

Ian Billanou
87 rue Marengo
13006 Marseille.

Etudiant à : Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille,
Département mécanique énergétique. Option SIIC.
Technopôle de Château Gombert
5 rue Enrico Fermi
13453 Marseille cedex 3

En stage à : Laboratoire UMR Mouvement et Perception, CNRS.
Faculté des sciences du sport
163 avenue de Luminy
13288 Marseille Cedex 9

Sujet du stage :

Le thème du stage serait "mise au point d'une motorisation "intelligente" sur un bras articulé".

Il s'agit de concevoir un système de commande du moteur qui permette d'annuler en tous points du déplacement l'effet de la gravité.

Etude mécanique du bras nu. (Sans le sujet.)

Approche:

Dans un premier temps, il est nécessaire de modéliser le bras afin de déterminer son centre de gravité et d'en évaluer sa masse.

L'étape suivante sera de faire une étude pour connaître le déplacement de ce centre de gravité en fonction de l'angle du bras ainsi que le couple nécessaire pour venir annuler l'effet de la pesanteur.

Des études connexes au sujet de stage seront nécessaires pour parvenir aux résultats comme la recherche du capteur approprié pour la mesure de l'angle du coude. Et une étude de l'adaptation en vu du montage sur le système.

Moyen :

Utilisation de CATIA, pour la modélisation tridimensionnelle et l'étude mécanique.

Utilisation des notions de statique pour déterminer le couple en fonction des différents paramètres.

Recherche dans les catalogues de fournisseurs, contacts téléphoniques...

Modélisation du bras du sujet.

Approche:

Il convient de pouvoir utiliser le système avec différents sujets, pour cela il est nécessaire de modéliser le bras de ce dernier, en fonction de paramètres. Ces paramètres permettront de venir faire un réglage préalable à toute expérience.

Moyen :

Collecte d'information auprès des biomécaniciens du laboratoire LABM.

Etude mécanique du bras comprenant le bras du sujet.

On reprend le mode opératoire de la première étude, en y ajoutant la modélisation du bras du sujet.

Régulation de la commande du moteur.

Une fois les paramètres mécaniques bien définis, il convient de réaliser la régulation, qui permettra l'annulation de la gravité en tout point. Pour cela une régulation sur le couple moteur sera faite. Mais cela demande la connaissance de la fonction de transfert du moteur, qui reste à déterminer. (Recherche de documentations constructeur, ou identification)

Une modélisation sous CATIA du bras a été faite dans le but de posséder une représentation informatique du système, et de déterminer de façon précise le centre de gravité de l'ensemble. Le laboratoire ne possédant aucun document technique relatif à la chaise, chaque pièce a été mesurée, dessinée puis caractérisée (nature du matériau) pour former l'ensemble à étudier. Trois semaines ont été nécessaires pour réaliser la modélisation complète du bras et son étude. [Annexe 1.](#)

En parallèle, il a fallu déterminer le choix du codeur optique à placer en sortie du moteur, trouver un fournisseur et proposer un système permettant son montage. Pour des raisons de délais il a fallu

refaire le travail puisque une autre commande a été faite pour un modèle de codeur différent.
Annexe 2

Il s'agissait donc maintenant de réaliser la partie commande du moteur.

« Le dispositif est basé sur un système d'acquisition et de traitement temps réel nommé ADWinPro (commercialisé par la société Keithley – <http://www.adwin.de>). Ce système est capable d'acquérir, de traiter et de générer des signaux analogiques (en mode single-ended ou différentiel) ou numériques (TTL et série). Couplé au logiciel DOCoMETRe développé, au sein du laboratoire par Frank Buloup, il est possible de mettre en œuvre les protocoles expérimentaux relatifs aux problématiques de recherche du laboratoire. »
C'est cet appareil qui devra calculer le couple à fournir en fonction des angles.



Le programme régissant l'expérience a donc été entré afin de voir dans un premier temps si l'ensemble du système se comportait bien.

Il se trouve que de nombreuses perturbations sont venues déranger le bon fonctionnement. Allant jusqu'à perturber l'alimentation des codeurs et a provoquer un court circuit dans le codeur que nous avions commandé.

Cette mésaventure nous a conduit à revoir l'ensemble du câblage composé dans sa majeure partie par de simple file à embout de type « banane ». C'est donc avec des câbles blindés que nous avons remonté le dispositif.

Puis devant les délais nécessaires à l'arrivée d'un autre codeur, nous en avons fabriqué un en utilisant deux optocoupleurs de types HOA2001 de chez Honeywell.



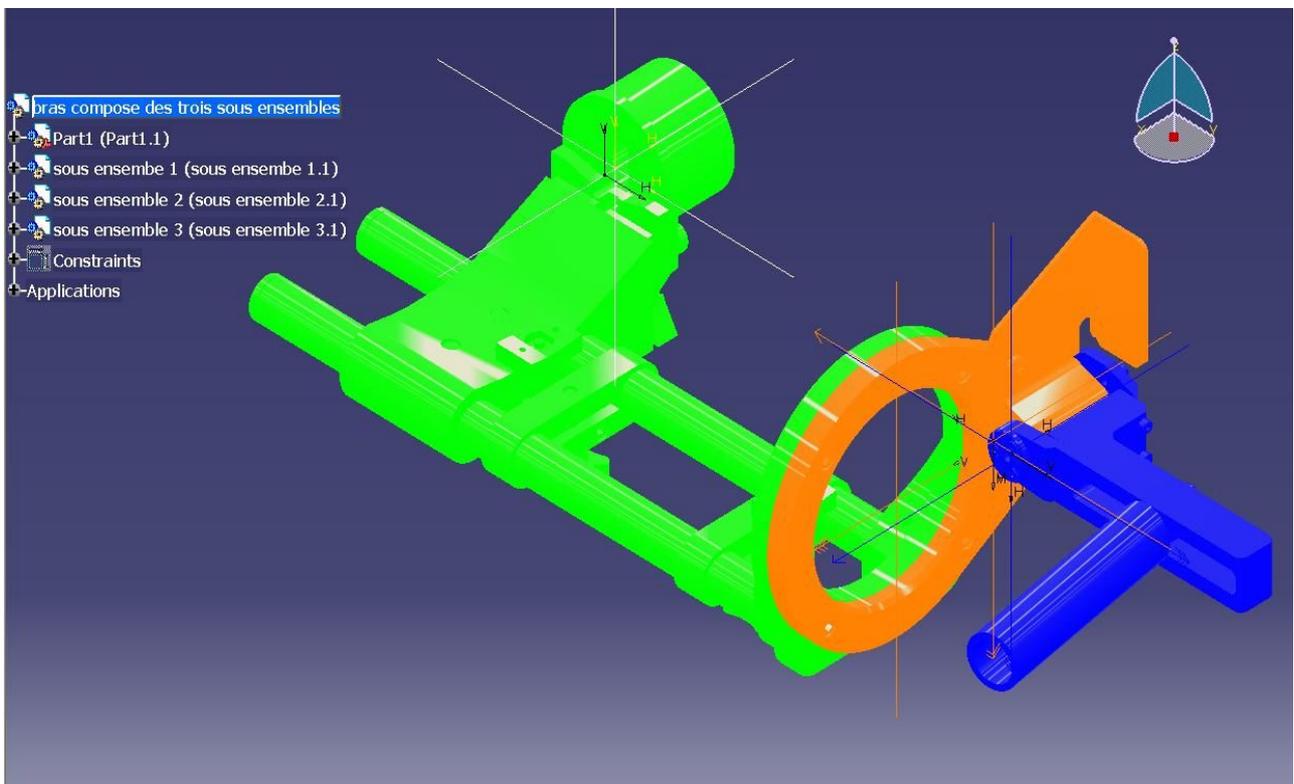
Ce montage « artisanal » c'est révélé assez performant. Et les perturbations ont nettement diminuées. Cependant elles n'ont pas disparues et ont continuées à empêcher une commande optimale du système. Ainsi, vaincre la pesanteur lors de la montée du bras c'est révélé réalisable cependant étant donné la situation, la descente du bras rencontrait un couple résistant. La détection du sens de rotation du bras étant grevée par des pics de perturbation entraînant une variation permanentes de se sens. C'est en tout cas ce que nous avons découvert lorsque pour déterminer l'origine du problème nous avons mis le bras dans un plan horizontal afin de s'affranchir de la pesanteur.



Devant ce constat nous avons tenté d'améliorer la qualité des signaux et de réduire encore les bruits. Pour cela, un nouveau circuit a été réalisé pour le codeur « maison », plus petit et équipé de condensateur pour le rendre moins sensible aux perturbations. Cependant cela n'a pas fait évoluer la situation. Mais nous sommes certain que la cause des perturbations est le variateur, cependant une mauvaise qualité de la terre est envisageable. Quoi qu'il en soit, malgré un nombre important de précautions (utilisation d'alimentations stabilisées avec limitation de courant) d'autres dégradations du matériel électronique sont survenues et cela sans que l'on puisse véritablement en identifier la cause.

En conclusion, l'objectif d'une motorisation intelligente du bras articulé n'est pas remplie mais l'ensemble des bases sont posées et l'annulation des perturbations électromagnétiques semble être la dernière étape de cette mise au point. Il restera à vérifier que le comportement du moteur est conforme à nos attentes ainsi que la véracité du model. Pour plus d'efficacité et de précision il conviendrait aussi de prévoir dans la commande du moteur, une composante pour venir contrer l'inertie du motoréducteur. Mais cela implique d'utiliser une entrée donnant la vitesse. Et nous avons observé que les entrées analogiques sont bien plus perturbées que les autres signaux.

Annexe 1



Modélisation sous CATIA du bras

Bras

Sous ensemble 1			
Sous ensemble 1	Cache articulation	1	
	Vis M8*16 B18.3.1.M	2	
	Vis M8*25 B18.3.5.M	1	
	Support tube	1	
	Tube	2	
	Bouchon	2	
	Bloc tube	1	
	Sous ensemble support sangle	2	
	Support fixation		1
	Vis ISO 4762 M5*16		2
	Support fixation 2		1
	Fixation sangle		1
	Vis pour fixation sangle		1
	Rondelle B18.22 3mm		1
	Vis B18.7M M3*8		1
	Goupille	2	
	Poignet	1	
	Sous ensemble vis main M6	2	
	vis à main M6		1
	tige filettée M6		1
	Ecrou ISO 4032 M6	2	
	Sous ensemble vis main M8 long	1	
	vis à main M8		1
tige filettée M8 longue		1	
Ecrou ISO 4032 M8		2	
Sous ensemble vis main M8 court	1		
vis à main M8		1	
tige filettée M8 courte		1	
Sous ensemble 2			
Sous ensemble 2	Poignet extéteur	1	
	Haricot	4	
	Vis B18.3.1.M M5*12	4	
	Support 1 codeur	1	
	Vis ISO 7045 M5*6	1	
	Support 2 codeur	1	
	Codeur du poignet	1	
	Vis ISO 2009 M4*8	3	
	Rondelle ISO 7093 4*12	3	
	Ecrou ISO 4032 M6	2	
	Vis ISO 1207 M6*10	1	
	Vis ISO 7045 M6*10	1	
	Sous ensemble 3		
	Sous ensemble 3	Pivot poignet	1
Axe poignet		1	
Axe poignet 2		1	
Support axe main		1	
Axe main		1	
Vis ISO 4762 M6*6		2	
Vis B18.3.5M 3*6		3	
Vis B18.3.1M 3*16		3	
Cône fixation axe main		1	
Vis ISO 4762 M6*20		1	



Liaison moteur codeur



sous assemblage



articulation.CATPart



axe main.CATPart



axe poignet 2.CATPart



axe poignet.CATPart



B18.2.3.4M - Hex flange screw, M5 x 0.8 x 8 ---



B18.3.1M - 3 x 0.5 x 16 Hex SHCS -- 16NHX....



B18.3.1M - 5 x 0.8 x 12 Hex SHCS -- 12NHX....



B18.3.1M - 8 x 1.25 x 16 Hex SHCS -- 16NHX.S...



B18.3.5M - 3 x 0.5 x 6 Socket FCH5 -- 6N....



B18.3.5M - 8 x 1.25 x 25 Socket FCH5 -- 25N.S...



B18.6.7M - M3 x 0.5 x 8 Indented HFMS --8N....



B18.22M - Plain washer, 3mm, narrow.CATPart



bloc tube.CATPart



bouchon.CATPart



cache.CATPart



codeur poignet.CATPart



cone fixation axe main.CATPart



fixation sangle.CATPart



goupille.CATPart



haricot.CATPart



Hexagon Nut ISO - 4032 - M6 - D - N.CATPart



ISO 4762 M3 x 6 --- 6N.CATPart



ISO 4762 M5 x 16 --- 16N.CATPart



ISO 7045 - M5 x 6 - Z --- 6N.CATPart



ISO 7045 - M6 x 10 - Z --- 10N.CATPart



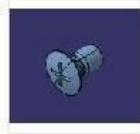
ISO_1207_M6x10_ST... A_SLOTTED_CHEESE_...



ISO_2009_M4x8_STE...



ISO_4032_M6_STEEL...



ISO_7047_M6x10-H_S...



ISO_7093_4x12_STE...



pivot poignet.CATPart



poignet.CATPart



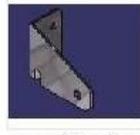
Poignetexterieur.CAT...



suport fixation2.CATPart



support2 codeur poignet.CATPart



support 1 codeur .CATPart



support axe main.CATPart



support tube.CATPart



supportfixations.CAT...



tige M6.CATPart



tige M8 longue.CATPart



tige M8.CATPart



tube.CATPart



vis main M6.CATPart



vis main.CATPart



vis pour fixation sangle.CATPart



sous ensemble vis main M8 long.CATProduct



bras compose des trois sous ensembles.CAT...



sous ensemble 1.CATProduct



sous ensemble 2.CATProduct



sous ensemble 3.CATProduct



sous ensemble support sangle.CATProduct



sous ensemble vis main M6.CATProduct



sous ensemble vis main M8 court.CATProduct

Annexe 2

Les feuilles de calcul ci-dessous permettent de définir les équations donnant le couple moteur en fonction des différents paramètres.

Le principe est le suivant :

Le model du bras est décomposé en trois classes d'équivalence (les trois couleurs correspondent aux trois classes). Cela signifie que dans chaque classe d'équivalence, les composants sont tous fixes les uns par rapport au autres.

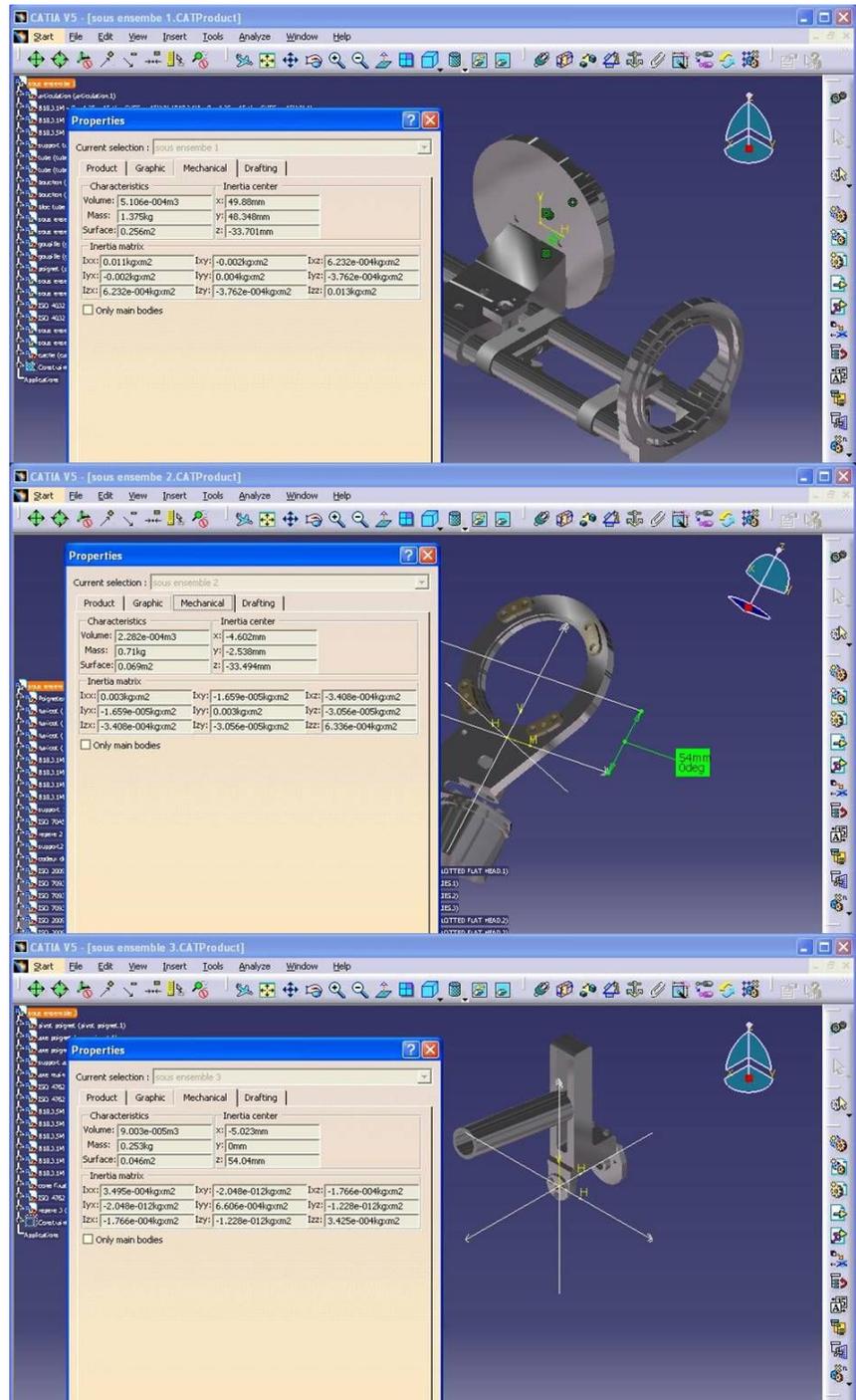
A chaque classe, un repère est associé. Il y a donc trois repères : R1, R2, R3.

Il est aisé de trouver les paramètres et la relation qui régit le mouvement d'une classe par rapport à une autre.

Pour chacune des classes, le logiciel CATIA a permis de donner la masse, et le centre de masse exprimée dans le repère associé. (Pour obtenir cette fenêtre il suffit d'ouvrir le fichier, de cliquer avec le bouton droit de la souris sur le premier élément de l'arborescence. Et de choisir « Propriétés »). Les informations recherchées se trouvent sous l'onglet « Mechanical ».

C'est en effectuant une série de changement de repères puis un barycentre que le centre de masse du bras complet sera déterminé.

De plus en utilisant une méthode adéquate, l'équation donnant sa position sera fonction des différents paramètres qui nous intéressent. Ici les angles et les dimensions. Une fois le centre de masse trouvé, il suffit de calculer le couple qui nous intéresse.



Voir feuille 4 pour simulation.

Feuille de calcul.

Couple exercé sur l'arbre moteur.

Données:

Sous ensemble 1			
Masse:	m1	1.375	kg
G1 =	Gx1	: 49.9	mm
	Gy1	: 48.3	mm
{R1}	Gz1	: -34	mm

Sous ensemble 2			
Masse:	m2	0.71	kg
G2 =	Gx2	: -4.6	mm
	Gy2	: -2.5	mm
{R2}	Gz2	: -33	mm

Sous ensemble 3			
Masse:	m3	0.253	kg
G3 =	Gx3	: -5	mm
	Gy3	: 0	mm
{R3}	Gz3	: 54	mm

On se place dans le repère 1. Le repère 2 est en rotation autour d'un axe parallèle à l'axe x2 et passant par le point I2:(0,0,54). Le repère 3 est en rotation autour de l'axe x3.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{O_1O_2} &= 25 \overrightarrow{x_1} + 237 \overrightarrow{y_1} + 6 \overrightarrow{z_1} \\ \overrightarrow{O_1I} &= (25 + 54) \overrightarrow{x_1} + 237 \overrightarrow{y_1} + 6 \overrightarrow{z_1} = 79 \overrightarrow{x_1} + 237 \overrightarrow{y_1} + 6 \overrightarrow{z_1} \\ \overrightarrow{O_1O_3} &= \overrightarrow{O_1I} + \overrightarrow{IO_3} = (79 - 53) \overrightarrow{x_1} + (237 + 11) \overrightarrow{y_1} + 6 \overrightarrow{z_1} = 26 \overrightarrow{x_1} + 248 \overrightarrow{y_1} + 6 \overrightarrow{z_1} \\ \overrightarrow{IO_3} &= -53 \overrightarrow{z_2} - 11 \overrightarrow{x_2} \end{aligned}$$

Relations entre les repères.

$$\begin{aligned} r \cdot \overrightarrow{x_2} &= -r \cdot \overrightarrow{y_1} \\ r \cdot \overrightarrow{y_2} &= -r \cdot \cos(\varphi) \cdot \overrightarrow{z_1} - r \cdot \sin(\varphi) \cdot \overrightarrow{x_1} \\ r \cdot \overrightarrow{z_2} &= r \cdot \cos(\varphi) \cdot \overrightarrow{x_1} - r \cdot \sin(\varphi) \cdot \overrightarrow{z_1} \\ \\ r \cdot \overrightarrow{x_3} &= r \cdot \overrightarrow{z_2} \\ r \cdot \overrightarrow{y_3} &= r \cdot \cos(\psi) \cdot \overrightarrow{y_2} - r \cdot \sin(\psi) \cdot \overrightarrow{x_2} \\ r \cdot \overrightarrow{z_3} &= -r \cdot \cos(\psi) \cdot \overrightarrow{x_2} - r \cdot \sin(\psi) \cdot \overrightarrow{y_2} \end{aligned}$$

Voir feuille 4 pour simulation.

Feuille de calcul.

Couple exercé sur l'arbre moteur.

Calcul des coordonnées du point G2 dans {R1}.

$$\overrightarrow{O_1 G_2} = \overrightarrow{O_1 I} + \overrightarrow{IO_2} + \overrightarrow{O_2 G_2}$$

$$\overrightarrow{O_1 G_2} = 79 \cdot \overrightarrow{x_1} + 237 \cdot \overrightarrow{y_1} + 6 \cdot \overrightarrow{z_1} - 54 \cdot \overrightarrow{z_2} + G_{x2} \cdot \overrightarrow{x_2} + G_{y2} \cdot \overrightarrow{y_2} + G_{z2} \cdot \overrightarrow{z_2}$$

$$\overrightarrow{O_1 G_2}_{\{R1\}} = \begin{cases} 79 - 54 \cdot \cos(\varphi) - G_{y2} \cdot \sin(\varphi) + G_{z2} \cdot \cos(\varphi) \\ 237 - G_{x2} \\ (6 + 54 \cdot \sin(\varphi) - G_{y2} \cdot \cos(\varphi) - G_{z2} \cdot \sin(\varphi)) \end{cases}$$

Calcul des coordonnées du point G3 dans {R1}.

$$\overrightarrow{O_1 G_3} = \overrightarrow{O_1 I} + \overrightarrow{IO_3} + \overrightarrow{O_3 G_3}$$

$$\overrightarrow{O_1 G_3} = 79 \cdot \overrightarrow{x_1} + 237 \cdot \overrightarrow{y_1} + 6 \cdot \overrightarrow{z_1} - 53 \cdot \overrightarrow{z_2} - 11 \cdot \overrightarrow{x_2} + \overrightarrow{O_3 G_3}$$

$$\overrightarrow{IO_3} + \overrightarrow{O_3 G_3} = -53 \cdot \overrightarrow{z_2} - 11 \cdot \overrightarrow{x_2} + G_{x3} \cdot \overrightarrow{x_3} + G_{y3} \cdot \overrightarrow{y_3} + G_{z3} \cdot \overrightarrow{z_3}$$

$$= -53 \cdot \overrightarrow{z_2} - 11 \cdot \overrightarrow{x_2} + G_{x3} \cdot \overrightarrow{z_2} + G_{y3} \cdot \cos(\psi) \cdot \overrightarrow{y_2} - G_{y3} \cdot \sin(\psi) \cdot \overrightarrow{x_2} - G_{z3} \cdot \cos(\psi) \cdot \overrightarrow{x_2} - G_{z3} \cdot \sin(\psi) \cdot \overrightarrow{y_2}$$

$$\overrightarrow{IO_3} + \overrightarrow{O_3 G_3}_{\{R2\}} = \begin{cases} -11 - G_{y3} \cdot \sin(\psi) - G_{z3} \cdot \cos(\psi) \\ G_{y3} \cdot \cos(\psi) - G_{z3} \cdot \sin(\psi) \\ -53 + G_{x3} \end{cases}$$

$$\overrightarrow{IO_3} + \overrightarrow{O_3 G_3}_{\{R1\}} = \begin{cases} (G_{z3} \cdot \sin(\psi) - G_{y3} \cdot \cos(\psi)) \cdot \sin(\varphi) + (G_{x3} - 53) \cdot \cos(\varphi) \\ 11 + G_{y3} \cdot \sin(\psi) + G_{z3} \cdot \cos(\psi) \\ (-G_{y3} \cdot \cos(\psi) + G_{z3} \cdot \sin(\psi)) \cdot \cos(\varphi) + (53 - G_{x3}) \cdot \sin(\varphi) \end{cases}$$

$$\overrightarrow{O_1 G_3}_{\{R1\}} = \begin{cases} (G_{z3} \cdot \sin(\psi) - G_{y3} \cdot \cos(\psi)) \cdot \sin(\varphi) + (G_{x3} - 53) \cdot \cos(\varphi) + 79 \\ 11 + G_{y3} \cdot \sin(\psi) + G_{z3} \cdot \cos(\psi) + 237 \\ (-G_{y3} \cdot \cos(\psi) + G_{z3} \cdot \sin(\psi)) \cdot \cos(\varphi) + (53 - G_{x3}) \cdot \sin(\varphi) + 6 \end{cases}$$

Voir feuille 4 pour simulation.

Feuille de calcul.

Couple exercé sur l'arbre moteur.

Calcul du centre de gravité dans $\{R1\}$.

$$m_1 \cdot \overrightarrow{GG_1} + m_2 \cdot \overrightarrow{GG_2} + m_3 \cdot \overrightarrow{GG_3} = \vec{0} = (m_1 + m_2 + m_3) \cdot \overrightarrow{GO} + m_1 \cdot \overrightarrow{OG_1} + m_2 \cdot \overrightarrow{OG_2} + m_3 \cdot \overrightarrow{OG_3}$$

Donc

$$\overrightarrow{OG} = \frac{m_1 \cdot \overrightarrow{OG_1} + m_2 \cdot \overrightarrow{OG_2} + m_3 \cdot \overrightarrow{OG_3}}{m_1 + m_2 + m_3}$$

$$\overrightarrow{OG} = \frac{1}{m_1 + m_2 + m_3} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

$$a = \begin{pmatrix} m_1 \cdot G_{x1} \\ + m_2 \cdot (79 - 54 \cdot \cos(\varphi) - G_{y2} \cdot \sin(\varphi) + G_{x2} \cdot \cos(\varphi)) \\ + m_3 \cdot ((G_{x3} \cdot \sin(\psi) - G_{y3} \cdot \cos(\psi)) \cdot \sin(\varphi) + (G_{x3} - 53) \cdot \cos(\varphi) + 79) \end{pmatrix}$$

$$b = \begin{pmatrix} m_1 \cdot G_{y1} \\ + m_2 \cdot (273 - G_{x2}) \\ + m_3 \cdot (11 + G_{y3} \cdot \sin(\psi) + G_{x3} \cdot \cos(\psi) + 237) \end{pmatrix}$$

$$c = \begin{pmatrix} m_1 \cdot G_{z1} \\ + m_2 \cdot ((6 + 54 \cdot \sin(\varphi) - G_{y2} \cdot \cos(\varphi) - G_{x2} \cdot \sin(\varphi)) \\ + m_3 \cdot ((-G_{y3} \cdot \cos(\psi) + G_{x3} \cdot \sin(\psi)) \cdot \cos(\varphi) + (53 - G_{x3}) \cdot \sin(\varphi) + 6) \end{pmatrix}$$

On obtient donc le couple moteur :

$$C_m = g \cdot (m_1 + m_2 + m_3) \cdot (\overrightarrow{OG} \cdot \vec{y}_1) \cdot 10^{-3}$$

$$\overrightarrow{O_1 G_3 (R1)} = \begin{pmatrix} (G_{x3} \cdot \sin(\psi) - G_{y3} \cdot \cos(\psi)) \cdot \sin(\varphi) + (G_{x3} - 53) \cdot \cos(\varphi) + 79 \\ 11 + G_{y3} \cdot \sin(\psi) + G_{x3} \cdot \cos(\psi) + 237 \\ (-G_{y3} \cdot \cos(\psi) + G_{x3} \cdot \sin(\psi)) \cdot \cos(\varphi) + (53 - G_{x3}) \cdot \sin(\varphi) + 6 \end{pmatrix}$$

Feuille de calcul.

Couple exercé sur l'arbre moteur.

Angle:	{R3}	ψ	5	0.09
	{R2}	φ	0	0
	{R1}	θ	0	0
			(°)	(r)

Sous ensemble 1			
Masse:	m1	1.375	kg
G1 =	Gx1 :	49.9	mm
	Gy1 :	48.3	mm
	{R1} Gz1 :	-34	mm

Sous ensemble 2			
Masse:	m2	0.71	kg
G2 =	Gx2 :	-4.6	mm
	Gy2 :	-2.5	mm
	{R2} Gz2 :	-33	mm

Couple moteur : 3.084 Nm

Sous ensemble 3			
Masse:	m3	0.253	kg
G3 =	Gx3 :	-5	mm
	Gy3 :	0	mm
	{R3} Gz3 :	54	mm

Centres de masse:

<table border="1"> <tr> <td>G1</td> <td>49.88</td> </tr> <tr> <td></td> <td>48.348</td> </tr> <tr> <td>{R1}</td> <td>-33.701</td> </tr> </table>	G1	49.88		48.348	{R1}	-33.701	<table border="1"> <tr> <td>G2</td> <td>-8.494</td> </tr> <tr> <td></td> <td>241.602</td> </tr> <tr> <td>{R1}</td> <td>8.538</td> </tr> </table>	G2	-8.494		241.602	{R1}	8.538	<table border="1"> <tr> <td>G3</td> <td>20.977</td> </tr> <tr> <td></td> <td>301.8344</td> </tr> <tr> <td>{R1}</td> <td>10.7099</td> </tr> </table>	G3	20.977		301.8344	{R1}	10.7099
G1	49.88																			
	48.348																			
{R1}	-33.701																			
G2	-8.494																			
	241.602																			
{R1}	8.538																			
G3	20.977																			
	301.8344																			
{R1}	10.7099																			

Centre de gravité:

<table border="1"> <tr> <td>G</td> <td>29.02542</td> </tr> <tr> <td></td> <td>134.4654</td> </tr> <tr> <td>{R1}</td> <td>-16.06813</td> </tr> </table>	G	29.02542		134.4654	{R1}	-16.06813
G	29.02542					
	134.4654					
{R1}	-16.06813					

<table border="1"> <tr> <td>G</td> <td>29.02542</td> </tr> <tr> <td></td> <td>134.4654</td> </tr> <tr> <td>{Rm}</td> <td>-16.06813</td> </tr> </table>	G	29.02542		134.4654	{Rm}	-16.06813
G	29.02542					
	134.4654					
{Rm}	-16.06813					

Couple moteur : 3.084 Nm