

Conception de servomécanismes : Vis à billes

Introduction:

Ce projet consiste à la conception d'un servomécanisme novateur, axé sur un axe linéaire entraîné par un moteur électrique rotatif. Notre objectif est de développer un système capable de générer un mouvement précis selon une trajectoire spécifiée, en utilisant un système de transmission à vis à bille. Ce servomécanisme répondra aux exigences détaillées du cahier des charges.

Pour sélectionner les composants clés de notre système, nous nous appuierons sur des catalogues spécialisés de fournisseurs renommés tels que Moteurs NUM DRIVE pour le choix du moteur électrique et Bosch Group pour le choix de la vis à bille.

Rappel du cahier des charges :

1. Caractéristiques cinématiques			2. Cycle test		3. Caractéristiques de la charge		
<i>course</i>	<i>v</i>	<i>a</i>	<i>d</i>	<i>tcycle</i>	<i>m</i>	<i>c</i>	<i>f</i>
"m"	"m/s"	"m/s ² "	"m"	"s"	"kg"	"Ns/m"	"N"
0.9	1	10	0.2	0.4	800	360	1500

Les différents calculs sont effectués sur une feuille de calcul (annexe).

Présélection de moteurs - variateurs :

Au début du projet, nous avons envisagé de sélectionner le moteur et le variateur séparément. Cependant, nous avons rencontré une limitation qui nous empêchait d'accéder à la puissance maximale souhaitée. Par conséquent, nous avons décidé d'adopter une approche différente en optant pour un moteur et un variateur associés en tant qu'ensemble. Étant donné les exigences spécifiques de notre application, nous avons effectué une présélection préliminaire en nous concentrant sur les moteurs de type BPH. Dans cette présélection, nous avons veillé à ce que les puissances des moteurs choisis soient supérieures à 9680 watts, afin de répondre aux besoins de puissance spécifiés pour notre système. En effet, nous avons respecté la formule suivante:

$$P_{\text{moteur}} > (m * a + F_{\text{ext}}) * v \quad (F_{\text{ext}}: \text{force extérieure})$$

Voici les moteurs présélectionnés grâce à cette première condition ainsi que les caractéristiques associées:

1ère condition sur Pm	9860 (W)	pour la sélection de la shortlist				
Moteurs présélectionnés	Variateur	Calibre	Pmax (kW)	Couple max(N.m)	Inertie(kg.m2)	wm (rad/s)
BPH 142 7N	MDLU,MDLA	75	11	142	0.01	314.16
BPH 190 2R	MDLU,MDLA	75	11.1	36	0.00825	445.06
BPH 190 3N	MDLU,MDLA	75	11.3	54	0.0102	314.16
BPH 190 4N	MDLU,MDLA	75	14.5	69	0.0121	314.16
BPH 190 7K	MDLU,MDLA	75	15.7	120	0.018	209.43
BPH 190 AK	MDLU,MDLA	100	21	145	0.0238	209.43

Avant de passer à la présélection des vis, nous allons calculer pour chaque moteur la plage de pas de vis correspondant.

Nous allons d'abord calculer le rapport de transmission minimal et maximal pour chaque moteur selon la formule suivante:

$$r = \frac{C \pm \sqrt{C^2 - 4 * J * m * a^2 * (1 + f^*)}}{2 * m * a^2 * (1 + f^*)} \text{ avec } f^* = \frac{F_{ext}}{m * a} \text{ (facteur de force extérieure)}$$

Ainsi, on obtient le pas minimal et maximal grâce à cette formule:

$$Pas_{min} = r_{min} * 2 * \pi * 1000 \text{ et } Pas_{max} = r_{max} * 2 * \pi * 1000$$

La vis choisie devra donc être dans cette plage.

Présélection de vis :

Etant donné les limites de plage inaccessibles pour nos moteurs, nous allons maintenant procéder à la sélection des vices. Pour faire ce choix de manière appropriée, nous devons tout d'abord satisfaire une condition concernant la capacité de charge statique. En effet, la capacité de charge statique doit être supérieure à la force extérieure sur 0.9.

$$C0 > \frac{f_e}{0.9} \text{ avec } f_e = m * a + c * v + f$$

Voici les vis choisis respectant cette condition ($C0 > 10956 \text{ W}$) et leur caractéristique :

Préselection vis	Calcul de fe		9860 (N)				
	1ère condition sur C0		10956 (W)				
Vis présélectionnées(reference)	Capacité de charge statique(N)	Diamètre(mm)	Pas (mm/tr)	masse(kg)	Inertie Jv(g.m2)	Longueur (m)	Rapport de transmission
Ecrou à visser ZEV-E-S	12900	20	5	0.25	0.00000063	0.05	0.00079577
Ecrou simple à bride avec capots d	12900	20	5	0.22	0.00000044	0.04	0.00079577
Ecrou simple à bride FEM-E-C	12300	16	10	0.21	0.00000026	0.038	0.00159155
Ecrou simple à bride FEM-E-C	12000	16	16	0.26	0.00000051	0.061	0.00254648
Ecrou simple réglable sans jeu SEI	12000	16	16	0.29	0.00000057	0.061	0.00254648
Ecrou simple réglable sans jeu SEI	12300	16	10	0.22	0.00000032	0.045	0.00159155
Ecrou simple cylindrique ZEM-E-S	12300	16	5	0.12	0.00000013	0.035	0.00079577
Ecrou simple cylindrique ZEM-E-S	12300	16	5	0.35	0.00000039	0.035	0.00079577
Ecrou simple cylindrique ZEM-E-S	12300	16	5	0.2	0.00000039	0.061	0.00079577
Ecrou simple à bride avec capots d	21800	32	20	0.69	0.00000574	0.065	0.00318310
Ecrou simple à bride avec capots d	26200	20	40	0.51	0.00000145	0.057	0.00636620
Ecrou simple à bride avec capots d	39400	25	25	0.51	0.00000207	0.052	0.00397887
Ecrou simple à bride avec capots d	57600	32	32	0.78	0.00000679	0.068	0.00509296

Présélection du moteur et de la vis

Afin de sélectionner l'association appropriée entre le moteur et la vis, nous devons respecter deux conditions. La première condition concerne la vérification du couple maximal, tandis que la deuxième condition concerne la vérification de la vitesse de rotation maximale. Notre moteur doit satisfaire ces deux conditions. Dans les tableaux qui suivent, les cellules en rouge montrent que la condition n'est pas remplie, les cellules en vert montrent que la condition est respectée et lorsque les valeurs sont écrites en gras, cela signifie que les deux conditions, couple et vitesse, sont respectées.

Pour la première condition, nous allons vérifier la formule suivante pour chaque moteur et chaque vis :

$$T_m > \left(\frac{J_v + J_m}{r} + m * r \right) * a$$

Ce qui va nous permettre de sélectionner les moteurs suivants :

Moteurs présélectionnés	Vérification couple					
	BPH 142 7N	BPH 190 2R	BPH 190 3N	BPH 190 4N	BPH 190 7K	BPH 190 AK
Tm(N.m)	142	36	54	69	120	145
	72.222	110.047	134.551	158.427	232.569	305.454
	72.220	110.044	134.549	158.425	232.566	305.451
	45.658	64.570	76.822	88.761	125.831	162.274
	40.951	52.771	60.429	67.890	91.060	113.836
	40.951	52.772	60.429	67.891	91.060	113.836
	45.658	64.571	76.823	88.761	125.832	162.274
	72.216	110.040	134.545	158.421	232.563	305.448
	72.219	110.044	134.548	158.424	232.566	305.451
	72.219	110.044	134.548	158.424	232.566	305.451
	41.945	51.401	57.527	63.496	82.031	100.253
	59.163	63.891	66.954	69.939	79.206	88.317
	45.006	52.571	57.472	62.247	77.075	91.652
	51.046	56.956	60.785	64.515	76.100	87.488

Pour la deuxième condition, nous allons vérifier que la vitesse maximale de notre association vis-moteur est supérieure à la vitesse du cahier des charges, via la formule suivante pour chaque moteur et chaque vis :

$$r * w > v$$

Ce qui va nous permettre de sélectionner les moteurs suivants :

	Vérification vitesse de rotation					
Moteurs préselectionnés	BPH 142 7N	BPH 190 2R	BPH 190 3N	BPH 190 4N	BPH 190 7K	BPH 190 AK
wm(rad/s)	314.16	445.06	314.16	314.16	209.43	209.43
	0.250	0.354	0.250	0.250	0.167	0.167
	0.250	0.354	0.250	0.250	0.167	0.167
	0.500	0.708	0.500	0.500	0.333	0.333
	0.800	1.133	0.800	0.800	0.533	0.533
	0.800	1.133	0.800	0.800	0.533	0.533
	0.500	0.708	0.500	0.500	0.333	0.333
	0.250	0.354	0.250	0.250	0.167	0.167
	0.250	0.354	0.250	0.250	0.167	0.167
	0.250	0.354	0.250	0.250	0.167	0.167
	1.000	1.417	1.000	1.000	0.667	0.667
	2.000	2.833	2.000	2.000	1.333	1.333
	1.250	1.771	1.250	1.250	0.833	0.833
	1.600	2.267	1.600	1.600	1.067	1.067

Finalement, seulement 11 associations de moteur et vis respectent ces 2 conditions.

Afin de mieux affiner la sélection, nous allons vérifier la condition sur la puissance pour ces associations. En effet, la puissance de notre moteur avec la vis doit être inférieure à la puissance maximale du moteur. En effet, on a:

$$P_{max} \geq \left(\frac{J_m + J_v}{r^2} + m \right) * v * a + F_{ext} * v$$

Voici les associations moteurs variateur qui répondent à cette condition :

			Vérification puissance			
			moteurs	BPH 142 7N	BPH 190 4N	BPH 190 7K
						BPH 190 AK
			inertie moteur	0.01	0.0121	0.018
				0.0238		
vis sélectionnées	inertie vis	rapport r	Puissance moteur	11000	14500	15700
FSZ-E-S-32-20R	0.0000057	0.0031831		15037	21808	
FEP-E-S-20-40R	0.0000015	0.0063662		11153		14302
FEP-E-S-25-25R	0.0000021	0.0039789		13171	17504	
FEP-E-S-32-32R	0.0000068	0.0050930		11883	14528	16802
						19038

Vérification avec dimensionnement thermique:

Comme vu dans le cours avec le profil trapézoïdal nous avons calculer t1(temps de montée), t2(temps ou la vitesse est constante) et t3 (temps de décélération) avec $t1 = \frac{v}{a}$, $t2 = \frac{d}{v} - t1$, $t3 = t1$:

Données et paramètres	
Tcycle	0.4
a	10
v	1
d	0.2
t1	0.1
t2	0.1
t3	0.1

Ainsi, nous allons calculer T1, T2 et T3 qui vont permettre de calculer le couple équivalent thermique Th pour les 3 associations de moteurs-vis restantes:

moteur choisi	BPH 190 7K	BPH 190 AK	
vis choisie	FEP-E-S-20-40R	FEP-E-S-32-32R	
T1	91.04504344	100.1556621	96.94775837
T2	11.84112777	11.84112777	9.472902213
T3	-67.36278791	-76.4734066	-78.00195394

$$\text{Avec } T1 = \left(\frac{Jm}{r} + m * r\right) * a + r * Fext$$

$$T2 = r * Fext$$

$$T3 = -\left(\frac{Jm}{r} + m * r\right) * a + r * Fext$$

Nous pouvons maintenant vérifier le dimensionnement thermique. En effet, on veut $Th < 0.9 * Tn$

Vérification avec dimensionnement thermique				
moteur choisi	BPH 190 7K	BPH 190 AK		
vis choisie	FEP-E-S-20-40R	FEP-E-S-32-32R		
T1	91.04504344	100.1556621	96.94775837	
T2	11.84112777	11.84112777	9.472902213	
T3	-67.36278791	-76.4734066	-78.00195394	
Vérification couple thermique				
Tn	75	100	100	
0.9 Tn	73.5	90	90	
Th	90.02484878	100.0610779	98.65631172	

Références	
Moteurs Num	
BPH 190 7K	
BPH1907KxxFxx0x	
BPH 190 AK	
BPH190AKxxFxx0x	
Vis Bosch Rexroth	
FEP-E-S-20-40R	
R2522 100 11	
FEP-E-S-32-32R	
R2522 300 01	

Seule l'association du moteur BPH 190 AK avec la vis FEP-E-S-32-32R répond aux critères de dimensionnement thermique mais avec un peu de marge. En effet, T_h est inférieur juste inférieur à T_n . Vu que c'est le moteur le plus adéquat de notre catalogue, nous choisissons cette association moteur-vis au lieu de prendre un moteur juste au-dessus sur un autre catalogue.

Vérifions à présent le choix de cet ensemble en simulation.

Simulation

Pour effectuer les simulations, nous complétons les paramètres du fichier Matlab par les valeurs du moteur BPH 190 AK et de la vis FEP-E-S-32-32R. Nous enlevons ensuite l'impact de la force extérieure pour pouvoir régler les gains et le correcteur.

Pour déterminer les gains, nous écrivons la formule de la boucle ouverte puis la boucle fermée en prenant en compte ffv et ffa qui correspondent au correcteur et qui auront une valeur nulle dans un premier temps. Nous obtenons :

$$FBO(p) = \frac{1}{p(m*p+c)}$$

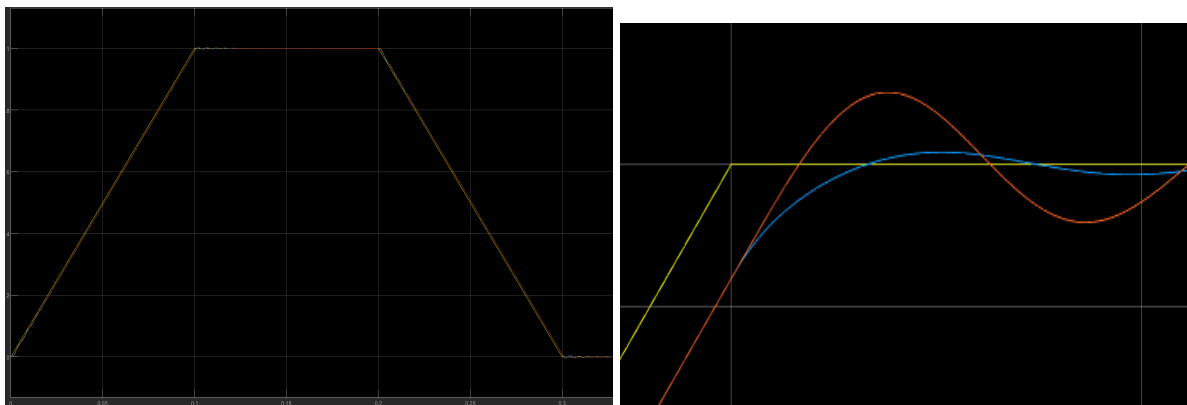
$$FBF(p) = \frac{ffa*p^2 + ffv*p + gp}{m*p^2 + (c+gd)p + gp}$$

Nous identifions la boucle fermée avec l'expression $FBF(p) = \frac{K}{\frac{1}{wn^2}p^2 + \frac{2\xi}{wn}p + 1}$

Nous avons donc les gains suivant :

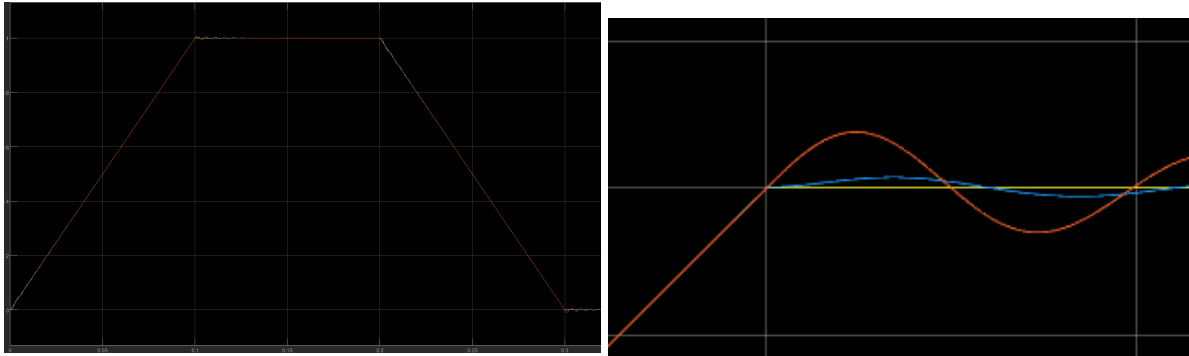
$$gp = m * wn^2 \quad \text{et} \quad gd = 2m * \xi * wn - c$$

Le coefficient d'amortissement ξ et la pulsation propre wn sont choisis arbitrairement pour modifier la performance de la réponse. Nous prenons les valeurs suivantes: $\xi = 1$ et $wn = 800\pi \text{ rad/s}$. On peut ensuite lancer la simulation et voir comment la vitesse évolue comparée à la consigne trapézoïdale de vitesse en prenant en compte la saturation du moteur.

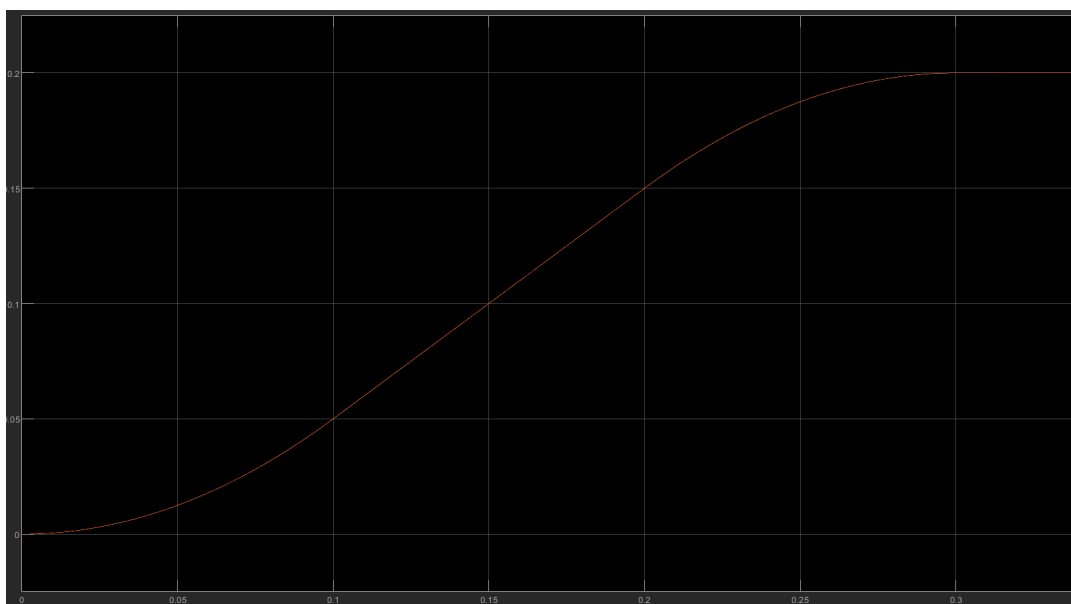


La consigne se trouve en jaune tandis que la vitesse de la charge se trouve en rouge. On remarque que la réponse est stable, rapide mais qu'une certaine erreur reste présente. C'est pourquoi nous ajoutons un correcteur en donnant des valeurs à ffa et ffv . Nous utilisons

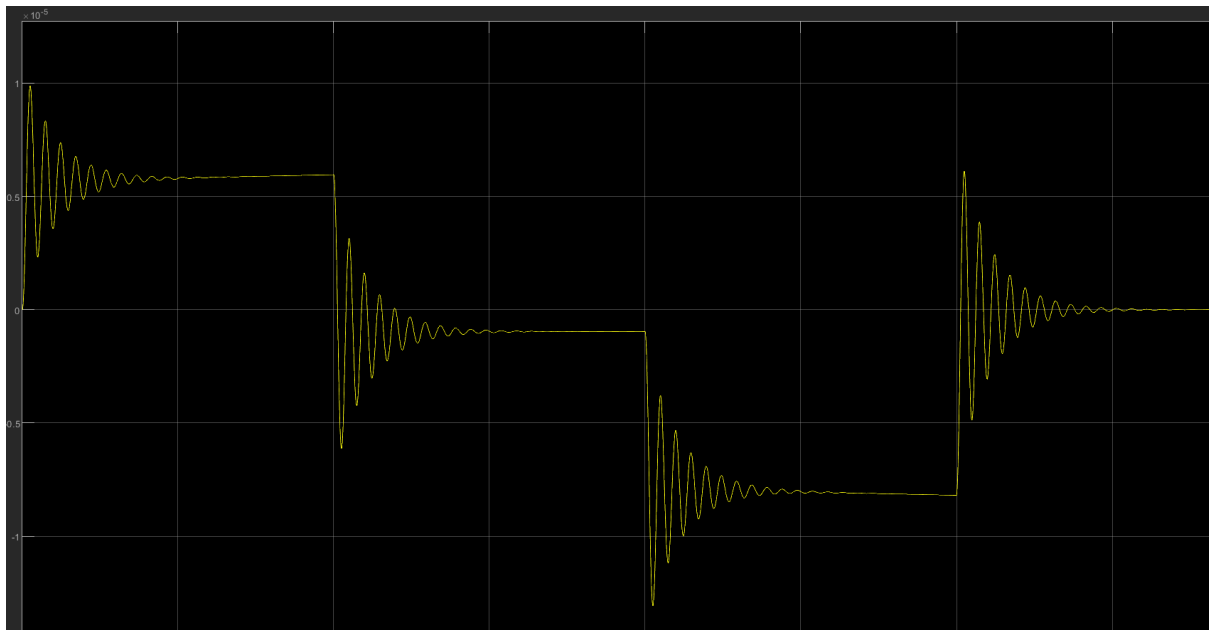
les valeurs suivantes afin d'obtenir un correcteur PD : $ff_a = a$ et $ff_v = gd$. La simulation avec l'ajout de ce correcteur et de la force extérieure nous donne les résultats suivants :



Il n'y a plus d'erreur permanente entre la consigne et la réponse. Il y a quelques ondulations d'amplitude inférieure à 1% de la consigne, elles sont donc négligeables. Cela signifie que l'association de notre moteur et de notre vis répond bien au cahier des charges concernant la vitesse. Regardons à présent ce qu'il se passe sur la position de la charge :

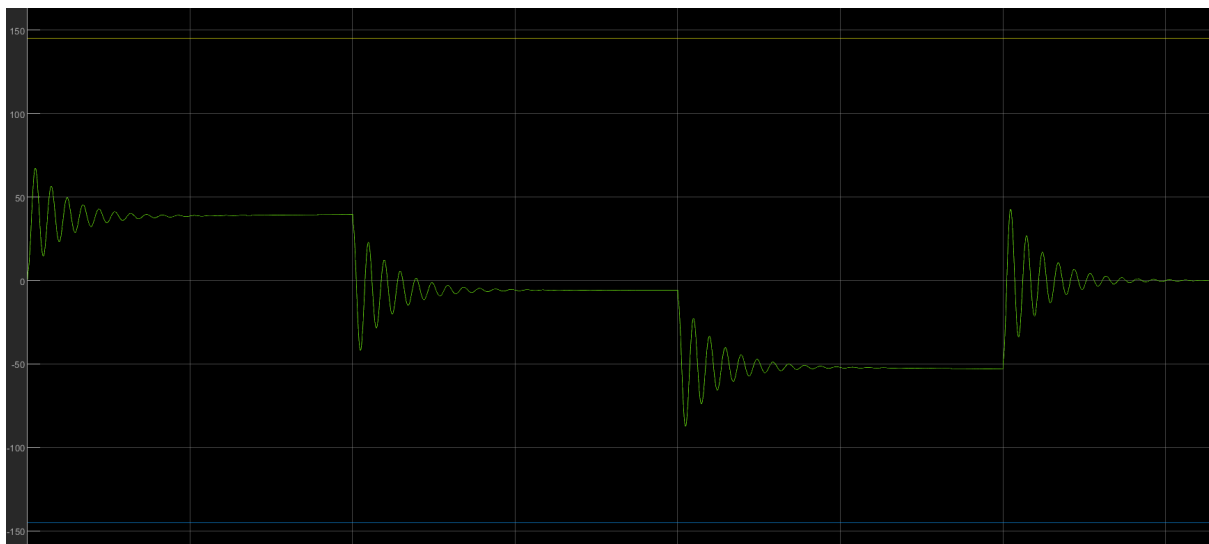


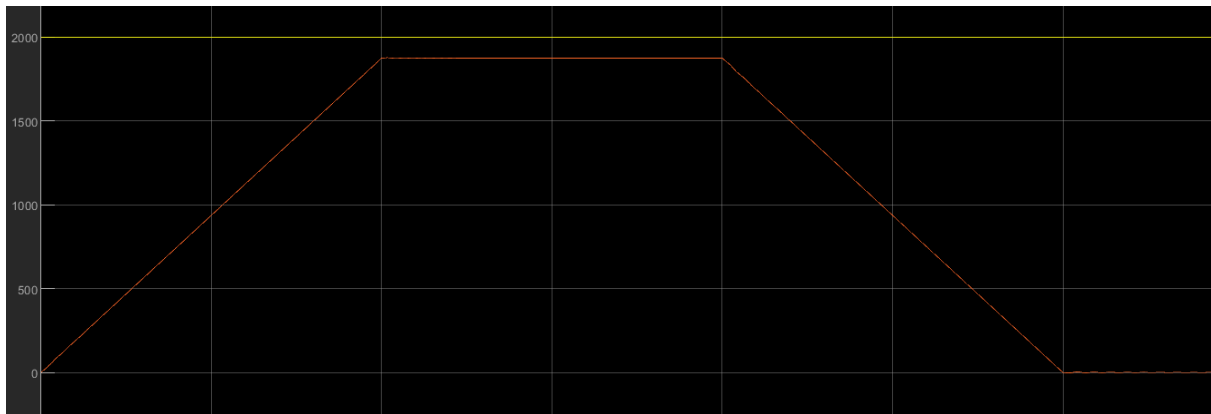
Nous n'arrivons pas à distinguer de différence entre la position demandée et la position atteinte. On trace alors l'écart de la position pour pouvoir l'interpréter :



Lors de l'ondulation de la réponse en vitesse, il y a des erreurs de position de la charge. En effet, on remarque que l'erreur maximale atteinte lors de la phase de transition est de $13\mu\text{m}$, ce qui est négligeable. Une fois le temps de transition passé et les ondulations terminées, il n'y a aucun écart et la position de 20cm est bien atteinte avec précision.

Nous savons que le cahier des charges est bien rempli mais nous voulons regarder en détail comment réagit le moteur lors du déplacement de la charge afin de comparer avec ses caractéristiques maximums. Voici l'évolution du couple moteur puis du nombre de tour par minute :





Le moteur ne va donc pas avoir de problème et de risque car les performances demandées sont dans ses capacités. La mission est donc un succès.