

Tourelle deux axes pour paint-ball

Rapport final

Jean-Bernard Coté, COTJ05078907

Patrick Vallée, VALP27118804

Vincent Béliveau-Larose, BELV04049107

Simon Vidal, VIDS26088302

Présenté à

Christian Belleau

Antoine Tahan

18 décembre 2014

Table des matières

Description du produit	1
Répartition des tâches	2
Objectif.....	3
1.1 Besoins	3
1.2 Contraintes.....	3
1.3 Performance.....	3
Analyse de conception	4
1.4 Dimensionnement des actionneurs.....	4
1.4.1 Choix des moteurs et engrenage	4
1.4.2 Moteur	4
1.4.3 Engrenage	4
1.5 Analyse des éléments mécaniques	7
1.5.1 Choix des éléments	8
1.5.2 Choix des matériaux.....	10
1.5.3 Dimensionnement.....	12
Simulation	14
1.6 Modèle Simulink	14
Conclusion.....	22
A. Annexe : Dimensionnement des moteurs	i
B. Simulation	v
C. Élément de machine	ix
D. Liste des pièces et budget.....	xx

Liste des figures

Figure 1: (Gauche) Exemple d'une tourelle pour paint-ball (Droite) Ancien modèle	1
Figure 2 : Commande de mouvement utilisant la loi trapézoïdale (Gauche) et courbe d'accélération (Droite)	5
Figure 3: Vue éclatée de la tourelle	8
Figure 4: Nycast Nyloil.....	11
Figure 5: Signal d'entrée	14
Figure 6: Modèle Simulink pour l'axe vertical.....	15
Figure 7: Modèle Simulink pour l'axe horizontal	16
Figure 8: Réponse à l'échelon pour l'axe vertical.....	17
Figure 9 : Réponse à l'échelon pour l'axe vertical	18
Figure 10 : Simulink avec la commande d'entrée et la perturbation	19
Figure 11 : Profil d'entrée	19
Figure 12 : Profil de perturbations	20
Figure 13 : Réponse de sortie.....	20
Figure 14: Tourelle de paint-ball finale	22

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition des tâches.....	2
Tableau 2: Liste des besoins.....	3
Tableau 3: Liste des contraintes.....	3
Tableau 4: Liste des performances du produit	3
Tableau 5 : Données caractéristiques des moteurs	4
Tableau 6 : Données caractéristiques des engrenages.....	5
Tableau 7: Résumé des propriétés de l'aluminium 6061.....	11
Tableau 8: Résumé des propriétés du Nyloil	11
Tableau 9 : Données des moteurs.....	14
Tableau 10 : Données caractéristiques des systèmes.....	18
Tableau 11 : Valeurs des PI	20

Description du produit

Dans le cadre du projet de fin d'études de Mec-795, quatre étudiants de l'ÉTS ont reçu le mandat de concevoir un support rotatif à deux axes pour un fusil à peinture. Il s'agit d'un fusil sportif capable de tirer de petites balles de peinture à très grande vitesse. Donc, le but du support est d'être capable de tenir le fusil et de tourner dans l'axe horizontal et vertical. L'angle maximal de rotation des axes, la vitesse de déplacement ainsi que la précision devront être choisis par les membres de l'équipe pour satisfaire le promoteur du projet.

Également, le support devra être muni d'un système capable d'enlever le fusil sans devoir tout désassembler. Deux moteurs DC seront utilisés pour réussir à effectuer les deux différents mouvements et un servomoteur pour activer la gâchette de tir. Ces moteurs seront choisis par les membres de l'équipe selon la puissance requise pour faire pivoter le système avec une certaine vitesse.

De plus, pour garder les moteurs relativement compacts et pour obtenir un temps de réponse rapide, le système sera fait de telle sorte qu'il soit léger. Donc, l'analyse par élément fini sera utilisée pour arriver à optimiser les éléments mécaniques du système. Toutes les pièces seront dimensionnées si elles sont utilisées dans l'assemblage final soit les roulements, les arbres et les poulies. Par la suite, un modèle d'asservissement Simulink sera créé pour estimer le temps de réponse du système et obtenir un modèle fonctionnel.



Figure 1: (Gauche) Exemple d'une tourelle pour paint-ball (Droite) Ancien modèle

Répartition des tâches

Le tableau 1 représente les tâches du projet avec l'apport de chaque membre de l'équipe.

Tableau 1: Répartition des tâches

Tâche	Responsable	Implication			
		Vincent	Simon	Patrick	Jean-Bernard
Cahier de charge	Vincent	40%	20%	20%	20%
Choix de concept	Vincent	40%	20%	20%	20%
Dessin technique	Patrick	5%	5%	80%	10%
Simulation	Simon	10%	80%	5%	5%
Dimensionnement actuateur	Simon	15%	75%	5%	5%
Dimensionnement capteur	Simon	60%	30%	5%	5%
Élément de machine	Jean-Bernard	5%	5%	10%	80%

Objectif

Voici un rappel des principaux objectifs à atteindre (pour plus d'information, consulter le cahier de charge du projet).

1.1 Besoins

Tableau 2: Liste des besoins

Besoin
Centre de gravité bas
Centre de gravité sur l'axe de rotation
Outils d'apprentissage
Peu de maintenance
Prise de connexion électrique rapide
Filage électrique propre
Méthode de fabrication simple
Sécuritaire
Résistant à une chute de libre 1m
Résistant à la corrosion
Résistant à la poussière

1.2 Contraintes

Tableau 3: Liste des contraintes

Contrainte
12V Courant continu
Portatif
Moteurs DC et servomoteur pour la gâchette
Installation sur trépied

1.3 Performance

Tableau 4: Liste des performances du produit

Performance	Objectif
Déplacement horizontal	-60 à 60
Déplacement vertical	-22.5 à
Résolution de tir	$\pm 0.15m$
Résolution de tir verticale	$\pm 0.15m$
Temps de réponse	0.5s

Analyse de conception

La section suivante décrit les démarches qui ont permis de dimensionner les composantes de la tourelle tout au long de la conception.

1.4 Dimensionnement des actuateurs

1.4.1 Choix des moteurs et engrenage

Pour arriver à faire les choix des moteurs, l'équipe a dû poser énormément d'hypothèse pour y arriver. La vitesse pour chaque axe a dû être déterminée selon les performances et une réponse désirée. Par la suite, pour arriver à faire le bon choix de moteur la méthode de la loi de conduite trapézoïdale a été choisie pour y arriver. Cette méthode consiste à choisir le temps d'accélération (t_a), le temps de décélération (t_d) et le temps permanent (t_p) que le moteur devra parcourir. Dans notre cas, la distance que devait parcourir l'axe vertical est de 120 degrés en 0.5 seconde et 45 degrés en 0.5 seconde pour l'axe horizontal. Pour la loi trapézoïdale, l'équipe a décidé de prendre le profil de 1/3 ou le t_a , t_d et t_p sont égaux. Ce profil comprend plusieurs avantages comme d'avoir des phases transitoires les plus rapides et aussi de garder une puissance relativement basse par rapport à la pente d'accélération et décélération.

1.4.2 Moteur

L'équipe a fait le choix d'acheter les moteurs de la compagnie Maxxon. Pour l'axe vertical, le moteur est un de 50 Watts sans balais soit le modèle EC-i de type plat. Pour l'axe horizontal, un moteur de type plat a aussi été choisi soit un de 30 Watts le modèle EC 45 sans balais aussi. Le but d'avoir des moteurs plats dans le système et que l'équipe voulait réduire le volume total et la masse du système. Aussi, les deux moteurs sont sans balais ce qui a pour effet d'augmenter la durée de vie du système, il possède un meilleur rendement qu'un moteur avec balais, à un faible niveau sonore et en général ils sont plus fiables. Aussi, les deux moteurs viennent avec des capteurs à effet de Hall. Avec ces capteurs, la position des aimants pourra être déterminée en tout temps sur ces moteurs.

	Moteur 50W: Axe vertical	Moteur 30 W: Axe horizontal
Diamètre (mm)	40	42,9
Puissance (w)	50	30
Rendement (%)	81	78
Inertie (kg*m2)	0,00000105	0,00000925

Tableau 5 : Données caractéristiques des moteurs

1.4.3 Engrenage

Les choix des transmissions se sont aussi arrêtés sur le vaste inventaire qu'offre la compagnie Maxxon. Le choix pour l'axe vertical est un engrenage planétaire GP 32C avec un rendement de 60% et un

ratio de réduction de 207. Dans cet axe, l'engrenage est directement connecté au système soit moteur, transmission et le système. Pour l'axe horizontal, le choix est un engrenage planétaire GP 42C avec rendement de 81% et un ratio de réduction 9.75. Dans cet axe, il y avait une contrainte à respecter soit d'avoir un système autobloquant qui allait garder le fusil en place lors de l'arrêt du moteur. Ainsi, une vis sans fin est fixée directement à la sortie de la transmission. Le ratio de la vis et de son engrenage respectif est de 20 avec un rendement de 50%, l'équipe a choisi ce rendement à cause que la vis sans fin ne sera pas lubrifiée. En combinant, les deux ratios pour l'axe horizontal on obtient un ratio de 195 avec un rendement total de 40.5%.

	Engrenage: Axe vertical	Engrenage: Axe horizontal	Vis sans fin
Diamètre (mm)	32	42,9	-
Ratio réduction(K)	207	9,75	20
Rendement (%)	60	81	50
Inertie (kg*m2)	0,00000007	0,0000014	0,0000337

Tableau 6 : Données caractéristiques des engrenages

Dans cette partie sera présenté un exemple de calcul pour faire le choix du moteur pour l'axe vertical. En commençant, la figure ci-dessous présente les graphiques avec les différentes variables à déterminer pour choisir les moteurs.

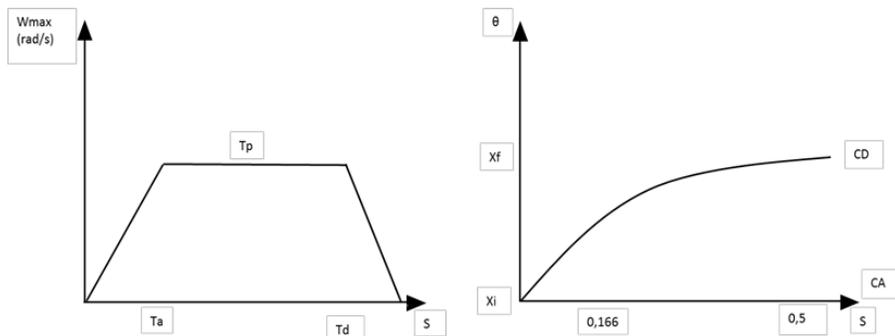


Figure 2 : Commande de mouvement utilisant la loi trapézoïdale (Gauche) et courbe d'accélération (Droite)

Toutes les relations mathématiques suivantes sont directement liées à la loi de commande choisit. Les principales équations seront présentées dans cette section. La première équation présentée sert à déterminer le Wmax que verra le système.

$$Tp = \frac{(XF - XI) - (CA + CD)}{W_{max}} \text{ ou } XI = 0, Tp = 0.5/3 \text{ et on resout pour } W_{max},$$

$$Tp = \frac{(120 * \pi / 180) * (2^{1/12} * W_{max})}{W_{max}}$$

Ainsi, ω_{max} donne 6.28 rad/s ou 60 Rpm pour l'axe vertical, par la suite accélération A_1 est donnée par

$$A_1 = \frac{6.28 \text{ rad/s}}{0.5/3 \text{ s}} = 37.68 \text{ rad/s}^2$$

Ainsi, grâce à l'accélération et l'inertie du système mécanique soit $J=0.0714 \text{ Kg m}^2$, le couple moteur (T_m) requis peut être calculé. Le rendement total est celui de la transmission choisie soit 60%. Aussi, le T_{pm} où le couple permanent pour l'axe vertical sera négligé, car dans cet axe le moteur n'aura pas de support à faire, il est localisé dans le centre de masse et l'équipe prend comme hypothèse que le système sera toujours horizontal sur le trépied. Aussi, le ratio de réduction étant très élevé pour cet axe, il devrait réduire énormément tout imprévu. Par contre, dans l'axe horizontal le T_{pm} est évalué à environ 1.65Nm, car dans cet axe le centre de masse et le centre de rotation ne sont pas alignés, mais pourrait être négligé, car la vis sans fin risque de bloquer le système en tout temps.

$$T_m = \frac{T_{pm} + J * A_1}{Nt} \text{ ou } \frac{0 + 0.0714 \text{ Kg m}^2 * 37.68 \text{ rad/s}^2}{0.6} = 4.48 \text{ Nm}$$

La puissance du moteur (P) est calculée ainsi :

$$P = 4.48 \text{ Nm} * 6.28 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 28.13 \text{ W}$$

Par la suite, un facteur de sécurité de 1,8 sera appliqué à cet axe et 2 pour l'axe horizontal. Les facteurs de sécurité sont principalement choisis en tenant compte des différentes conditions que verra le système. Soit des conditions à grands coups sur les moteurs, quand le fusil à peinture sera plein ou il devra se déplacer rapidement pour toucher différentes cibles.

$$P = 28.13 \text{ W} * 1.8 = 50.7 \text{ W}$$

Une fois la puissance trouvée avec le facteur de sécurité, le moteur peut être choisi. Ensuite viennent les calculs pour déterminer le couple du moteur. Le but est de tout ramener les charges au moteur en passant par les réducteurs.

Avec le moteur connu, le ratio de réduction peut être déterminé :

$$K_1 = \frac{12400 \text{ Rpm}}{60 \text{ Rpm}} = 206.67$$

Donc, grâce à ce ratio de réduction qu'une transmission a été choisie allant avec le moteur. L'inertie du moteur (J_m) est de $10.5 * 10^{-7} \text{ kg m}^2$. L'inerties de la transmission (J_r) est de $0.7 * 10^{-7} \text{ kg m}^2$.

Ainsi avec cette formule toutes inerties sont ramenées au moteur.

$$J_{me} = J_m + J_r + \frac{J}{K_1^2} \text{ ou } J_{me} = 10.5 * 10^{-7} + 0.7 * 10^{-7} + \frac{0.0741}{206.67^2} = 2.85 * 10^{-6} \text{ Kg m}^2$$

Pour vérifier si le moteur pourra supporter tout le couple pour faire tourner le système entier, la formule du couple moteur est recalculée :

$$Tm = \frac{Tp_m + Jme \cdot A1}{Nt} \text{ ou } Tm = \frac{0 + 2.85 \cdot 10^{-6} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 37.68 \text{ rad/s}^2}{.6} = 1.79 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}$$

Selon le manufacturier le moteur choisi peut fournir un couple de 43.2mNm donc :

$$0.0432 \text{ Nm} > 0.000179 \text{ Nm}$$

Donc, avec cette conclusion on remarque que le couple du moteur est de 240 fois supérieur à celui demandé par le système. La même méthodologie de calcul a été appliquée pour le choix du moteur dans l'axe horizontal.

1.5 Analyse des éléments mécaniques

Les éléments de machines sont partie intégrante de mécanismes et remplissent des fonctions mécaniques, pour la plupart, simples. On les classe en familles possédant des structures semblables. Les éléments les plus simples se composent d'une seule pièce placée entre ou à l'intérieur d'autres pièces pour former des ensembles plus complexes. Ils sont, pour la plupart, des éléments normalisés ou de catalogue comme les goupilles, les clavettes, les ressorts, les vis, les roues dentées, etc. Dans la majorité des cas, deux ou plusieurs pièces sont jointes pour former un élément et ainsi générer une ou plusieurs fonctions.

Autant le choix que la mise en œuvre et le contrôle des éléments de machines, dans l'optique de la réalisation d'un mécanisme, font appel à de nombreuses connaissances professionnelles que l'ingénieur se doit de posséder. Pensons rapidement aux principes de la mécanique des corps solides, aux applications des théories de la résistance des matériaux, de la mécanique des fluides, de la thermodynamique, de l'électricité sans bien sûr négliger les potentiels problèmes de fabrication des pièces ou les différentes conditions de montage. L'application de ces notions permet généralement de trouver des solutions acceptables au niveau mécanique, mais surtout au niveau économique. Il est certain que toute discussion sur les efforts et les fonctionnalités d'un élément de machine introduit un certain nombre d'hypothèses simplificatrices lors de l'élaboration d'un prototype.

Les méthodes d'investigation étant en continuelle évolution, tant au niveau théorique que pratique, permettent une augmentation des connaissances sur les divers facteurs influençant directement les sollicitations, le comportement et la durée de vie des éléments de machines. La précision des résultats en est donc améliorée grâce à l'introduction des interactions entre toutes les pièces composantes et les parties annexes. Ces recherches d'évolution et de précision s'opèrent sur plusieurs fronts : la mise en équation du comportement de l'élément et des parties voisines, l'utilisation de modèles de calcul 2D et même tridimensionnels simulés dans des logiciels appropriés ainsi que les essais en laboratoire afin de confirmer les hypothèses introduites et les résultats de l'étude théorique.

La majorité, voir même la totalité des éléments de machines courants fait l'objet de normalisations nationales. On voit même de plus en plus de normalisations internationales (ISO). Cette standardisation fixe ou même impose les méthodes de contrôle. Les éléments de machines complexes se décomposent en sous-ensembles simples et s'étudient par des méthodes analogues à celles des éléments fondamentaux. Le système n'est pas encore parfait, en effet à l'heure actuelle, beaucoup d'éléments courants ne peuvent pas encore se calculer exactement, car l'effet des diverses parties voisines en contact modifie de façon drastique les sollicitations et le comportement de l'ensemble. L'emploi de calculateurs numériques, en particulier des ordinateurs, accélère le processus de décision dans le choix final des éléments et facilite grandement la recherche de solutions optimales.

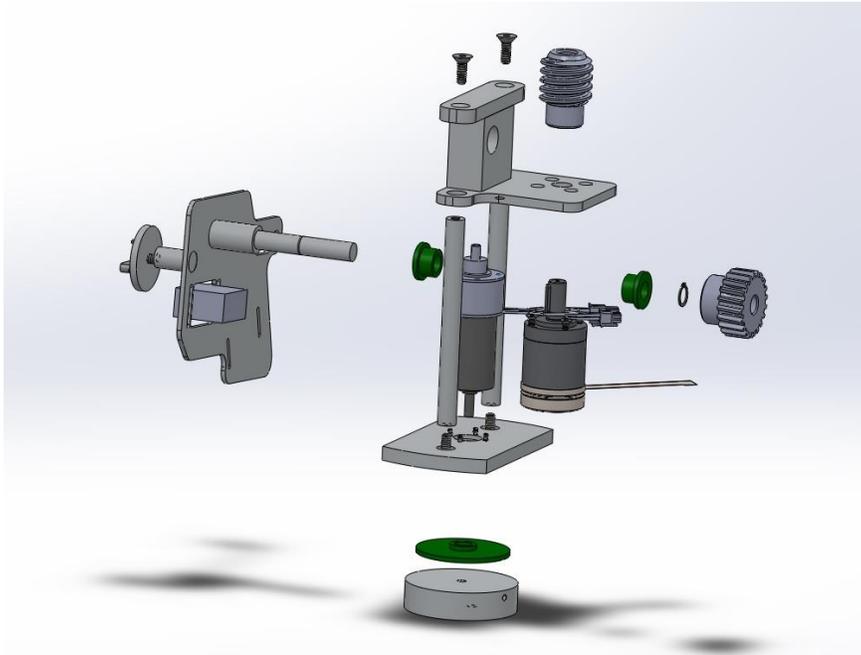


Figure 3: Vue éclaté de la tourelle

1.5.1 Choix des éléments

Comme mentionné précédemment, les éléments de machines sont classés en familles possédant des structures semblables. Nous avons choisi pour la réalisation de ce projet des objets appartenant principalement aux familles des arbres, des plaques et des tiges. Nous avons aussi quelques éléments d'outillage. La raison est simple, ce sont des objets ayant fait leur preuve dans les assemblages et ils sont faciles à obtenir et à mettre en œuvre. Une liste de chaque composante peut être retrouvée en annexe.

Vis sans fin

Nous avons opté pour un système à vis sans fin afin d'assurer la transmission de puissance pour l'axe de rotation verticale. Dans ce système, le filet de la vis sans fin s'emboîte dans les dents d'une roue dentée. On dit que la vis est sans fin puisqu'elle peut entraîner indéfiniment la roue dentée.

Voici les principales caractéristiques de ce système :

- Un tour complet de la vis sans fin fait tourner la roue dentée d'une seule dent.
- Il s'agit d'un mouvement irréversible, car le mouvement peut être amorcé seulement par la vis. Si on tente d'amorcer le mouvement par la roue dentée, la vis refuse de tourner et se bloque.
- L'utilisation de ce système modifie l'axe de rotation. En effet, la roue dentée effectuera une rotation perpendiculaire à celle de la vis sans fin.
- Ce système permet de réduire la vitesse ou encore d'augmenter la force dans un objet.

Les principaux avantages de la vis sans fin sont listés ci-après :

- Aucun glissement n'est possible dans ce système.
- On peut considérablement réduire la vitesse à l'aide de ce système.
- Ce système ne se desserre pas lorsqu'on relâche la vis sans fin, il permet de bloquer un serrage.
- Ce système offre un ajustement très précis.

Paliers lisses

Nous avons opté pour des paliers lisses pour le guidage en rotation des axes de rotation verticale et horizontal. Dans un palier lisse, les surfaces d'ajustement de l'arbre glissent sur la surface d'ajustement du palier. On appelle ces surfaces cylindriques "cylindres de glissement". L'ajustement des pièces est établi de telle sorte qu'un jeu soit créé afin d'assurer une lubrification entre les surfaces de glissement.

Les principaux avantages de l'utilisation des paliers lisses sont :

- Moins encombrants
- Plus silencieux
- Moins coûteux
- Plus rigides
- Moins sujets à la fatigue

Les paliers lisses comportent toutefois quelques inconvénients en lien avec le frottement qu'ils causent et leur mode de lubrification. Ces inconvénients seront toutefois absents, ou du moins grandement diminués grâce au choix du Nyloil, qui excelle dans ces deux critères.

Tiges structurelles

Nous avons opté pour des tiges structurelles afin de supporter l'assemblage, car en plus de nous permettre d'obtenir un dégagement adéquat pour l'installation des moteurs, elles réduisent le poids total de la structure. Elles serviront, de plus de guidage lors de l'installation de la pièce maîtresse de l'axe de rotation verticale.

1.5.2 Choix des matériaux

Le choix des matériaux pour la réalisation de ce projet a été fait en prenant en compte autant les propriétés des matériaux, leurs disponibilités sur le marché, leurs potentiels de formabilité et leurs coûts.

Nous avons opté pour de l'aluminium de série 6XXX soit du 6061 pour toutes les pièces structurelles. Ce matériel est reconnu et très utilisé dans l'industrie, il offre de bonnes propriétés mécaniques et à une masse volumique très intéressante pour notre application. Il est facilement soudable et usinable, de plus, son coût est très acceptable. Les détails concernant les propriétés de ce matériel de retrouve en annexe.

Tableau 7: Résumé des propriétés de l'aluminium 6061

	6061-O	Unités
Limite élastique	16.0	ksi
Élongation	16.0	%
Ultime	22.0	ksi
Masse volumique	2 700	Kg/m ³

Pour les paliers lisses, étant en recherche d'un poids minimal et d'un coefficient de friction ainsi que d'une durée de vie très grande, nous avons opté pour le Nyloil. Il s'agit en fait de morceaux de nylon autolubrifiant. En plus d'offrir des propriétés mécaniques dépassant celles du bronze pour notre application, sa mise en œuvre et sa résistance à l'usure sont excellentes. Son coût est aussi beaucoup plus abordable que les autres alternatives disponibles. Les détails concernant les propriétés de ce matériel de retrouve aussi en annexe.



Figure 4: Nycast Nyloil

Tableau 8: Résumé des propriétés du Nyloil

	Nyloil	Unités
Limite élastique	11.0	ksi
Élongation	55.0	%
Coeff. friction	0.12	/
Facteur d'usure (k)	4	/

1.5.3 Dimensionnement

Le dimensionnement des éléments mécaniques tels les arbres et les tiges structurelles a été effectué dans l'optique du pire scénario. En effet, afin de s'assurer d'une très grande résistance peu importe les conditions d'application, nous avons dimensionné en fonction d'un blocage sur chacun des axes. Sachant que le couple produit par le moteur varie en fonction de la vitesse de celui-ci, le couple maximal est atteint lorsque la vitesse du moteur avoisine le 0 Tpm. Les valeurs de couple à l'arrêt des moteurs ou « stall torque » seront utilisées dans les calculs de dimensionnement.

Tiges

Le dimensionnement des tiges structurelles a été effectué en considérant les hypothèses suivantes.

- Une seule tige centrée supporte l'assemblage.
- La rotation horizontale est bloquée.

La situation de blocage nous permet d'effectuer le dimensionnement avec les formules du domaine statique. Pour les calculs en torsion, la tige subit directement le couple à l'arrêt maximal du moteur. En plus de simplifier les calculs, cela nous assurera un facteur de sécurité adéquat. (Voir annexe)

Pour les calculs de flambage, les hypothèses sont semblables, en effet tout le poids de l'assemblage repose sur une seule tige centrée et les rotations sont bloquées. (Voir annexe)

Arbres

Le dimensionnement de l'arbre de rotation horizontale a été effectué en considérant l'hypothèse suivante.

-La rotation horizontale est bloquée.

Les calculs sont donc en tout point similaires au dimensionnement des tiges plus haut, la seule différence est le facteur de sécurité qui sera plus faible. (Voir annexe)

Le dimensionnement de l'arbre de rotation verticale a été effectué en considérant les hypothèses suivantes.

- La rotation verticale est bloquée.
- L'arbre subit directement le couple d'arrêts du moteur

Le dimensionnement de l'arbre se fera donc en torsion et en flexion avec les formules du domaine statique. (Voir annexe)

Plaques

Pour ce qui est du dimensionnement des plaques, nous avons été limités au niveau de l'épaisseur de certaine par la présence de paliers lisses, la plaque devait donc comporter une épaisseur suffisante pour l'installation du dit palier. Pour les autres plaques, nous avons dimensionné en fonction des charges maximales continues appliquées sur ces plaques. (Voir annexe)

Simulation

Pour arriver à déterminer les performances du système, soit dans l'axe vertical et dans l'axe horizontal, un modèle Simulink a été construit. Dans le projet de fusil à peinture, chaque axe avait une différente masse et par conséquent une différente inertie. Après avoir choisi les deux moteurs, les données techniques de chaque moteur ont été utilisées pour déterminer les performances des axes.

Données des moteurs utilisées dans Simulink		
	Axe Vertical	Axe Horizontal
Km (N*m/A)	0,0089500	0,0255000
Kb (V*s/rad)	0,0089246	0,0255329
L (H)	0,0001090	0,00056
R(Ω)	0,248	1,2
B (rpm/nNm)	0,0003226	0,00054250
J (kg*m²)	0,00000105	0,00000925

Tableau 9 : Données des moteurs

D'après les données utilisées, présentées dans le tableau 1, chaque moteur a des données très différentes. En effet, le moteur de 30W étant un moteur plat semble avoir des données nettement supérieures à celui de 50W. Par exemple, l'inertie pour le moteur de 30W est environ neuf fois plus haute que celui de 50W, comme la résistance qui elle est cinq fois plus haute. Cette différence risque de donner des performances très différentes entre les deux axes dans le Simulink.

1.6 Modèle Simulink

Les deux modèles Simulink sont présentés ci-dessous, ils sont similaires, la seule différence est les données utilisées et la consigne pour les commander. La commande est un bloc appelé un constructeur de signal (signal Builder), grâce à cette commande un profil semblable à la loi trapézoïdale est implémenté. Ci-dessous est le signal d'entrée envoyé pour l'axe vertical. Aucune erreur sur le capteur n'a été rajoutée au modèle, car l'erreur était inférieure à 0.5% de la résolution désirée.

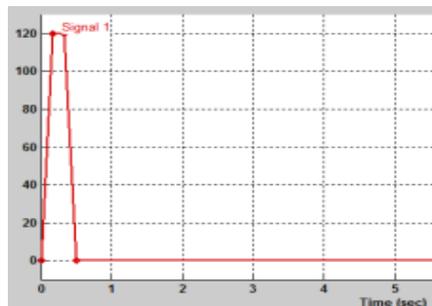


Figure 5: Signal d'entrée

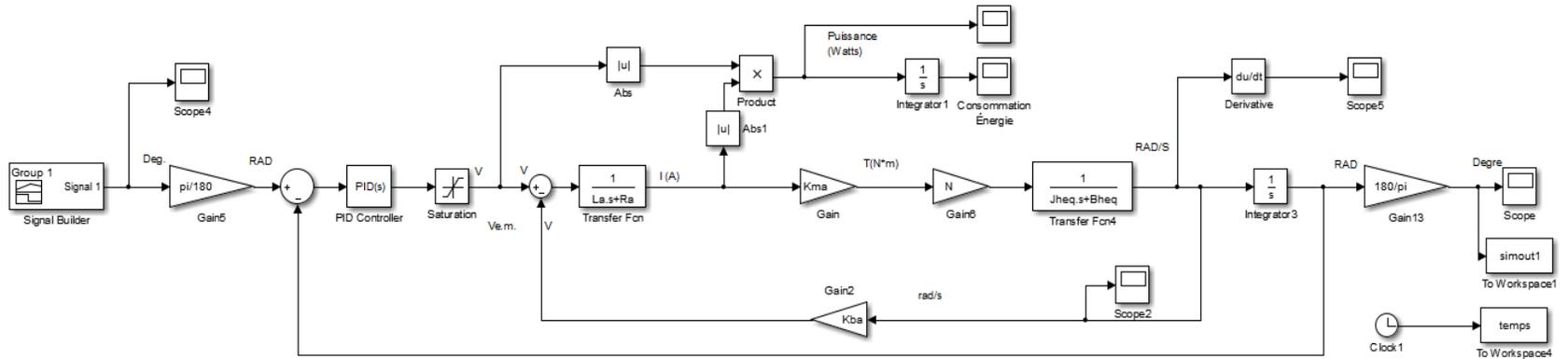


Figure 6: Modèle Simulink pour l'axe vertical

Les performances des deux systèmes ont été testées avec une commande nommée échelon. Cette commande a pour fonction d'envoyer une seule commande d'entrée très rapidement et de voir le comportement du système. De cette façon des données telles que le temps de réponse (T_s), le dépassement (d), le taux d'amortissement (ζ) du système et la pulsation (ω_n) pourront être déterminées. Voici la réponse pour l'axe vertical :

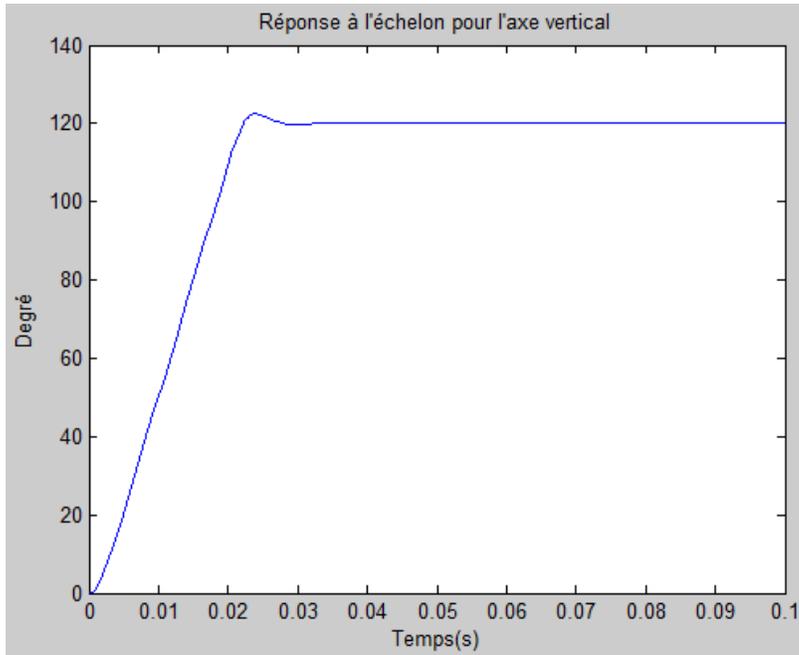


Figure 8: Réponse à l'échelon pour l'axe vertical

Pour l'axe vertical, le temps de réponse (T_s) est d'environ 30 ms, le dépassement(d) du système est de

$$d = \frac{122.4 - 120}{120} = 0.02 \text{ ou } 2\%$$

Le taux d'amortissement(ζ) est de

$$\zeta = \frac{-\ln(0.02)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(0.02)^2}} = .779 \text{ ou } 78\%$$

Et les pulsations (ω_n) pour cet axe

$$\omega_n = \frac{\pi}{0.02 \cdot \sqrt{1 - 0.779^2}} = 250.52 \text{ rad/s}$$

Voici la réponse pour l'axe horizontal, comme mentionné plus haut deux réponses très distinctes :

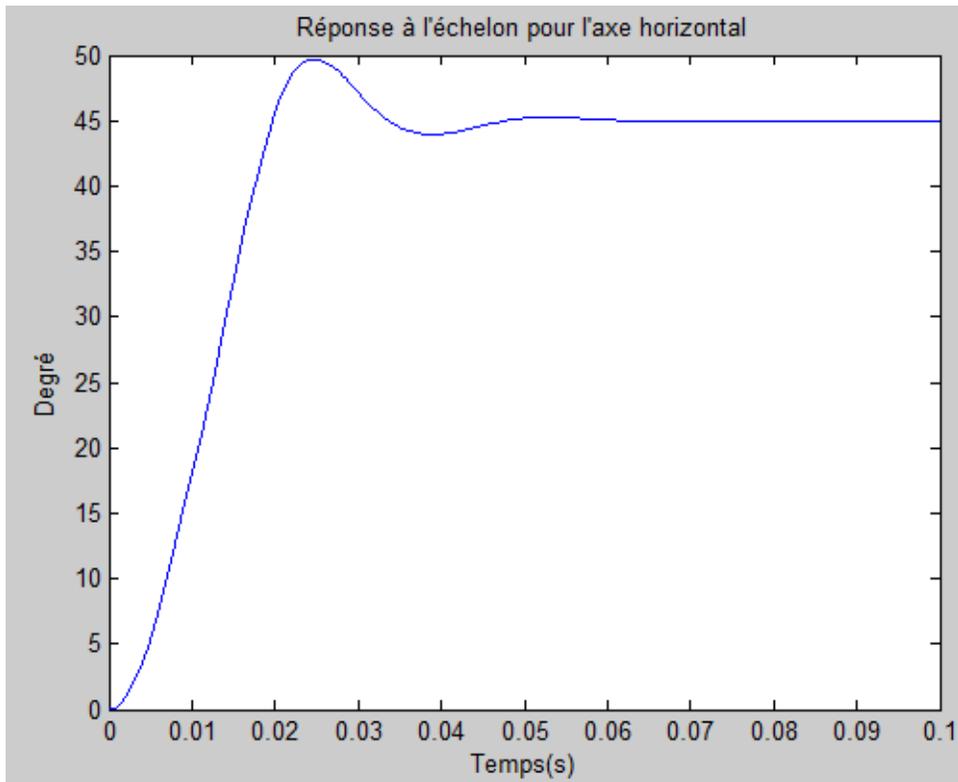


Figure 9 : Réponse à l'échelon pour l'axe vertical

La même méthodologie de calcul a été utilisée pour déterminer les performances pour l'axe horizontal. Le temps de réponse de l'axe horizontal est le double de l'axe vertical, soit de 63 ms. Cela peut s'expliquer par le fait que le moteur possède une plus grande inertie, sa résistance est plus grande et la majorité des données sont plus élevées dans l'ensemble. Le tableau suivant résume les performances des deux axes.

Données caractéristiques des systèmes		
	Axe vertical	Axe horizontal
Temps réponse(TS) en ms	30	63
Dépassement (d) en %	2	6,7
Taux d'amortissement(ζ) en %	78	65,2
Pulsations(ω_n) en rad/s	250,52	61,97

Tableau 10 : Données caractéristiques des systèmes

Pour s'assurer que le système allait être capable de répondre à une situation réelle soit de tirer sur plusieurs cibles très rapidement, l'équipe a conçu un profil de tire. Simplement en s'imaginant des gens se déplacer devant le fusil à peinture tout en respectant le temps de réponse du système. Voici la façon que la commande d'entrée et la perturbation a été disposé dans le système.

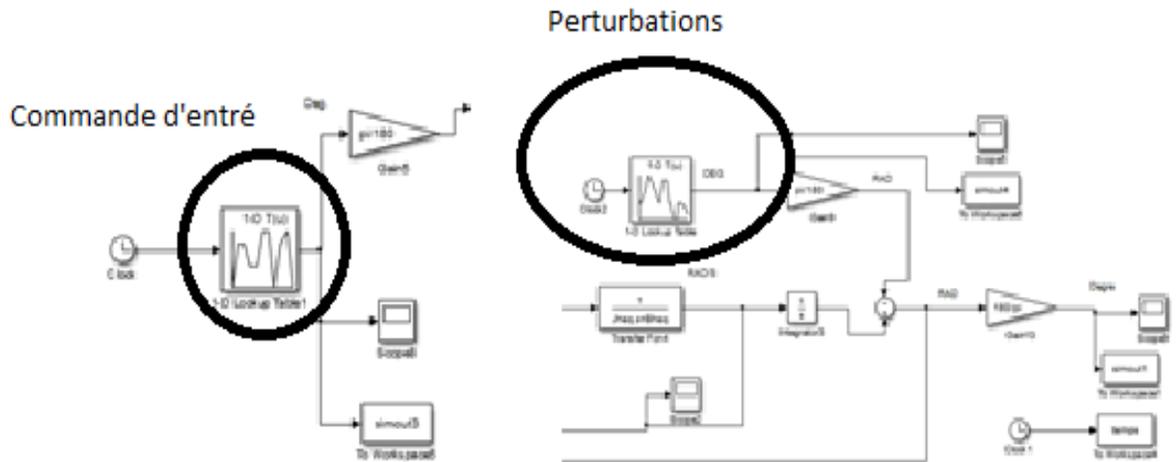


Figure 10 : Simulink avec la commande d'entrée et la perturbation

Ce graphique présente la réponse de la commande d'entrée implémentée dans le Simulink pour l'axe vertical. Ce profil varie de 0 à 120 degrés, certains changements de position sont très rapides, mais respecter toujours le temps de réponse. Un profil semblable a été appliqué à l'axe vertical.

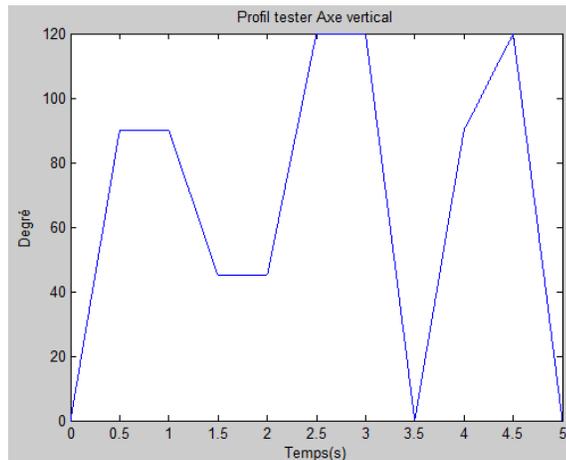


Figure 11 : Profil d'entrée

Aussi, un profil de perturbation a aussi été choisi pour simuler des imprévues telle que le vent sur le fusil ou tout autre imprévu qui pourra affecter le système. Ici, la plage varie de -6 degrés à 10 degrés.

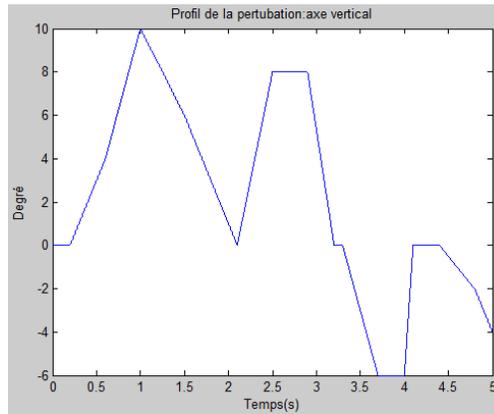


Figure 12 : Profil de perturbations

Par la suite, les résultats seront comparés pour déterminer l'erreur entre la sortie et l'entrée.

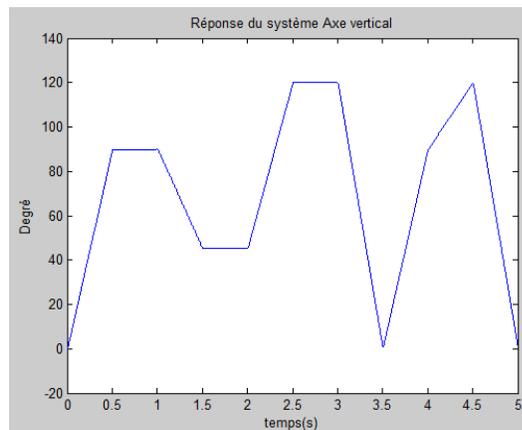


Figure 13 : Réponse de sortie

Après avoir comparé les résultats entre la sortie et l'entrée pour l'axe vertical, l'erreur moyenne était de 0.73 degré. Par contre, l'équipe a réussi à réduire cette erreur à 0.02 degré pour finalement la négliger en utilisant un proportionnel intégral au lieu d'un proportionnel seulement. Le tableau suivant présente les valeurs utilisées dans le Simulink pour réduire l'erreur entre l'entrée et la sortie des deux axes.

Valeur des PI		
	Axe vertical	Axe horizontal
Proportionnelle(K)	177,8	180
Intégral(I)	2000	2000

Tableau 11 : Valeurs des PI

Conclusion

Pour conclure, le produit développé répond aux contraintes du cahier de charge. Il permet de tirer une cible avec une **incertitude de +/- 15cm vertical et horizontal**. Également, le produit est très compact et possède un temps de réponse répondant aux exigences. La simulation Simulink a également permis de conclure tester le prototype virtuellement dans des situations avec perturbation. Ce dernier a très bien réagi. Le prix avec contingence de 15% est de **3309.75\$**. Une cage de protection peut également être rajoutée au modèle pour réduire les risques de blessure. Finalement, notre équipe est sûre que le concept présenté est fonctionnel.

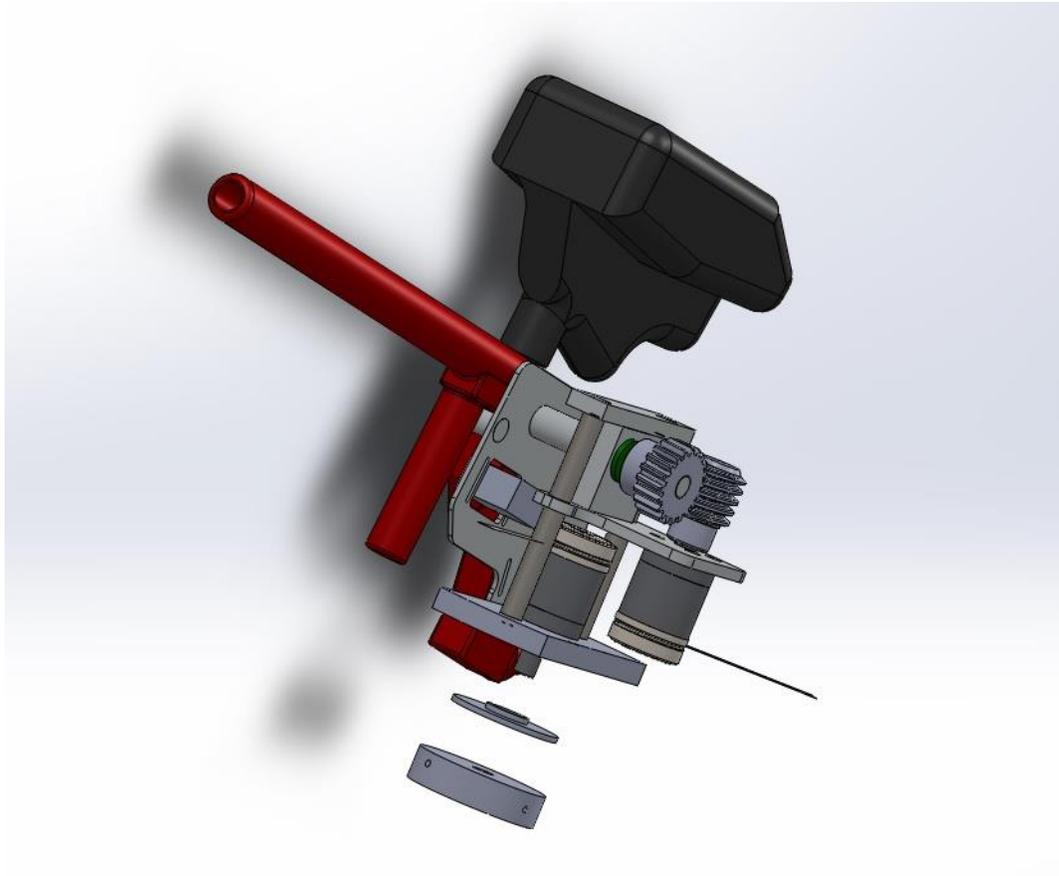
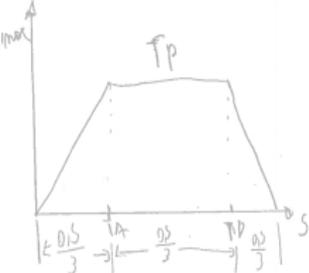


Figure 14: Tourelle de paintball finale

A. Annexe : Dimensionnement des moteurs

Axe radial



$$TA = \frac{V_{max}}{A_1} \quad CA = \frac{V_{max}^2}{2 \cdot A_1}$$

$$TD = \frac{V_{max}}{A_2} \quad CD = \frac{V_{max}^2}{2 \cdot A_2}$$

Axe Vm. $120^\circ \rightarrow 95 \text{ rev}$

$J_{AV} = 0,00714 \text{ kgm}^2$; $J_m = 10,5 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2$ (moteur)
 $J_{r1} = 0,7 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2$ (réducteur)

ou $A_1 = \frac{V_{max}}{TA} = \frac{V_{max}}{0,5/3}$ $CA = \frac{V_{max}^2}{2 \cdot A_1} = \frac{V_{max}^2}{2 \cdot \frac{V_{max}}{0,5/3}} = \frac{1}{12} V_{max} = CD = CA$

ou $TP = \frac{(Xf - Xi) - (CA + CD)}{V_{max}}$ ou $TP = \frac{0,5}{3}$ $Xf = 0$

$\frac{0,5}{3} = \frac{(120 \cdot \pi / 180) - (2 \cdot (\frac{1}{12} V_{max}))}{V_{max}} = \text{donc } V_{max} = 6,28 \text{ rad/s} \approx 60 \text{ rpm}$

$A_1 = \frac{6,28}{0,5/3} = 37,68 \text{ rad/s}^2$

Couple moteur $T_m = \frac{T_{pm}^0 + J_{AV} A_1}{\eta_t} = \frac{0,00714 \text{ kgm}^2 \cdot 37,68 \text{ rad/s}^2}{0,6} = 4,48 \text{ Nm}$

Puissance moteur $P_{AV} = 4,48 \cdot 6,28 = 27,53 \cdot 1,8 = 50,68 \text{ W}$

$f_s = 1,8$

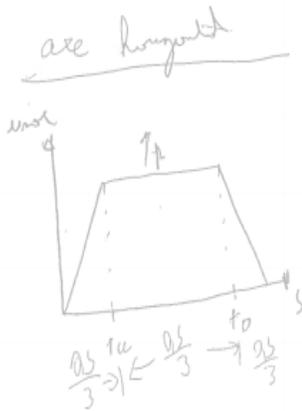
Vérification sur couple $J_{re} = J_m + J_{r1} + \frac{J/2}{n_1^2} + \frac{J_{doy}}{(n_1 n_2)^2}$

$J_{re} = 10,5 \cdot 10^{-7} + 0,7 \cdot 10^{-7} + \frac{0,0714}{(0,06/5)^2} = 3,79 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$

$T_m = \frac{T_{pr} + J_{re} a_n}{\eta_L} = \frac{0 + 3,79 \cdot 10^{-6} \cdot 37,68}{0,6} = 1,75 \cdot 10^{-4}$

Couple fourni par le moteur $43,2 \text{ mNm}$

$0,0432 \text{ Nm} > 0,000175 \text{ Nm} = 246 \text{ fois supérieur}$



$$45^\circ \rightarrow 0.5 \text{ m/s} \text{ au}$$

$$v_0 \frac{0.5}{3} = \frac{(45 \cdot \pi / 180) \cdot (2 \cdot \frac{1}{12} \cdot \omega_{\text{rot}})}{\omega_{\text{rot}}} = \omega_{\text{rot}} = 2.13 \text{ rad/s}$$

$$2.13 = 22.5 \text{ RPM}$$

trapezoidal

$$T_m = \frac{T_{pm} + J_{me} \cdot \omega}{\omega} = \frac{(3.2 \cdot 42 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.05) + 0.053 \cdot 9.42}{0.5 \cdot 0.81}$$

$$T_m = 5.30 \text{ Nm}$$

$$\eta_1 = 81\%$$

$$\eta_2 = 50\%$$

$$J_{me} = 0.053 \text{ kgm}^2$$

puissance $P = 5.3 \cdot 2.13 = 11.28 \text{ W} \cdot 2 = 22.56 \text{ W}$ on prend 30 Watts
 22.56 W = $\frac{4380}{20 \cdot 8} = \gamma = 9.73$ η_{pneu} la transmission
 ratio moteur
 20 est le ratio sur roue fin.

Verifications couple

$$J_m = 92.5 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2 ; J_{r1} = 94 \cdot 10^{-9} \text{ kgm}^2 ; J_{r2} = 3.77 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

$$J_{me} = 92.5 \cdot 10^{-7} + 94 \cdot 10^{-9} + \frac{3.77 \cdot 10^{-5}}{(9.73)^2} + \frac{0.053}{(9.73 \cdot 20)^2} = 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

$$T_{pm} = \frac{(3.2 \cdot 42 \cdot 9.81 \cdot 0.05)}{0.5 \cdot 0.81 \cdot 9.73 \cdot 20} = 0.024 \text{ Nm}$$

$$\frac{2.13}{0.5} = 14.11 \text{ rad/s}^2$$

$$T_m = \frac{T_{pm} + J_{me} \cdot \omega}{\omega} = \frac{0.024 + 1.1 \cdot 10^{-5} \cdot 14.11}{0.5 \cdot 0.81} = 0.052 \text{ Nm}$$

Couple moteur $0.055 \text{ Nm} > 0.052 \text{ Nm}$ OK

Axe vertical moteur #449463

maxon flat motor

EC-i 40 Ø40 mm, brushless, 50 Watt

NEW

Stock program
 Standard program
 Special program (on request)

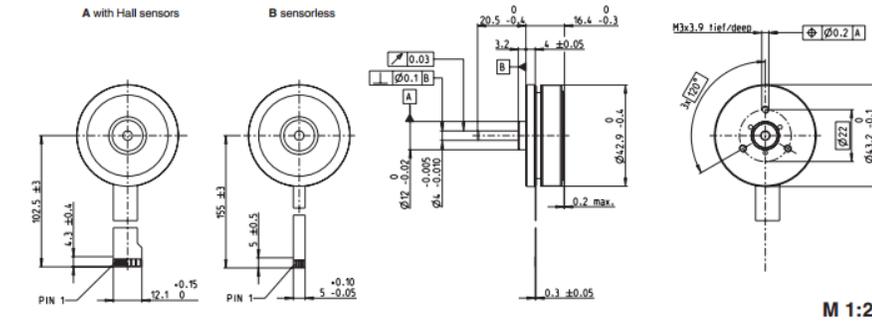
Part Numbers

with Hall sensors: 449463, 449464

Motor Data (provisional)			
Values at nominal voltage			
1	Nominal voltage	V	12 24
2	No load speed	rpm	12400 13200
3	No load current	mA	522 285
4	Nominal speed	rpm	9560 10200
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	43.2 52.7
6	Nominal current (max. continuous current)	A	4.53 2.79
7	Stall torque	mNm	432 773
8	Starting current	A	48.3 45.8
9	Max. efficiency	%	81 85
Characteristics			
10	Terminal resistance phase to phase	Ω	0.248 0.524
11	Terminal inductance phase to phase	mH	0.109 0.39
12	Torque constant	mNm/A	8.95 16.9
13	Speed constant	rpm/V	1070 565
14	Speed/torque gradient	rpm/mNm	29.6 17.5
15	Mechanical time constant	ms	3.26 1.93
16	Rotor inertia	gcm ²	10.5 10.5

Axe horizontal moteur #200142

EC 45 flat Ø42.9 mm, brushless, 30 Watt



		Part Numbers					
		200142	339281	339282	339283	339284	
A with Hall sensors		200142	339281	339282	339283	339284	
B sensorless		200189					

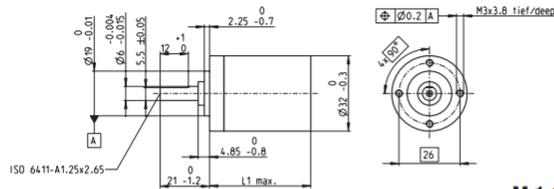
Motor Data		Values at nominal voltage						
1	Nominal voltage	V	12	12	24	24	36	36
2	No load speed	rpm	4380	4370	4380	4380	4760	4760
3	No load current	mA	144	144	73	73	55.4	55.3
4	Nominal speed	rpm	2940	2800	2940	2900	3290	3270
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	55.5	55.2	55.3	55.2	66.6	66.6
6	Nominal current (max. continuous current)	A	2.03	2.02	1.01	1.01	0.849	0.849
7	Stall torque	mNm	55.5	219	253	243	380	369
8	Starting current	A	10	8.58	4.97	4.77	5.38	5.22
9	Max. efficiency	%	78	76	78	77	81	81
Characteristics								
10	Terminal resistance phase to phase	Ω	1.2	1.4	4.83	5.03	6.69	6.89
11	Terminal inductance phase to phase	mH	0.56	0.56	2.24	2.24	4.29	4.29
12	Torque constant	mNm/A	25.5	25.5	51	51	70.6	70.6
13	Speed constant	rpm/V	374	374	187	187	135	135
14	Speed/torque gradient	rpm/mNm	17.6	20.5	17.7	18.5	12.8	13.2
15	Mechanical time constant	ms	17.1	19.9	17.2	17.9	12.4	12.8
16	Rotor inertia	gcm ²	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5

Axe vertical engrènement #166949

Planetary Gearhead GP 32 C Ø32 mm, 1.0–6.0 Nm

Ceramic Version

maxon gear



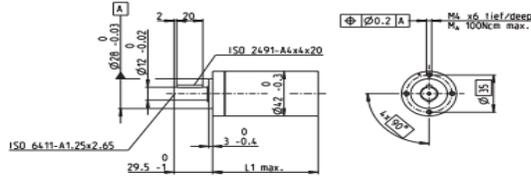
Technical Data	
Planetary Gearhead	straight teeth
Output shaft	stainless steel
Shaft diameter as option	8 mm
Bearing at output	ball bearing
Radial play, 5 mm from flange	max. 0.14 mm
Axial play	max. 0.4 mm
Max. permissible axial load	120 N
Max. permissible force for press fits	120 N
Sense of rotation, drive to output	=
Recommended input speed	< 8000 rpm
Recommended temperature range	-40...+100°C
Number of stages	1 2 3 4 5
Max. radial load, 10 mm from flange	90 N 140 N 200 N 220 N 220 N

Option: Low-noise version

		Part Numbers											
		166930	166933	166938	166939	166944	166949	166954	166959	166962	166967	166972	166977
Gearhead Data													
1	Reduction	3.7:1	14:1	33:1	51:1	111:1	246:1	492:1	762:1	1181:1	1972:1	2829:1	4380:1
2	Reduction absolute	2 1/2	6 1/2	17 1/2	27 1/2	57 1/2	132 1/2	265 1/2	398 1/2	621 1/2	1044 1/2	1567 1/2	2350 1/2
3	Max. motor shaft diameter	mm	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Part Numbers		166931	166934	166940	166945	166950	166955	166960	166963	166968	166973	166978	166983
1	Reduction	4.8:1	18:1	66:1	123:1	295:1	531:1	913:1	1414:1	2189:1	3052:1	5247:1	
2	Reduction absolute	2 1/4	6 3/4	16 3/4	25 3/4	54 3/4	100 3/4	181 3/4	282 3/4	423 3/4	624 3/4	985 3/4	
3	Max. motor shaft diameter	mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Part Numbers		166932	166935	166941	166946	166951	166956	166961	166964	166969	166974	166979	
1	Reduction	5.8:1	21:1	79:1	132:1	318:1	589:1	1093:1	1526:1	2362:1	3389:1	6285:1	
2	Reduction absolute	2 3/4	7 1/4	26 3/4	45 3/4	108 3/4	195 3/4	354 3/4	501 3/4	750 3/4	1109 3/4	2069 3/4	
3	Max. motor shaft diameter	mm	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Part Numbers		166936	166942	166947	166952	166957				166965	166970	166975	
1	Reduction		23:1	86:1	159:1	411:1	636:1			1694:1	2548:1	3656:1	
2	Reduction absolute		5 3/4	14 3/4	38 3/4	58 3/4	94 3/4			142 3/4	214 3/4	314 3/4	
3	Max. motor shaft diameter	mm	4	4	4	4	4			4	4	4	
Part Numbers		166937	166943	166948	166953	166958				166966	166971	166976	
1	Reduction		28:1	103:1	190:1	456:1	706:1			1828:1	2623:1	4060:1	
2	Reduction absolute		13 1/2	50 1/2	95 1/2	228 1/2	351 1/2			885 1/2	1270 1/2	1950 1/2	
3	Max. motor shaft diameter	mm	3	3	3	3	3			3	3	3	
4	Number of stages	Nm	1	2	2	3	3	4	4	5	5	5	5
5	Max. continuous torque	Nm	1	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6
6	Intermittently permissible torque at gear output	Nm	1.25	3.75	3.75	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
7	Max. efficiency	%	80	75	75	70	70	60	60	50	50	50	50
8	Weight	g	118	162	162	194	194	226	226	258	258	258	258
9	Average backlash no load	°	0.7	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10	Mass inertia	gcm ²	1.5	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
11	Gearhead length L1	mm	26.5	36.4	36.4	43.1	43.1	49.8	49.8	56.5	56.5	56.5	56.5

Axe horizontal engrenage #203115

Planetary Gearhead GP 42 C Ø42 mm, 3–15 Nm Ceramic Version



Technical Data	
Planetary Gearhead	straight teeth
Output shaft	stainless steel
Bearing at output	preloaded ball bearings
Radial play, 12 mm from flange	max. 0.06 mm
Axial play at axial load	< 5 N 0 mm > 5 N max. 0.3 mm
Max. permissible axial load	150 N
Max. permissible force for press fits	300 N
Sense of rotation, drive to output	=
Recommended input speed	< 8000 rpm
Recommended temperature range	-40...+100°C
Number of stages	1 2 3 4
Max. radial load, 12 mm from flange	120 N 240 N 360 N 360 N

M 1:4

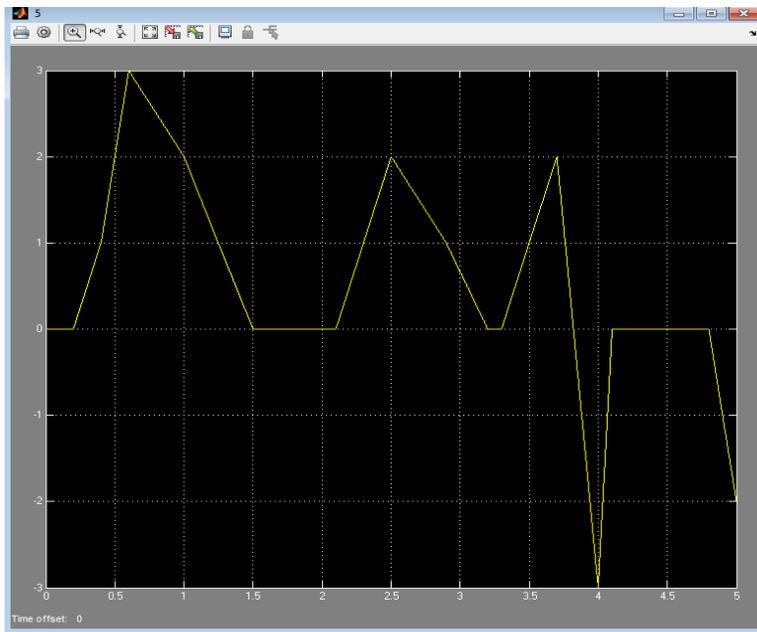
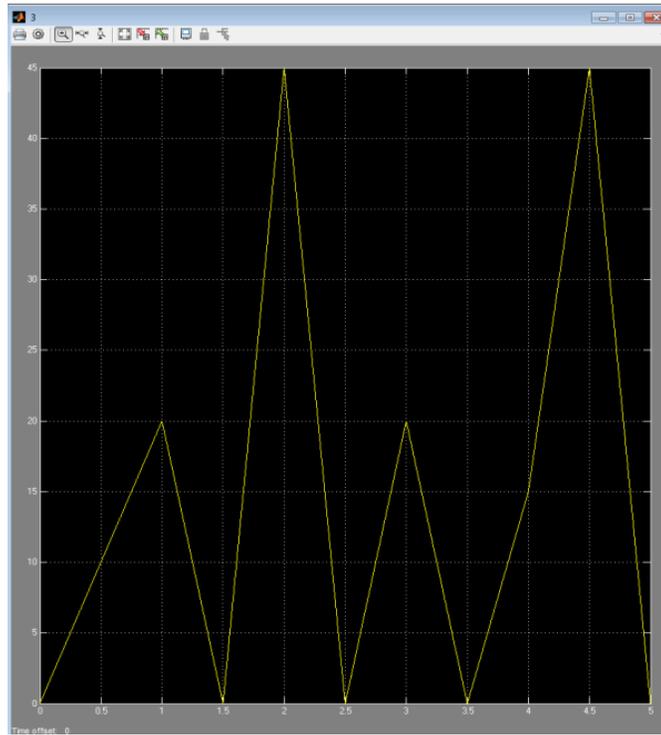
	Part Numbers									
	203113	203115	203119	203120	203124	203129	203128	203133	203137	203141
Gearhead Data										
1 Reduction	3.5:1	12:1	26:1	43:1	81:1	156:1	150:1	285:1	441:1	756:1
2 Reduction absolute	7/2	49/4	26	319/6	219/27	156	240/16	15379/64	441	756
10 Mass inertia	gcm ²	14	15	9.1	15	9.4	9.1	15	15	14
3 Max. motor shaft diameter	mm	10	10	8	10	8	8	10	10	10
Part Numbers	203114	203116	260552*	203121	203125	260553*	203130	203134	203138	203142
1 Reduction	4.3:1	15:1	36:1	53:1	91:1	216:1	186:1	319:1	488:1	936:1
2 Reduction absolute	19/2	81/6	26 1/2	497/12	91	216 1/2	449/24	497/2	489 1/2	936
10 Mass inertia	gcm ²	9.1	15	5.0	15	15	5.0	15	15	9.4
3 Max. motor shaft diameter	mm	8	10	4	10	10	4	10	10	8
Part Numbers	260551*	203117		203122	203126		203131	203135	203139	260554*
1 Reduction	6:1	19:1		66:1	113:1		230:1	353:1	546:1	1296:1
2 Reduction absolute	9/1	189/6		1183/18	339/2		828/36	2868/61	546	1296 1/2
10 Mass inertia	gcm ²	4.9	9.4		15	9.4		15	9.4	14
3 Max. motor shaft diameter	mm	4	8		10	8		10	8	10
Part Numbers		203118		203123	203127		203132	203136	203140	
1 Reduction		21:1		74:1	126:1		257:1	394:1	676:1	
2 Reduction absolute		21		149/2	126		1029/4	1183/2	676	
10 Mass inertia	gcm ²	14		15	14		15	15	9.1	
3 Max. motor shaft diameter	mm	10		10	10		10	10	8	
4 Number of stages		1	2	2	3	3	3	4	4	4
5 Max. continuous torque	Nm	3.0	7.5	7.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
6 Intermittently permissible torque at gear output	Nm	4.5	11.3	11.3	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
7 Max. efficiency	%	90	81	81	72	72	72	64	64	64
8 Weight	g	250	360	360	450	450	450	560	560	560
9 Average backlash no load	"	0.6	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
11 Gearhead length L1	mm	41.0	55.5	55.5	70.0	70.0	70.0	84.5	84.5	84.5

*no combination with EC 45 (150 W and 250 W)

B. Simulation

Données de Matlab

Type de profil implémenté pour axe horizontal et les perturbations de celui-ci.



```

clc;

clear all;

%%%%Données moteur axe verticale

Kma=8.95*10^-3; %N*m/A ok

Kba=(1070^-1)*(60/(2*pi)); %V*s/rad 1070rpm/V

La=0.109*10^-3; %H

Ra=0.248; %omega résistance

Ba=0.0003226%((29.6/0.112)^-1)*(60/(2*pi)); % 29.6rpm/nNm

Ja=10.5*10^-7; %inertie en kg*m^2

%%%%Données moteur axe horizontal

Kmb=25.5*10^-3; %N*m/A

Kbb=(374^-1)*(60/(2*pi)); %V*s/rad 374rpm/V

Lb=0.56*10^-3; %H

Rb=1.2; %omega résistance

Bb=0.0005425%((17.6/.112)^-1)*(60/(2*pi)); %17.6rpm/nNm

Jb=92.5*10^-7; %inertie en kg*m^2

%%%%Engrenage(Pour les deux Axes)

Na=206.67; %Ratio total l'engrenage axe verti.

Nb=20*9.7; %Ratio total des engrenage axe hori.

Nnv=9.7; %Ratio de engrenage axe hori.

JA=0.7*10^-7; %Kg*m^2

JB=14*10^-7; %Kg*m^2

```

JBv=3.37*10⁻⁵; %Kg*m²
 BA=0.0025; %estimation du coefficient de friction par l'expérience
 BB=0.0025; %estimation du coefficient de friction par l'expérience
 N=0.60; %efficacité du réducteurs axe vertical
 NB=0.5*0.81; %efficacité du réducteurs axe horizontal
 BM=0.0020; %estimation du coefficient de friction par l'expérience

%%%Données système mécanique

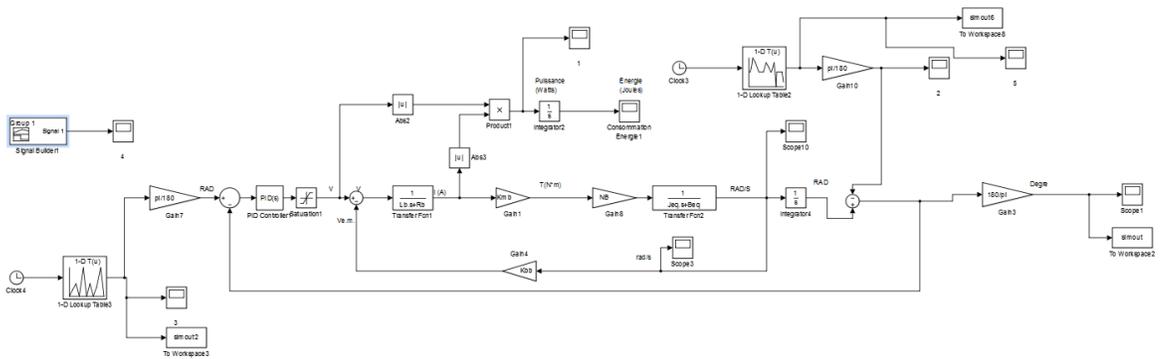
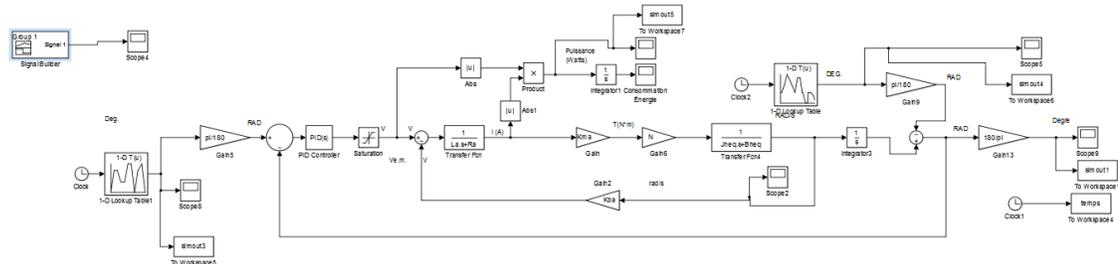
Jheq=JA+Ja+0.0714/Na²;
 Bheq=BM+Ba+BA/Na²;
 Jeq=JB+Jb+JBv/Nnv²+0.053/Nb²;
 Beq=Bb+BM+BB/Nb²;

%perturbation et consigne pour l'axe vertical

temps_cons_A = [0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5];
 cons_A = [0 90 90 45 45 120 120 0 90 120 0];
 temps_pert_A = [0 0.2 0.4 0.6 1 1.5 2.1 2.5 2.9 3.2 3.3 3.7 4 4.1 4.4 4.8 5];
 pert_A = [0 0 2 4 10 6 0 8 8 0 0 -6 -6 0 0 -2 -4];

%perturbation et consigne pour l'axe horizontal

temps_cons_B = [0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5];
 cons_B = [0 10 20 0 45 0 20 0 15 45 0];
 temps_pert_B = [0 0.2 0.4 0.6 1 1.5 2.1 2.5 2.9 3.2 3.3 3.7 4 4.1 4.4 4.8 5];
 pert_B = [0 0 1 3 2 0 0 2 1 0 0 2 -3 0 0 0 -2];



C. Élément de machine

- Fiche technique de l'aluminium 6061

Alloy 6061 Chemical Analysis			Liquidus Temperature: 1206°F			Solidus Temperature: 1080°F			Density: 0.098 lb./in. ³		
Percent Weight			Elements								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others Each	Others Total	Aluminum
Minimum	.40	—	.15	—	.8	.04	—	—	—	—	Aluminum
Maximum	.8	.7	.40	.15	1.2	.35	.25	.15	.05	.15	Remainder

Alloy 6061 Mechanical Property Limits for Rod, Bar, Tube, Pipe and Standard Shapes								
Temper	Specified Section or Wall Thickness ² (inches)	Tensile Strength (ksi)				Elongation ³ Percent Min. in 2 inch or 4D ⁵	Typical Brinell Hardness (500 kg load/ 10 mm ball)	Typical Ultimate Shearing Strength (ksi)
		Ultimate		Yield (0.2% offset)				
		Min.	Max.	Min.	Max.			
Standard Tempers¹								
O	All	—	22.0	—	16.0	16	30	12
T1	Up thru 0.625	26.0	—	14.0	—	16	—	—
T4, T4511 ⁴	All	26.0	—	16.0	—	16	65	24
T51	Up thru 0.625	35.0	—	30.0	—	8	—	—
T6, T6511 ⁴	Up thru 0.249	38.0	—	35.0	—	8	95	30
	0.250 and over	38.0	—	35.0	—	10	95	30
Alcoa Special Tempers[*]								
T6S2, T6S15	Up thru 0.249	38.0	—	35.0	—	8	95	30
	0.250 and over	38.0	—	35.0	—	10	95	30
T6S9, T6S10	Up thru 0.249	35.0	—	30.0	—	8	—	—
	0.250 and over	35.0	—	30.0	—	10	—	—
T6S4	All	38.0	—	35.0	—	6	95	—
T6H, T6511H	1.000 and over	42.0	—	38.0	—	10	95	30
T6G, T6511G	3.000 and over	42.0	—	38.0	—	10	95	30
T6X, T6511X	.250 thru 1.999	38.0	—	35.0	—	10	95	30
T5S26	All	26.0	—	16.0	—	16	65	24

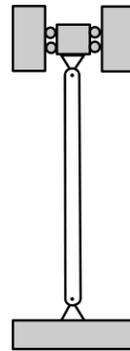
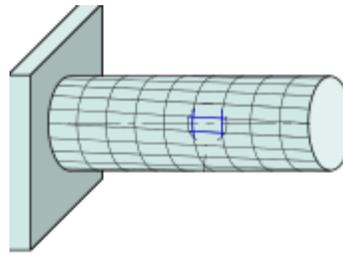
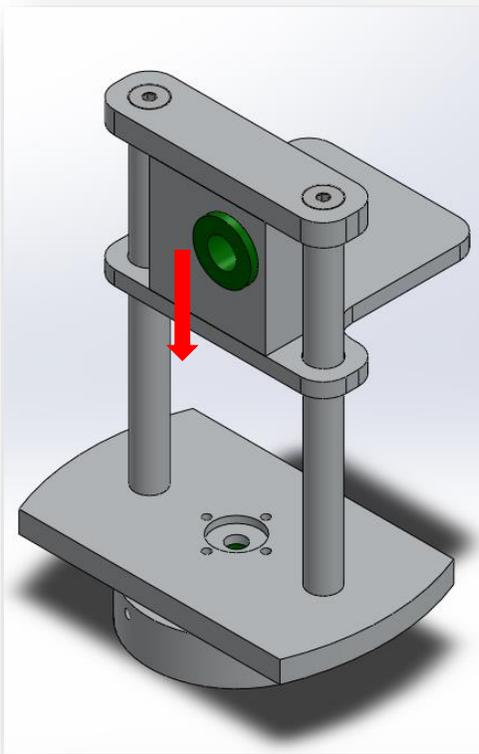
Comparative Characteristics of Related Alloys/Tempers ¹																								
Alloy	Temper	Formability		Machinability				General Corrosion Resistance				Weldability (Arc with Inert Gas)				Brazeability				Anodizing Response				
		Low	High	D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A	
6061	-O	██████████		█				█				█												N/A
6061	-T1, -T4, -T4S6, -T4511	██████████		█				█				█												
6061	-T6, -T6511, -T6S4	██████████		█				█				█												
6061	-T6H, -T6G, -T6511H, -T6511G	██████████		█				█				█												
6061	-T6S2, -T6S15	██████████		█				█				█												N/A
6061	-T6S9, -T6S10	██████████		█				█				█												N/A
6061	-T51	██████████		█				█				█												N/A
6061	-T5S26	██████████		█				█				█												N/A
6262	-T6, -T6511	██████████		█				█				█												
6063	-T6	██████████		█				█				█												
6063	-T5, -T52	██████████		█				█				█												

- Fiche technique du Nyloil

ASTM PROPERTY	UNITS	TEST METHOD	NYLOIL	NYLOIL-FG	NYLOIL-MDX
TEST OR PUBLISHED					
SP GRAV.		D792	1.14-1.15	1.14-1.15	1.14-1.15
TENSILE STRENGTH	PSI	D638	9,500-11,000	9,500-11,000	10,500-11,000
TENSILE ELONGATION	%	D638	45-55	45-55	35-45
TENSILE MODULUS	PSI	D638	375,000-475,000	375,000-475,000	425,000-475,000
COMPRESSIVE STRENGTH (@ 10% OFF SET)	PSI	D695	12,000-14,000	12,000-14,000	13,500-14,000
COMPRESSIVE MODULUS	PSI	D695	275,000-375,000	275,000-375,000	325,000-375,000
FLEXURAL STRENGTH	PSI	D790	14,000-16,000	14,000-16,000	15,500-16,000
FLEXURAL MODULUS	PSI	D790	375,000-475,000	375,000-475,000	425,000-475,000
SHEAR STRENGTH	PSI	D732	8,000-9,000	8,000-9,000	8,000-9,000
NOTCHED IZOD	FT-LBS/IN	D256	1.4-1.8	1.4-1.8	1.4-1.8
TENSILE IMPACT	FT-LBS/SQ.IN	D1822	33-36	33-36	33-36
ROCKWELL	R	D785	100-115	100-115	100-115
MELT POINT	DEG.F	D789	450+/-10	450+/-10	450+/-10
COEF. OF LINEAR THERMAL EXP.	IN/IN/DEG.F	D696	5.0X10 ⁻⁵	5.0X10 ⁻⁵	5.0X10 ⁻⁵
DEFORM UNDER LOAD	%	D621	0.7-0.8	0.7-0.8	0.7-0.8
DEFLECT. TEMP.					
264 PSI	DEG.F	D648	200-400	200-400	200-400
66 PSI	DEG.F	D648	400-430	400-430	400-430
CONT SERV. TEMP.	DEG.F		230	230	230
INTER. SERV. TEMP.	DEG.F		330	330	330
WATER ABSORPTION					
24 HR.	%	D570	.5-.6	.5-.6	5-.6
SAT.	%	D570	2.0-2.5	2.0-2.5	2.0-2.5
COEFF. OF FRICTION					
DYNAMIC			.12	.12	.12
MAX PV.					
UNLUBED @ 40 FPM	PSI x FPM		16,000	16,000	16,000
WEAR FACTOR K			4	4	4

- Calcul des tiges

DCL Équivalent



Torsion

$$G_{\text{alu}} = 25,9 \text{ GPa}$$

$$\gamma_{\text{max}} = 1^\circ \text{ ou } 0,017 \text{ rad.}$$

$$J = \frac{\pi}{32} * (2 * r)^4$$

$T_{\text{max}} = 106272 \text{ Nmm}$ → Couple démultiplié produit par la combinaison du moteur et de la boîte d'engrenage.

$$\tau = G * \gamma = 25900 * 0.017 = 440,3 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{T * r}{J} \rightarrow 440,3 \frac{106272 * r}{\frac{\pi}{32} * (2 * r)^4}$$

$$r = 5,35 \text{ mm} \rightarrow d = 10,7 \text{ mm}$$

Un diamètre de 1/2" est requis pour cette application.

Flambage

$$E_{\text{alu}} = 69 \text{ GPa}$$

$L = 203,2 \text{ mm}$

$K = 2$

$P_{cr} = 45,45 \text{ N} \rightarrow$ Charge estimé à environ 10 lbs.

$$I = \frac{\pi * r^4}{4}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi * E * I}{(2 * L)^2} = \frac{\pi * 69000 * \left(\frac{\pi * r^4}{4}\right)}{(2 * 203,2)^2}$$

$r = 2,16 \text{ mm} \rightarrow d = 4,33 \text{ mm}$

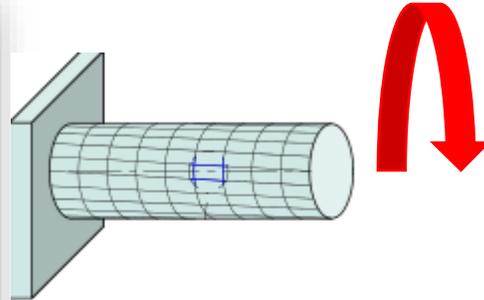
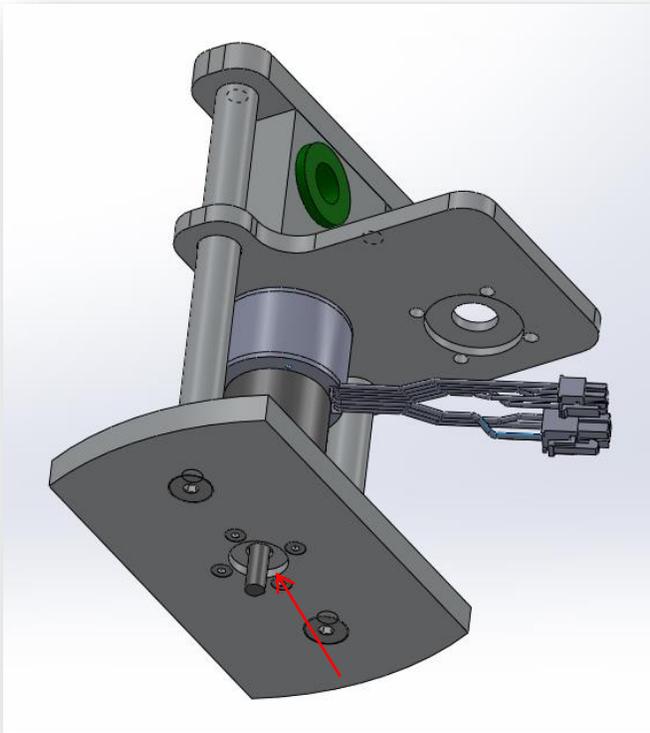
Un diamètre de 1/4'' est requis pour cette application.

Le dimensionnement en Torsion demande la plus grande valeur de diamètre, nous retiendrons donc la valeur de 1/2'' pour le diamètre des tiges structurales.

- Calcul des arbres

Arbre rotation horizontale

DCL Équivalent



Le même calcul en torsion s'applique à l'arbre du moteur, car lors d'un blocage il recevra tout le couple du moteur

aussi.

Torsion

$$G_{\text{alu}} = 25,9 \text{ GPa}$$

$$\gamma_{\text{max}} = 1^\circ \text{ ou } 0,017 \text{ rad.}$$

$$J = \frac{\pi}{32} * (2 * r)^4$$

$T_{\text{max}} = 106272 \text{ Nmm} \rightarrow$ Couple démultiplié produit par la combinaison du moteur et de la boîte d'engrenage.

$$\tau = G * \gamma = 25900 * 0.017 = 440,3 \text{ MPa}$$

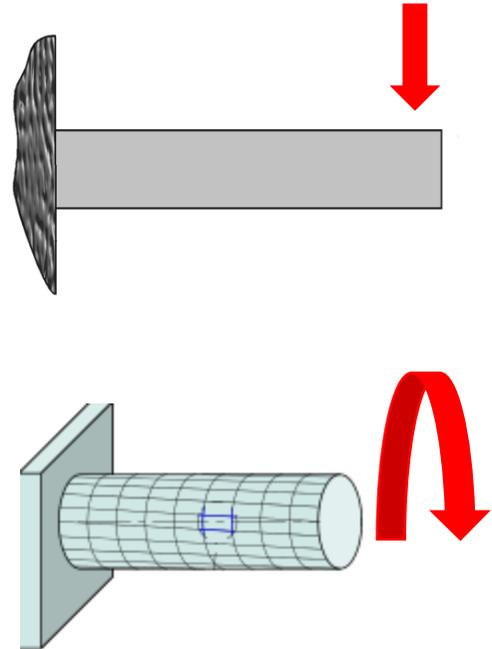
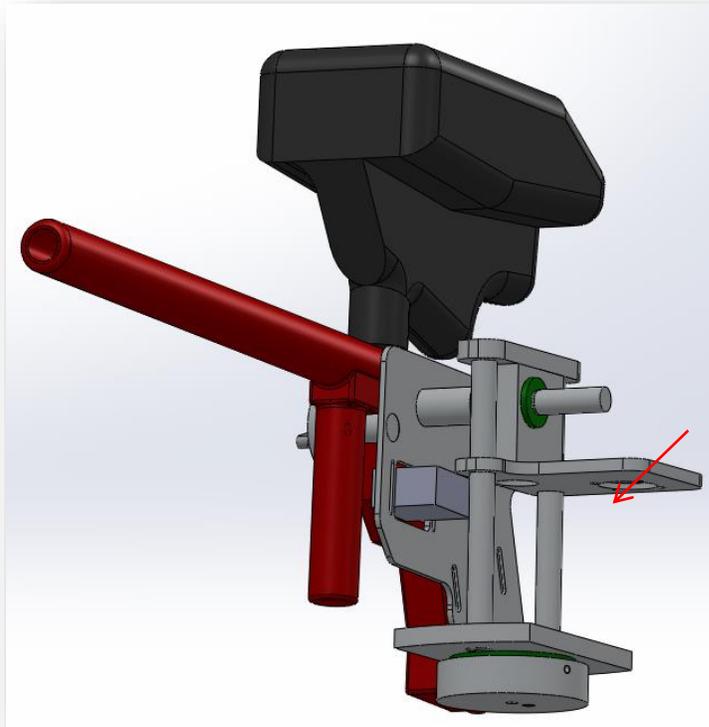
$$\tau = \frac{T * r}{J}$$

$$r = 5,35 \text{ mm} \rightarrow d = 10,7 \text{ mm}$$

L'arbre du moteur devra donc aussi avoir un diamètre de 1/2".

Arbre de rotation verticale

DCL Équivalent



Torsion

$$G_{\text{alu}} = 25,9 \text{ GPa}$$

$$\gamma_{\text{max}} = 1^\circ \text{ ou } 0,017 \text{ rad.}$$

$$J = \frac{\pi}{32} * (2 * r)^4$$

$T_{\text{max}} = 13320 \text{ Nmm}$ → Couple démultiplié produit par la combinaison du moteur et de la boîte d'engrenage.

$$\tau = G * \gamma = 25900 * 0.017 = 440,3 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{T * r}{J} \rightarrow 440,3 \frac{13320 * r}{\frac{\pi}{32} * (2 * r)^4}$$

$$r = 2,68 \text{ mm} \rightarrow d = 5,36 \text{ mm}$$

Un diamètre de 1/4'' est requis pour cette application.

Flexion

$$L = a = 31,825 \text{ mm}$$

$$E = 69000 \text{ MPa}$$

$$I = \frac{\pi * r^4}{4}$$

$$V_{\max} = -0,01 \text{ mm}$$

$$w = 44,59 \text{ N}$$

$$v = -\frac{w}{6 * E * I} * [0 - L^3 + 3 * L^2 * a]$$

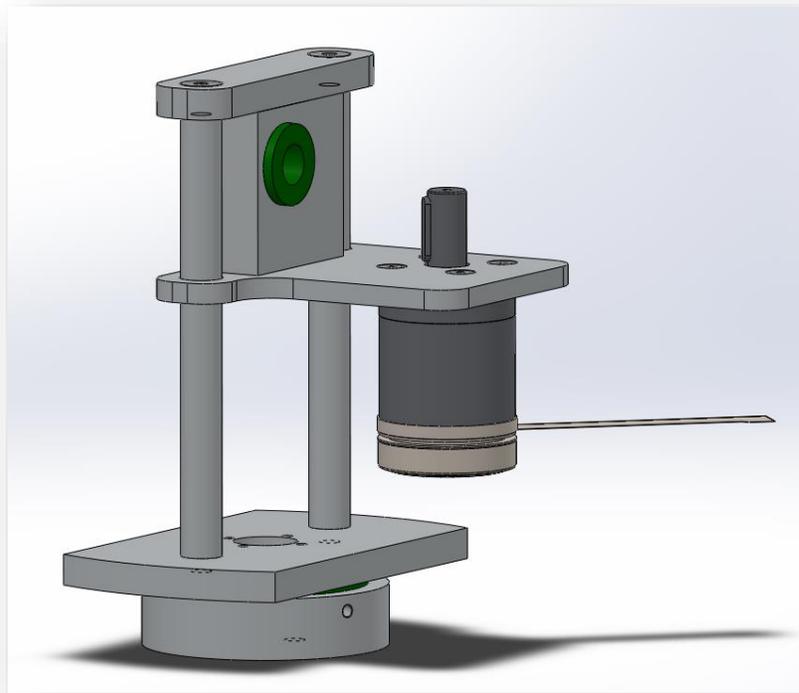
$$-0,01 = -\frac{44,59}{6 * 69000 * I} * [0 - 31,825^3 + 3 * 31,825^2 * 31,825]$$

$$I = 694,34$$

$$r = 5,45 \text{ mm} \rightarrow d = 10,9 \text{ mm}$$

Un diamètre de 1/2'' est requis pour cette application.

Le dimensionnement en Flexion demande la plus grande valeur de diamètre, nous retiendrons donc la valeur de 1/2'' pour le diamètre de l'arbre de l'axe de rotation verticale.



Flexion

$$L = 69,85 \text{ mm}$$

$$b = 34,1 \text{ mm}$$

$$a = 19,89 \text{ mm}$$

$$E = 69000 \text{ MPa}$$

$$I = \frac{L \cdot h^3}{3}$$

$$V_{\max} = -0,01 \text{ mm}$$

$$w = 5,25 \text{ N}$$

$$v = -\frac{w}{24 * E * I} * \left[(L - a)^4 - 4 * b * L^3 + 12 * b * \left(a + \frac{b}{2}\right) * L^2 \right]$$

$$-0,01 = -\frac{5,25}{24 * 69000 * I} * \left[(69,85 - 19,89)^4 - 4 * 34,1 * 69,85^3 + 12 * 34,1 * \left(19,89 + \frac{34,1}{2}\right) * 69,85^2 \right]$$

$I = 10619$

$h = 7,69 \text{ mm}$

Une épaisseur de $5/16''$ est requise pour cette application.

D. Liste des pièces et budget

Sous assemblage	Catégorie	Description	Matériaux	Quantité	Fournisseur	Numéro	Prix Unitaire	Taxe	Frais	Prix total
Prise fusil	Pièce usinée/fabriquée	Arbre de support pointeur	Alu 6061	1		PR-USI-001	50\$	- \$	- \$	50.00 \$
Prise fusil	Pièce usinée/fabriquée	Plaque de support du pointeur	Alu 6061	1		PR-USI-002	50\$	- \$	- \$	50.00 \$
Prise fusil	Pièce standard	Boucle de serrage rapide 3/4po (29695T193)	Nylon	3	McMaster-Carr	PR-STD-001	2.60\$	- \$	- \$	8.14 \$
Prise fusil	Pièce standard	Servo Moteur Hi-tec	N/A	1	Abra-Electronics	PR-STD-002	0\$	- \$	- \$	- \$
Axe horizontale	Pièce standard	Moteur 30W (200142)	N/A	1	MaxonMotor	XH-STD-001	100.38 \$	13%	- \$	113.43 \$
Axe horizontale	Pièce standard	Vis (#3-0.5 20mm) (91294A136)	Acier allié	20	McMaster-Carr	XH-STD-003	0.05 \$	13%	- \$	1.01 \$
Axe horizontale	Pièce standard	Vis sans fin Module 2 (AG2-20R1)	Alu & Bronze	1	QTC Metric Gear	XH-STD-004	30.00 \$	13%	- \$	33.90 \$
Axe horizontale	Pièce standard	Engrenage Module 2(AG2-20R1)	Alu & Bronze	1	QTC Metric Gear	XH-STD-005	30.00 \$	13%	- \$	33.90 \$
Axe horizontale	Pièce usinée/fabriquée	Tige de support	Alu 6061	2		XH-USI-001	25.00 \$	13%	- \$	50.00 \$
Axe horizontale	Pièce usinée/fabriquée	Support moteur et Axe H. Assemblage	Alu 6061	1		XH-USI-002	200.00 \$	13%	- \$	200.00 \$
Axe horizontale	Pièce usinée/fabriquée	Support moteur et Axe Pièce #1 (Inférieur)	Alu 6061	1		XH-USI-002A	\$	13%	- \$	- \$
Axe horizontale	Pièce usinée/fabriquée	Support moteur et Axe Pièce #2 (Milieu)	Alu 6061	1		XH-USI-002B	- \$	13%	- \$	- \$
Axe horizontale	Pièce usinée/fabriquée	Support moteur et Axe Pièce #3 (Supérieur)	Alu 6061	1		XH-USI-002C	- \$	13%	- \$	- \$
Axe horizontale	Pièce usinée/fabriquée	Palier lisse H.	Nyloil	1		XH-USI-003	50.00 \$	- \$	- \$	50.00 \$

December 18, 2014

XX

Tourelle deux axes pour paint-ball

Sous assemblage	Catégorie	Description	Matériaux	Quantité	Fournisseur	Numéro	Prix Unitaire	Taxe	Frais	Prix total
Axe verticale	Pièce standard	Moteur 50W (449463)	N/A	1	Maxonmotor	XV-STD-001	254.00 \$	13%	- \$	287.02 \$
Axe verticale	Pièce standard	Vis de serrage arbre de moteur (#3-0.5)(92605A511)	Acier Inox. 316	10	McMaster-Carr	XV-STD-003	0.20 \$	13%	- \$	2.03 \$
Axe verticale	Pièce usinée/fabriquée	Adaptateur pour trépied	Alu 6061	1		XV-USI-001	50.00 \$	- \$	- \$	50.00 \$
Axe verticale	Pièce usinée/fabriquée	Palier lisse V.	Nyloil	1		XV-USI-002	50.00 \$	- \$	- \$	50.00 \$
Axe verticale	Pièce usinée/fabriquée	Plaque support structure complète	Alu 6061	1		XV-USI-003	50.00 \$	- \$	- \$	50.00 \$
Axe verticale	Pièce standard	Transmission moteur 50W V. (166949)	N/A	1	MaxonMotor	XV-STD-002	266.25 \$	13%	- \$	300.86 \$
Axe horizontale	Pièce standard	Transmission moteur 30W H.(203114)	N/A	1	MaxonMotor	XH-STD-002	359.48 \$	13%	- \$	406.21 \$
Axe verticale	Pièce standard	Encodeur Easy 16 512 (465801)	N/A	1	MaxonMotor	XV-STD-003	104.75 \$	13%	- \$	118.37 \$
Axe horizontale	Pièce standard	Encodeur MILE 512 (462003)	N/A	1	MaxonMotor	XH-STD-003	180.75 \$	13%	- \$	204.25 \$
Prise fusil	Pièce standard	Vis papillon(91510A157)	Acier plaqué zinc	1	McMaster-Carr	PR-STD-003	1.35 \$	13%	- \$	1.53 \$
Général	Pièce standard	Controlleur de moteur(367676)	N/A	1	MaxonMotor	GE-STD-001	653.38 \$	13%	- \$	738.32 \$
Général	Pièce standard	Battery 12V 21 AH (SKU:052721)	N/A	1	Addison-Electronics	GE-STD-002	69.99 \$	13%	- \$	79.09 \$
Total	26									2,878.04 \$
								Contingence	15%	3,309.75 \$

December 18, 2014

xxi

Tourelle deux axes pour paint-ball