

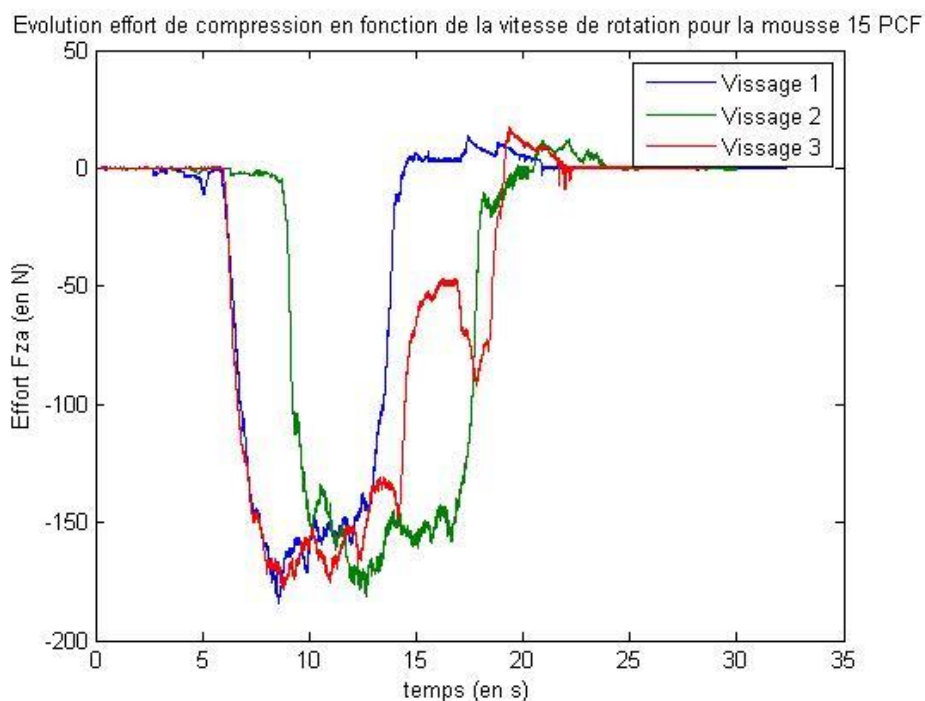
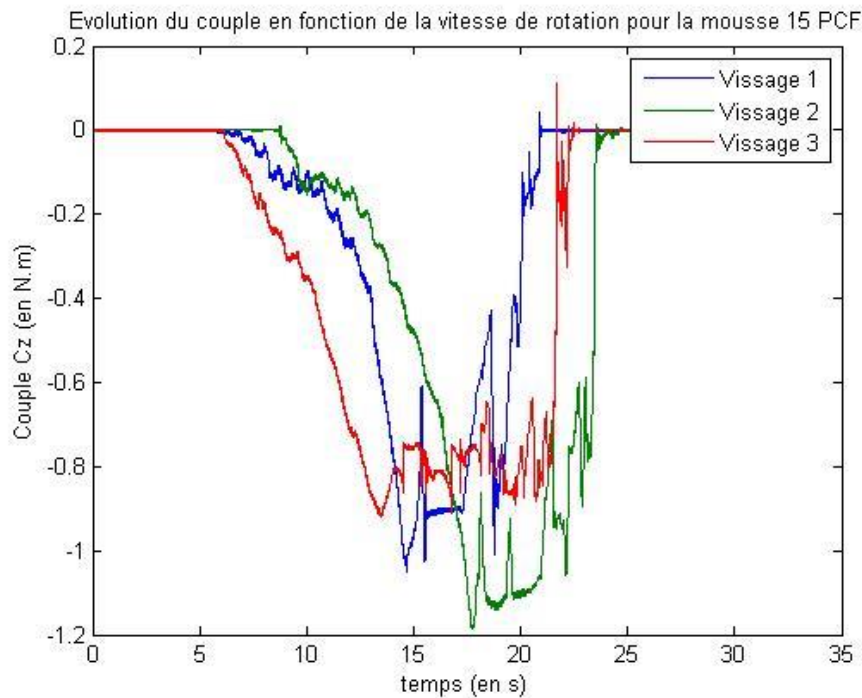
Le protocole est le même que celui de la partie précédente.

Le foret est remplacé par une clé Allen sur laquelle vient se positionner l'implant. Ce dernier est vissé dans le matériau préalablement percé au diamètre 4 sur une longueur de 30 mm. Cette opération sera réalisée pour les deux duretés de mousse (15 et 30 PCF).

Pour minimiser les erreurs d'incertitude, nous avons réalisé trois fois les tests avec les mêmes paramètres.

Résultats :

Vous trouverez ci-après l'évolution au cours du temps du couple et de l'effort de compression.



Sur le graphique représentant le couple, nous pouvons voir son augmentation lorsque l'implant commence à se visser dans le matériau. Après 3/5 secondes, nous nous rendons compte que le couple augmente plus fortement ce qui correspond au moment où le pré-perçage se termine. Nous voyons bien que le couple devient constant pendant le reste de l'opération.

Pour ce qui est de l'effort de compression, nous pouvons voir qu'il évolue linéairement pour arriver à son maximum lorsque l'implant arrive à la fin du pré-perçage.

Couple maximal (en N.m)	1.1
Effort de compression maximal (en N)	181

Ces résultats seront utilisés dans le dimensionnement des composant de la perceuse.

Remarques : Pour ces tests, nous avons des résultats concluants que pour la mousse la moins dur (15 PCF). Nous n'avons pas réussi à visser entièrement l'implant dans la mousse la plus dure puisque nous sommes limités en courant. En effet, la carte électronique de commande utilisée pour piloter le moteur de la perceuse, ne délivre pas un courant suffisamment important pour visser l'implant jusqu'au bout. Nous avons un couple maximal de 1.2 N.m, ce qui est insuffisant pour réaliser l'opération entièrement.

Pour pouvoir réaliser ces opérations, nous avons changé le Motor Shield par un Sabertooth² (cf. figure 27) développé par Dimension engineering. Ce nouveau composant permet de délivrer 2*32A ce qui est largement suffisant dans notre cas. Des tests ont donc été effectués et vous trouverez le couple et l'effort maximaux dans la partie dimensionnement du système moteur + réducteur ci-après.



Figure 27 : Platine Sabertooth

c. Mise à jour du cahier des charges

i. Tableau récapitulatif

Vous trouverez ci-dessous le tableau qui détaille les différentes fonctions du cahier des charges. Les tests présentés précédemment nous permettent de détailler la fonction principale 1 :

FP1 : « Réaliser les opérations de perçage et de vissage au niveau de la colonne vertébrale du patient. »

But : Réaliser des perçages pour insérer des vis dans ces derniers

Raison : Aider les chirurgiens dans ces opérations qui apportent peu de valeur ajoutée si elles sont faites par le chirurgien.

² Plus d'informations sur le site suivant :
<https://www.dimensionengineering.com/products/sabertooth2x32>

Conclusion : Cette fonction permet de réduire le nombre d'opérations du chirurgien, afin qu'il se concentre plus particulièrement sur les aspects médicaux. Il n'y a pas besoin d'être chirurgien pour faire des perçages et mettre des vis. Pour réaliser ces opérations, le système doit pouvoir mettre en rotation des outils ainsi qu'effectuer une translation indépendamment du robot. De plus, la rotation est gérée indépendamment de la translation. La fonction est validée.

N°	Désignation de la fonction	Critère	Niveau	Limites	Flexibilité
FP1	Réaliser les opérations de perçage et de vissage au niveau de la colonne vertébrale du patient.	Vitesse de rotation :			F1
		Perçage	100 tr/min	+/- 10	
		Vissage	100 tr/min	tr/min	
		Vitesse d'avance			
		Perçage	5 mm/s	+/-1	
		Vissage	10 mm/s	mm/s	
		Course	80mm	+/- 5 mm	
		Couple à transmettre	2 N.m	+/-0.5 N.m	
		Effort de compression	200 N	+/- 10 N	

ii. Dimensionnement du système moteur + réducteur

Etant donné que nous allons utiliser le moteur avec la même vitesse de rotation pour le vissage et pour le perçage, nous allons prendre en compte uniquement les données du vissage pour dimensionner l'ensemble réducteur et moteur. Cette étape de l'opération représente le cas le plus défavorable pour l'assemblage. Dans le tableau ci-dessous, vous trouverez un récapitulatif des différentes données utilisées pendant l'opération dans le cas de la mousse 15 PCF.

Vitesse de rotation	100	Tr/min
Vitesse d'avance	9	mm/s
Rapport de réduction	44.9	
Couple max	1.1	N.m
Effort compression max	181	N
Puissance	11.6	W

Pour pouvoir réaliser les différentes étapes de l'opération, il est nécessaire d'avoir un moteur ayant les caractéristiques suivantes :

Couple moteur	0.024	N.m
Vitesse de rotation moteur	4490	Tr/min
Puissance moteur	11.6	W

Ces caractéristiques sont valables pour un réducteur ayant un rapport de réduction de 44.9. Il est tout à fait possible de diminuer ces caractéristiques et envisager un moteur moins puissant si nous augmentons le rapport de réduction.

Il est à noter cependant que le cas le moins défavorable pour les opérations de vissage serait le cas avec la mousse à 30 PCF. Des tests ont été réalisés avec cette dernière mousse mais nous n'avons pas réussi à insérer l'implant entièrement. Nous avons été, dans un premier temps, limités par le capteur de couple puisqu'il ne peut pas mesurer un couple supérieur à 3.4 N.m. Dans un second temps nous avons été limités mécaniquement par la fixation du tournevis dans le mandrin. Les vis de pression ne suffisaient plus pour aller au bout de l'opération. Nous pouvons cependant, approximer le couple maximal à 5 N.m. Dans ce cas, si nous conservons le même rapport de réduction, nous arrivons à des caractéristiques moteur suivantes :

Couple moteur	0.111	N.m
Vitesse moteur	4490	Tr/min
Puissance moteur	52.3	W

Nous remarquons que la puissance moteur a été multipliée par environ 4.5 comme c'est le cas pour le couple.

III. Difficultés rencontrées pendant ce projet

Depuis début février et le lancement de ce projet, plusieurs difficultés ont été rencontrées. Tout d'abord, il a fallu rechercher des données techniques et mécaniques sur les os de la colonne vertébrale. Comme nous l'avons dit au début de ce rapport, l'opération chirurgicale s'effectuera au niveau des lombaires et il nous fallait trouver ces données pour pouvoir dimensionner le mieux possible les différents composants. Cependant, du fait de la zone concernée et des conséquences dramatiques qui peuvent avoir lieu, aucun test de perçage n'a été effectué auparavant permettant d'avoir des données précises. Nous avons donc perdu un temps important dans la recherche de ces informations. Nous avons donc décidé, face à cela, de modifier l'objectif du projet initial. Il ne s'agirait plus de concevoir une solution finale mais de réaliser des tests qui permettrait de compléter et de détailler le cahier des charges. Il serait alors plus facile pour Sylorus de dimensionner leur solution finale en respectant le plus possible toutes leurs contraintes.

Pour ce qui est de la fabrication du prototype, aucune difficulté n'a été rencontrée excepté le fait des différents délais de fabrication qui était à prévoir. Il a donc fallu modifier certaines pièces pour qu'elles puissent être faites en interne. De nombreux éléments ont donc été fabriqués en impression 3D ce qui a engendré certaines imprécisions notamment sur le mandrin. L'outil n'était donc pas parfaitement coaxial à l'axe de rotation. Ceci n'a cependant eu aucun effet sur les résultats.

De plus, le moteur et le réducteur utilisés étaient des éléments récupérés sur une perceuse manuel. La consommation électrique était donc importante ce qui nous a causé certains problèmes notamment sur les composants électriques qui étaient sous-dimensionnés.

Enfin, pour la réalisation des tests, nous étions limités sur l'alimentation électrique du moteur de la perceuse. Elle ne pouvait délivrer un courant supérieur à 4A. Ceci nous limitait donc dans le couple fournis par le moteur ce qui nous a empêché d'avoir des tests complets. Comme dit précédemment, les opérations de vissage n'ont pu aboutir notamment pour le matériau le plus dur.

IV. Suites possibles du projet

Ce projet ne représente qu'une petite partie de l'objectif final de l'entreprise. Leur objectif est de vendre à des chirurgiens et des hôpitaux un robot fonctionnel et qui répond à toutes les contraintes décrites dans le cahier des charges en début de ce rapport. Ce dernier est maintenant complet pour ce qui est de l'organe terminal du robot. Une solution doit donc être encore conçue et développée.

Récemment, Sylorus a acheté une nouvelle perceuse qui pourrait répondre à toutes les contraintes. Il reste donc à vérifier si les opérations de perçage et de vissage sont correctement réalisées. Par la suite, si ces tests sont concluants, un support et un carter devront encore être conçu pour que l'intégration au robot soit la plus réussie possible. Il reste également à développer un mandrin qui pourrait s'adapter à cette perceuse.

En ce qui concerne le prototype fabriqué et sa commande, de nombreuses améliorations peuvent être apportées. Pour le moment, seul le contrôle du vérin se fait en boucle fermée. Nous pouvons dans ce cas ajuster la position et la vitesse de ce dernier directement pendant les tests. Cependant, la vitesse de rotation de l'outil est, elle, contrôlée en boucle ouverte. Il n'y a donc pas d'ajustement pendant les opérations. Pour des résultats plus précis, il faudrait contrôler cette vitesse comme celle du vérin. Pour cela, un capteur est nécessaire comme un encodeur rotatif photoélectrique. Nous pourrions alors contrôler la perceuse par un régulateur PID. Enfin, si nous souhaitons améliorer les performances de contrôle du prototype et avoir des résultats plus précis, nous pouvons utiliser un autre convertisseur analogique-numérique que la platine Arduino, avec une meilleure résolution d'échantillonnage. Pour la partie électrique, le Motor Shield de la perceuse ne délivre pas suffisamment de courant pour avoir un couple suffisamment important au niveau de l'outil. Il faudrait modifier ce Motor Shield pour en avoir un suffisamment important. Par la suite, les tests de vissage pourraient alors être terminés.

Pour finir, le dernier aspect important qui était initialement prévu dans ce projet mais qui n'a pas été débuté par manque de temps est la conception du support amovible du robot. Vous avez pu voir le cahier des charges de cette partie mais il doit être complété pour intégrer les nouvelles contraintes. Une étude de solutions doit, par la suite avoir lieu pour répondre le mieux possible aux exigences.

V. Conclusion

Pour conclure, ce projet a été très enrichissant par la diversité des domaines qu'il traitait. Nous avons pu aborder différents thèmes tels que la conception, la modélisation par ordinateur, l'automatique et l'électronique. Nous avons pu mettre en liens différentes matières qui nous ont été enseignées à l'INSA de Lyon dans un projet concret.

En effet, ce sujet a commencé par l'élaboration d'un cahier des charges complet et détaillé afin de définir les différents objectifs. Malheureusement, nous n'avons pas pu mettre en œuvre tout ce qui était initialement prévu. Les objectifs de ce projet ont été changés au vu des différents résultats et de l'avancements des différentes étapes.

Nous avons, comme dit précédemment, pu concevoir et fabriquer un prototype afin de mettre en œuvre des tests de perçage et de vissage. Ces tests ont servi à compléter le cahier des charges initial afin d'aider l'entreprise à créer la meilleure solution pour leur robot.

Enfin, ce projet nous aura permis de travailler en étroite collaboration avec l'entreprise Sylorus Robotics et toutes les personnes qui y travaillent. Cette relation a permis d'ajouter un intérêt particulier aux différentes tâches qui nous étaient attribuées. Nous avons pu à travers eux, voir le lancement d'un nouveau projet qui doit durer plusieurs mois avec tous les changements et les complications que cela entraîne.

VI. Annexes

a. Annexe 1 : Caractéristiques de l'avant-bras du robot STAÜBLI TX60

Caractéristiques générales :

Charge maximale	4.5 kg
Charge nominale	3.5 kg
Poids	51.4 kg
Vitesse maximale de l'avant-bras	1445°/s
Inerties maximales axe 6	0.1 kg.m²
Plage de mouvement avant-bras	+/- 270 °
Connexion pneumatique avant-bras	2 électro distributeurs 5/2 monostables et 1 passage direct relié au pied du robot
Connexion électrique avant-bras	1 connecteur cylindrique femelle 19 contacts (8 paires torsadées dont 2 blindées)
Classe propreté selon ISO 14644-1	5
Classe de protection EN 60529	IP65/IP67

Dimensions :

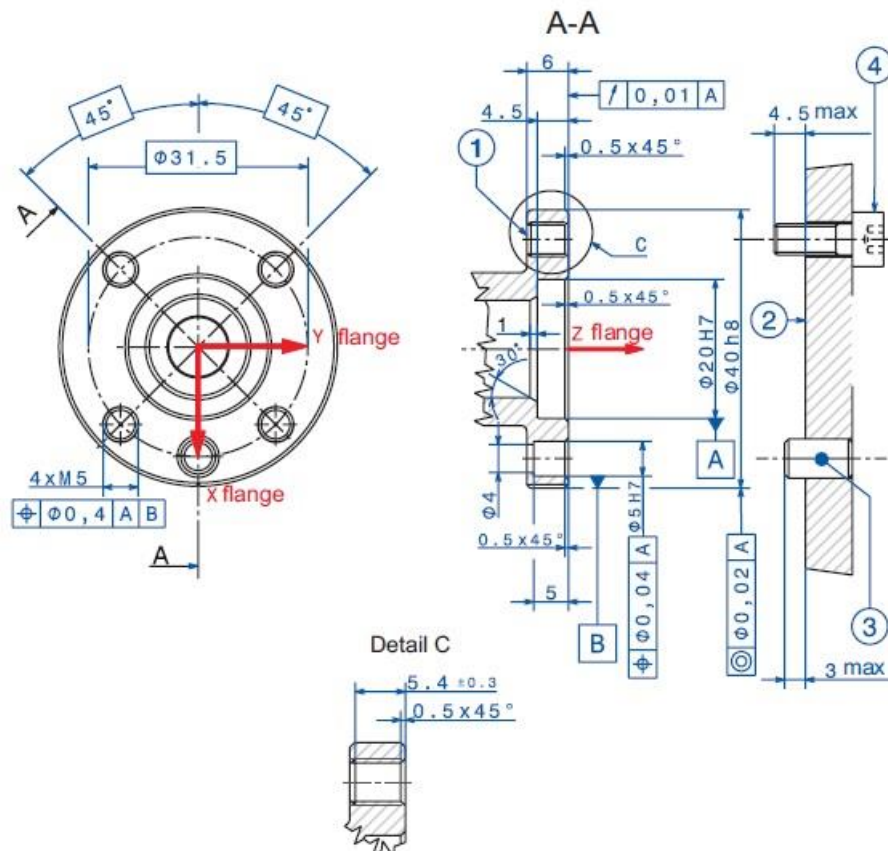


Figure 28: Dessin technique avant-bras

Caractéristiques électriques :

Le circuit électrique est composé de :

- Une embase mâle 14 contacts avec uniquement 13 câbles connectés, et un embase mâle 4 contacts (M12 Ethernet code D) sur pied
- Une embase femelle 14 contacts avec uniquement 13 câbles connectés, et une embase femelle 4 contacts (M12 Ethernet code D) sur l'avant-bras.

Les 13 contacts de commande de chaque embase sont reliés de façon suivante :

- 3 contacts d'alimentation dans chaque embase, connectés par un conducteur 3 fils de section AWG20 (contacts G-R-S),
- 5 paires torsadées de section AWG24 pour les autres contacts

Tensions d'alimentation : 60 VDC (embase 14 contacts) et 50 VDC (prise Ethernet).

Courant admissible :

- Tierce AWG20 : 3A par contact
- Paires blindées AWG26 : 1A par contact
- Paires AWG24 : 2A par contact

b. Annexe 2 : Démontage de la perceuse Black et Decker :

La perceuse étudiée est une perceuse haute performance 14.4V 2 vitesses de « Black & Decker » comme ci-dessous :



Figure 29: Perceuse Black & Decker

Caractéristiques techniques de la perceuse :

Descriptifs	Données
Puissance (V)	14.4
Type de batterie	Lithium-ions
Capacité de la batterie (Ah)	1.5
Couple maximal (N.m)	23/36
Nombre de vitesse	2
Vitesse à vide (tr/min)	0-350/ 0-1500
Position de contrôle du couple	24

Type de mandrin	Mandrin métal
Taille du mandrin (mm)	13
Capacité de perçage maximale bois (mm)	38
Capacité de perçage maximale métal (mm)	13
Puissance sonore (dB(A))	102.5
Vibration (m/s ²)	12.8

Démontage de la perceuse :

Etat de la perceuse une fois le carter retiré :

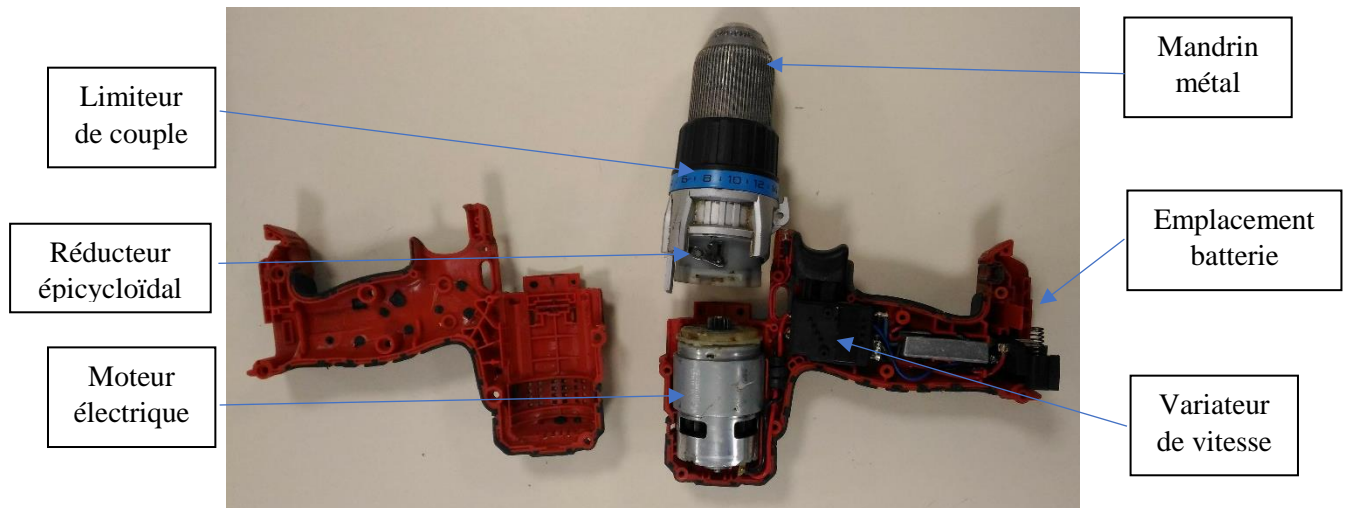


Figure 30: Photo démontage perceuse Black et Decker

Moteur électrique :

Le moteur électrique utilisée est un moteur MABUSHI, RS-755VC-8514, ayant les caractéristiques techniques suivantes :

Voltage		No load		At maximum efficiency				Stall	
Operating range	Nominal	Speed	Current	Speed	Current	Torque	Output	Torque	Current
V	V	Rpm	A	Rpm	A	mN.m	W	mM.m	A
6.0-14.4	14.4	20200	2.7	17610	1.84	111	204	863	1.25

Poids du moteur : 336 g.

Réducteur épicycloïdal :

Le réducteur est un réducteur épicycloïdal à 2/3 étages. Il permet ainsi à la perceuse d'avoir deux vitesses et deux couples transmissibles différents.



Figure 31: Réducteur de la perceuse Black et Decker

Schéma de l'engrenage vitesse 1 (3 étages) : Rapport de réduction : 49.5

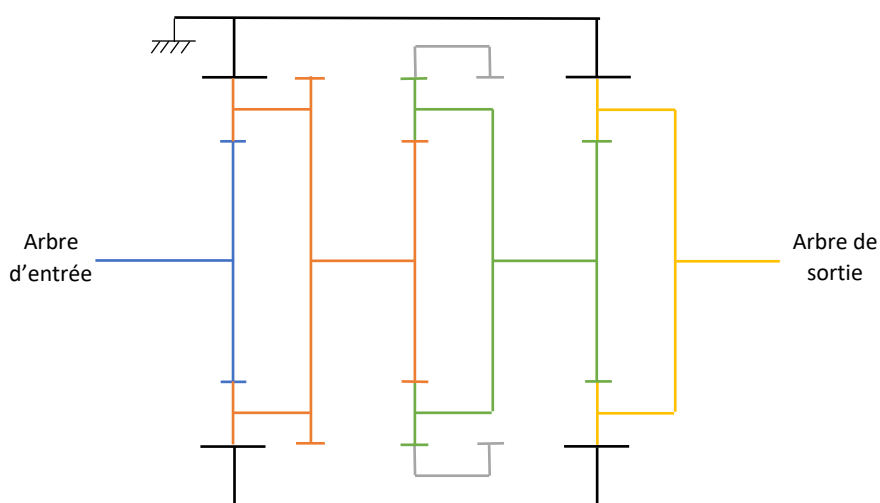
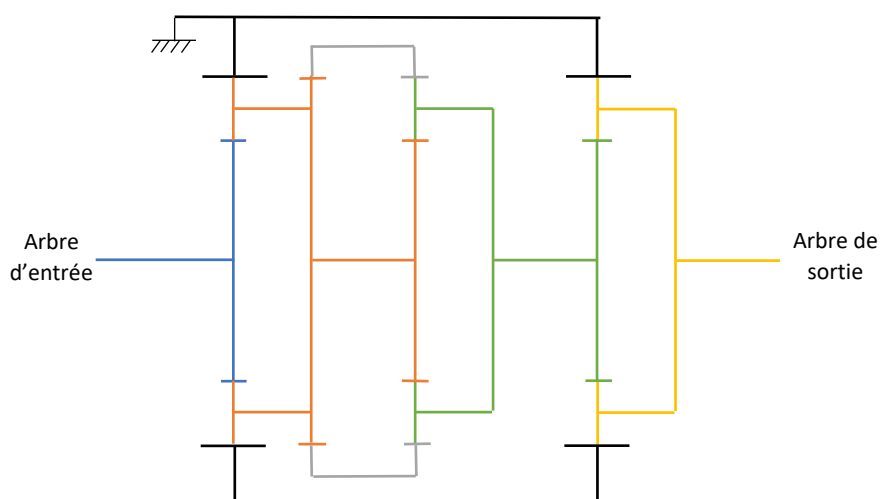


Schéma de l'engrenage vitesse 2 (2 étages) : Rapport de réduction : 13.5

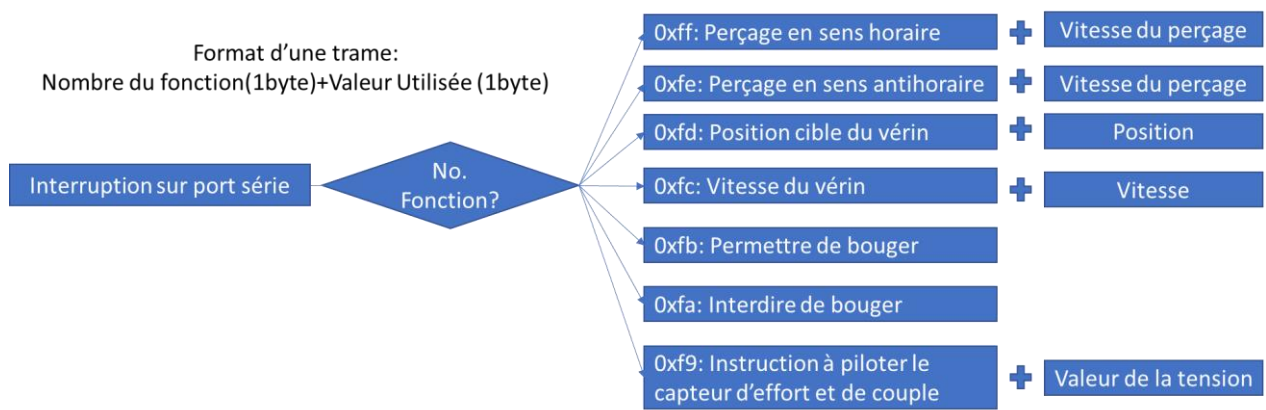


La pièce représentée en grise sur les schémas précédents translate à l'aide du bouton situé sur le dessus de la perceuse.

c. Annexe 3 : Complément les informations envoyées par l'ordinateur à l'Arduino

L'ordinateur joue le rôle d'interface entre l'Arduino et l'utilisateur. Il permet de simplifier la fenêtre de commande du prototype.

L'information envoyée par l'ordinateur est composée de 2 bytes. Le premier est un byte de fonction c'est-à-dire qu'il informe la platine Arduino sur l'opération à effectuer (Démarrer le moteur, tourner dans le sens horaire, ...) alors que le deuxième byte est lui un byte de valeur. Il permet notamment de décrire la valeur e la vitesse souhaitée ou de la position. Vous trouverez ci-dessous l'organigramme qui référence toutes les opérations possibles avec leur référencement.



Bien entendu, les informations envoyées par l'Arduino à l'ordinateur sont du même format. Il est alors possible de gérer facilement toutes les informations qui navigue de l'un à l'autre. Dans notre cas, la seule information envoyée de l'Arduino à l'ordinateur est la position réelle du vérin. Il serait cependant possible d'en rajouter comme les couple et l'effort de compression si le capteur avait été relié directement à l'Arduino.