

Le Moby-CREA se caractérise par deux chaînes d'énergie indépendantes qui sont synchronisées par le système de commande et dont les vitesses sont régulées. Pour le déplacement vertical, deux ressorts de traction ont été ajoutés pour compenser le poids du bébé.

Les modèles proposés sont disponibles en différentes configurations sous Open-Modelica, Scilab-Xcos et Matlab-Simulink. Le modèle Modelica reste le modèle de référence le plus abouti.

1 - Généralités

La première partie de chaque chaîne d'énergie est assez simple, avec un moteur à courant continu et une transmission par poulies-courroie et engrenages. Cette partie se modélise ainsi sans difficulté.

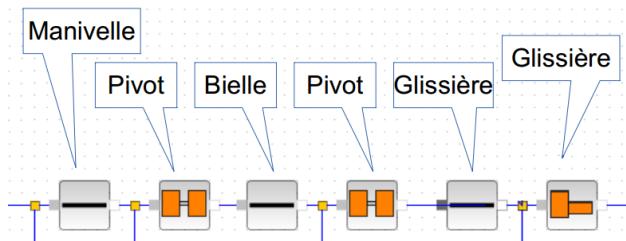
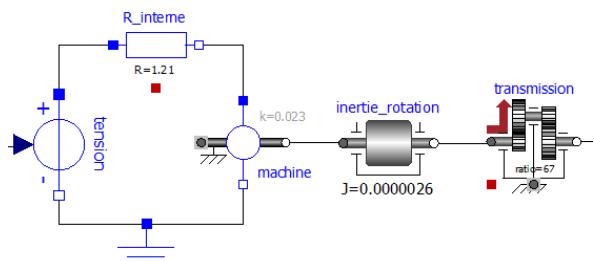
Le système bielle manivelle est plus complexe, l'objet n'étant pas disponible dans les bibliothèques, ce système peut être modélisé avec des éléments de mécanique plane comme proposé sous ici avec Scilab-Xcos ou Matlab. Il peut aussi être intéressant de rechercher les équations de fonctionnement pour les intégrer dans un nouvel objet comme proposé sous OpenModelica.

L'effort du ressort de compensation peut être assimilé à une constante si on accepte cette simplification. Un calcul proposé permet également de déterminer l'équation à intégrer au modèle.

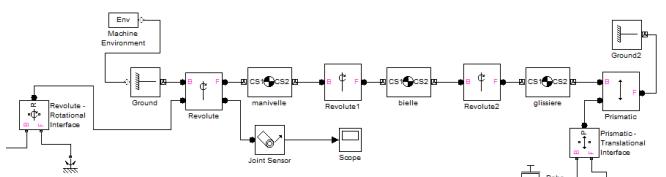
Le bébé se caractérise par sa masse dans le sens horizontal ce qui engendre une inertie. Dans le sens vertical, il faut également tenir compte de son poids.

Pour terminer le modèle, il faut mettre en place une boucle de régulation de vitesse sur un axe et synchroniser les deux mouvements.

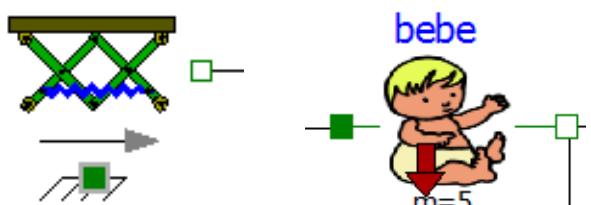
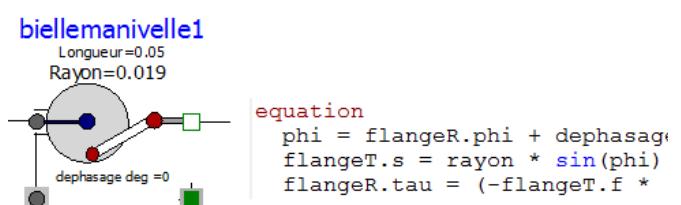
Notez que seule la modélisation Modelica garanti ici des résultats similaires au système réel en particulier en ce qui concerne les courants dans le moteur vertical pour le TP Modélisation. Les autres modèles Scilab et Matlab sont cependant opérationnels et vous pourrez les exploiter pour vos propres études.



Modèle Scilab-Xcos

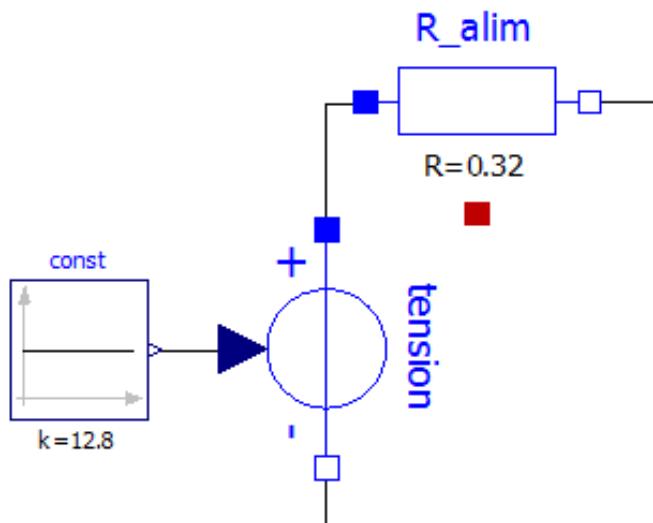


Modèle Matlab Simulink



Objets Modelica

2 - Modélisation du générateur (alimentation)



Pour modéliser le générateur (alimentation), il nous faut la tension à vide et la résistance interne.

La tension mesurée à vide est de 12,8V.

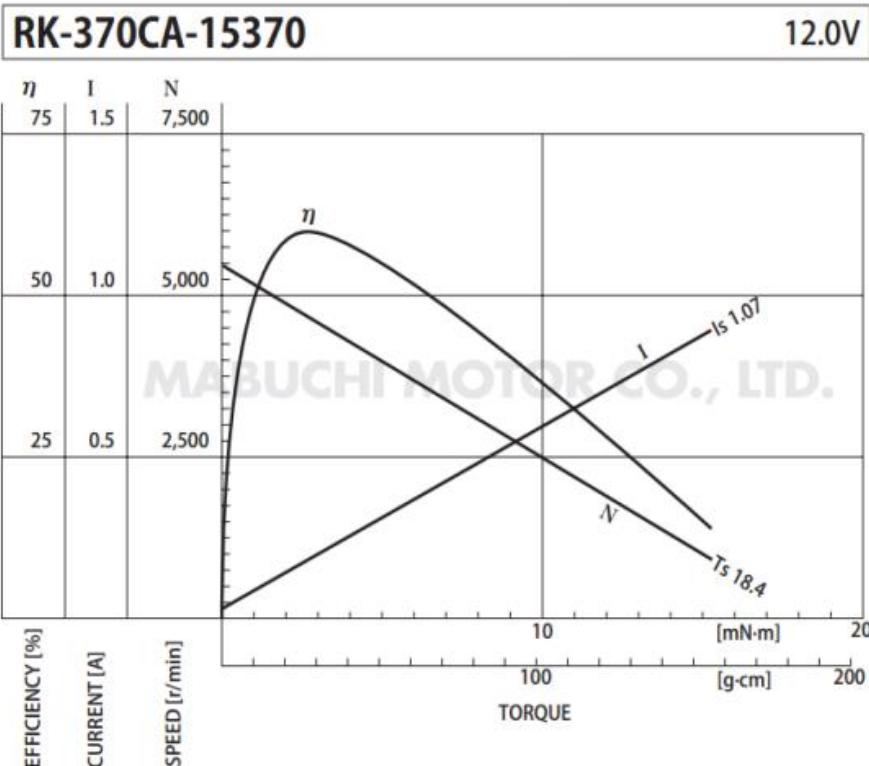
On a constaté lors de mesures une chute de tension pour U_s de 0.8 volts pour un courant de 2.5 Ampères.

On peut en déduire la résistance interne de l'alimentation qui est de 0,32 ohms.

3 - Modélisation des moteurs

a) Le moteur horizontal :

MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY					STALL		
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE		OUTPUT	TORQUE	CURRENT	
			r/min	A	r/min	A	mNm	g·cm	W	mNm	g·cm	A
RK-370CA-15370	12~24	12V CONSTANT	5500	0.032	4690	0.19	2.71	27.7	1.33	18.4	188	1.07



Selon la documentation :

- $R = 12V / 1,07A = 11,2 \text{ ohms}$ (résistance du moteur bloqué)
- $K = 0,00271\text{m.N} / 0,16\text{A} = 0,017 \text{ m.N/A}$

Le calcul avec la fem donne 0,02 V.s/rad (no load)

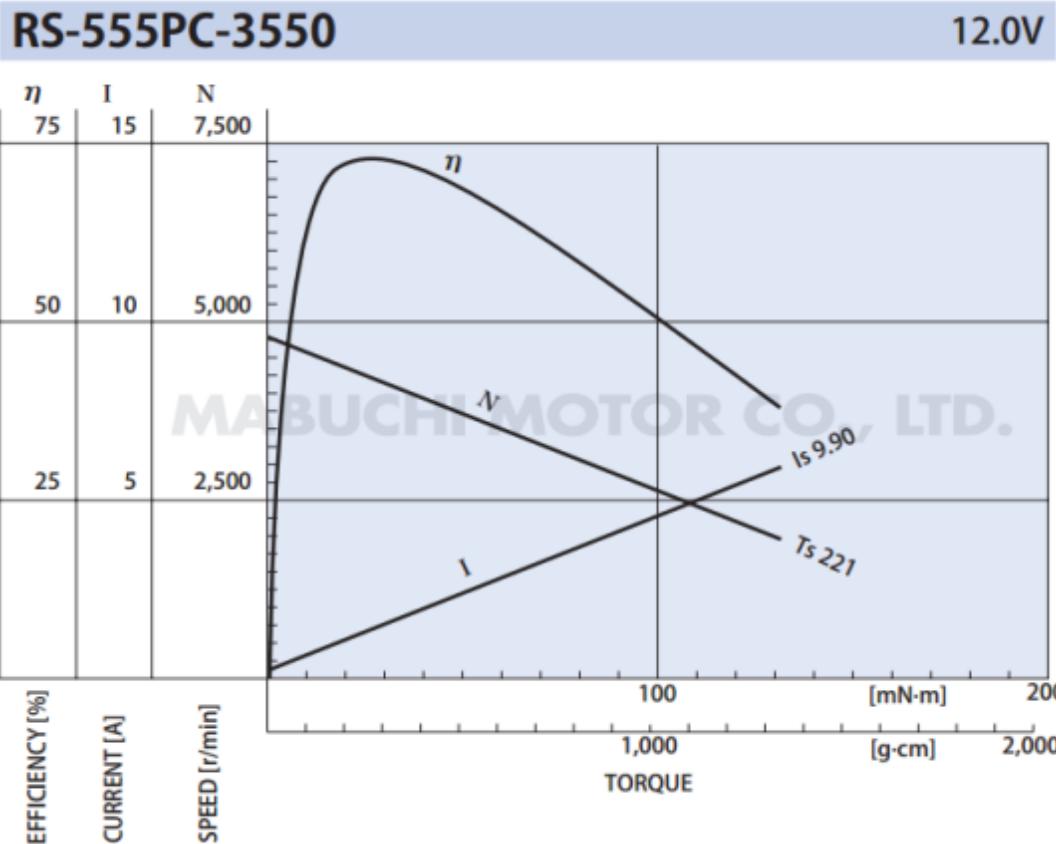
- $N = 5500 \text{ tr/mn} = 575 \text{ rad/s}$
- $E = U - RI = 12 - 11,2 \times 0,032 = 11,64V$
- $K = 11,64 / 575 = 0,020 \text{ V.s/rad}$

Avec les mesures nous obtenons des valeurs un peu différentes :

- Moteur bloqué, $I = 0,11 \text{ A}$ $U=2,4 \text{ V}$ $R = U/I = 22 \text{ ohms}$
- Entraînement à vide :
 - ✓ $I = 0,11 \text{ A}$ $U = 13,3 \text{ V}$ $Wroue = 3,63 \text{ rad/v}$ soit $Wmoteur = 490 \text{ rad/s}$
 - ✓ Fem $E = U - (R,I) = 13,3 - (22 \times 0,11) = 10,88 \text{ V}$
 - ✓ $K = E / W = 10,88 / 490 = 0,0222 \text{ V.s/rad}$

b) Le moteur vertical :

MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL			
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE		OUTPUT	TORQUE	CURRENT	
			r/min	A	r/min	A	mN·m	g·cm	W	mN·m	g·cm	A
RS-555PC-3550	9~30	12V CONSTANT	4800	0.17	4240	1.30	25.6	261	11.4	221	2253	9.90



Selon la documentation :

- $R = 12V / 9,9 A = 1,21 \text{ ohms}$ (résistance du moteur bloqué)
- $K = 0,0256m.N / 1,3A = 0,019$

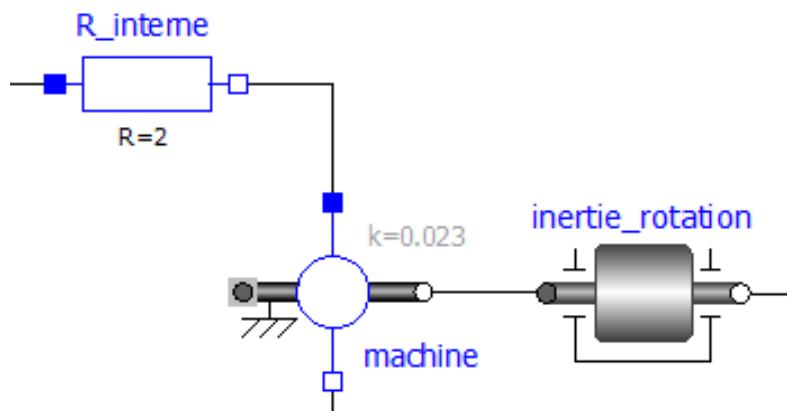
Le calcul avec la fem donne **0,023 V.s/rad**(no load)

- $N = 4800 \text{ tr/mn} = 502 \text{ rad/s}$
- $E = U - RI = 12 - 1,21 \times 0,17 = 11,8V$
- $K = 11,8 / 502 = 0,023 \text{ V.s/rad}$

Avec les mesures nous obtenons des valeurs un peu différentes :

- Moteur bloqué $R=2 \text{ ohms}$
- Entraînement à vide :
 - ✓ $I = 0,62 A \quad U = 13 V \quad Wroue = 7,02 \text{ rad/v}$ soit $W_{\text{moteur}} = 470 \text{ rad/s}$
 - ✓ Fem $E = U - (R,I) = 13 - (3,5 \times 0,62) = 10,83 V$
 - ✓ $K = E / W = 10,83 / 470 = 0,023 \text{ V.s/rad}$

c) La modélisation du moment d'inertie « J » du rotor :



L'inertie en rotation du rotor reste une grandeur qu'il est difficile de mesurer sans faire appel à un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. La méthode la plus couramment employée est « le pendule de torsion » (voir définition sous Wikipedia), à condition d'être déjà doté d'un moment d'inertie « étalon » permettant de calibrer les mesures.

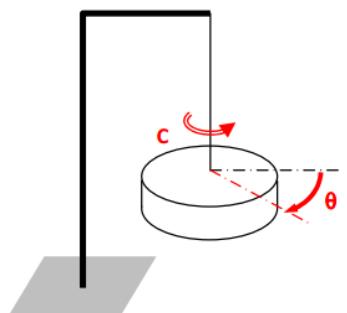
Une autre possibilité reste une approximation pratiquée par exemple à partir d'une ébauche sous modeleur volumique, en représentant le rotor de façon très simplifiée et en lui administrant une masse volumique de $7\ 800\ \text{Kg/m}^3$.

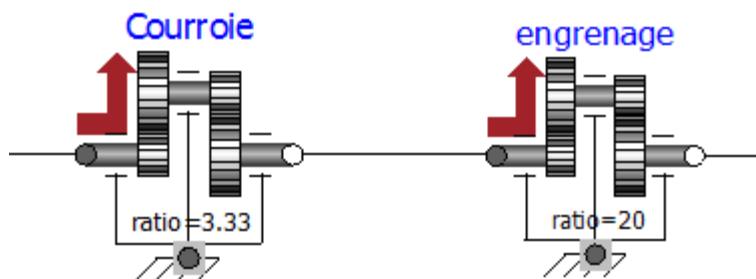
L'idéal étant bien entendu de disposer de données constructeur, ce qui n'est pas le cas pour cette motorisation.

Nous avons mesuré le moment d'inertie des rotors par la méthode du pendule, cette mesure est détaillée dans le document « MobyCrea-Pendule.pdf »

L'inertie du rotor verticale est de $4,16 \cdot 10^{-6}\ \text{kg.m}^2$

L'inertie du rotor horizontal est de $0,72 \cdot 10^{-6}\ \text{kg.m}^2$





a) Roues et courroies :

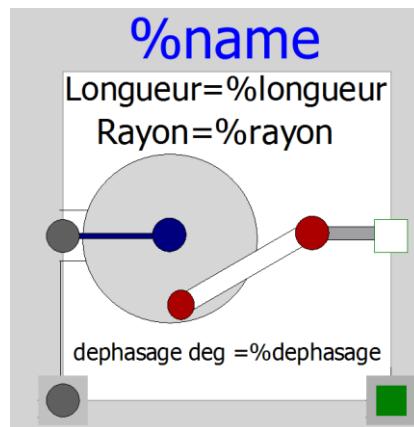
Le rapport de transmission est le rapport des diamètres des roues

- Pour le mouvement horizontal, le rapport est de $27/16$ (1,7)
- Pour le mouvement vertical il est de $88/24$ (3,66)

b) Engrenages :

En horizontal, la vis comporte 1 filet et la roue 90 dents, soit un rapport de 90.
La petite roue intermédiaire est sans effet sur le rapport de transmission.

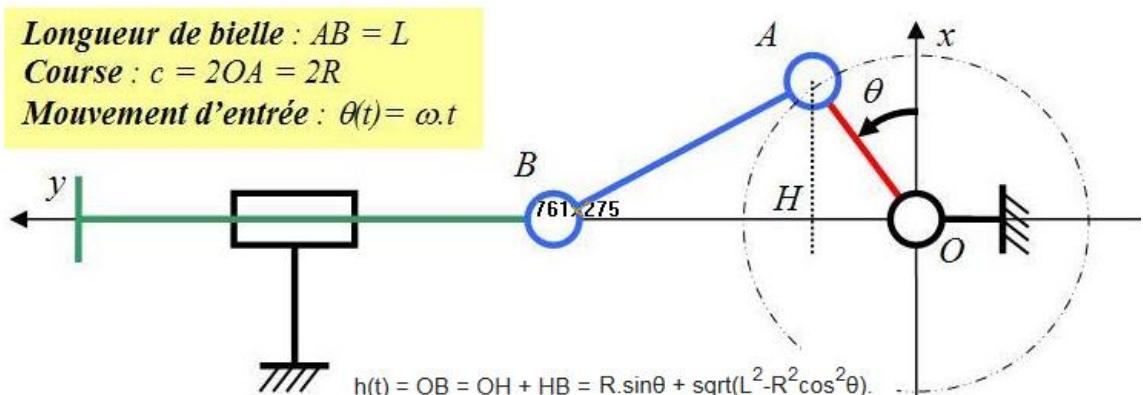
En vertical, la vis comporte deux filets et la roue 40 dents, soit un rapport de 20.



a) Version Modelica (équation) :

Pour modéliser le système, un objet a été créé sous Modéllica, il intègre les équations de fonctionnement du système bielle manivelle.

La première équation à déterminer est celle du déplacement axial de la bielle en fonction de l'angle de rotation, cette équation est extraite de Wikipédia.



L : Longueur de bielle (50 mm pour mouvement vertical – 95 mm pour l'horizontal)

R : Rayon de manivelle (19 mm pour mouvement vertical - 36 mm pour l'horizontal)

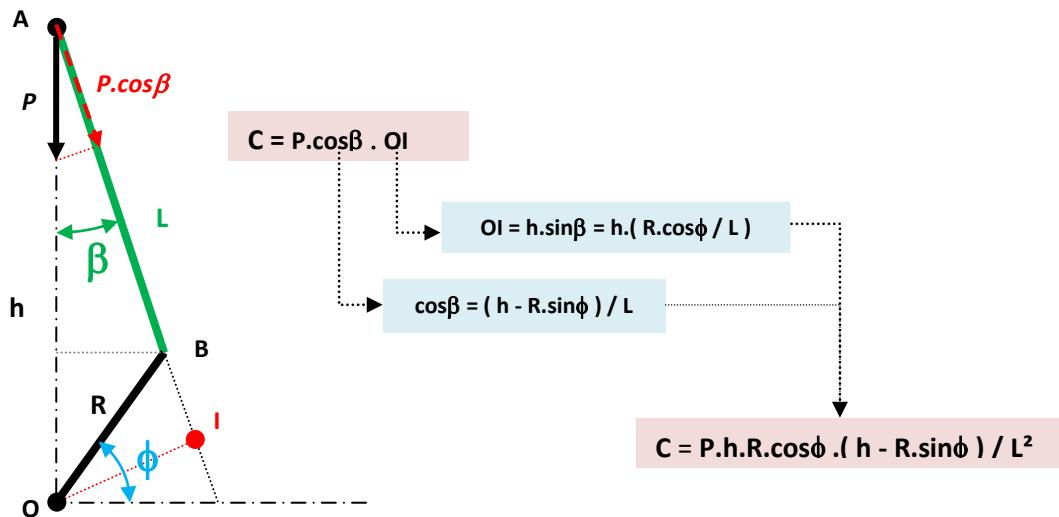
L'équation $H=f(\theta)$ nous donne en langage Modelica (angle phi)

$$flangeT.s = rayon * \sin(phi) + \sqrt{longueur^2 - rayon^2 * \cos(phi)^2}$$

Il faut maintenant déterminer l'équation du couple en fonction de l'effort axial.

P est l'effort axial qui peut être le poids.

Calcul du couple « C » appliqué à la manivelle, en fonction du poids « P »



La bielle est soumise à deux forces d'intensité « $P.\cos\beta$ » en raison de son inclinaison par rapport à la direction du poids et de l'hypothèse de pièce soumise à deux forces. La direction de cette action, portée par l'axe « AB » de la bielle, engendre dans ce cas un couple résistant appliqué à la manivelle en raison du bras de levier « OI ». C'est donc ce couple résistant, variable suivant la position du mécanisme, qu'il faudra combler ici au moyen du système motorisé.

L'équation du couple nous donne en langage Modelica :

$$flangeR.tau = (-flangeT.f * (flangeT.s - rayon * sin(phi)) * flangeT.s * rayon * cos(phi)) / longueur * longueur$$

flangeR.tau : couple
rayon : rayon de la manivelle

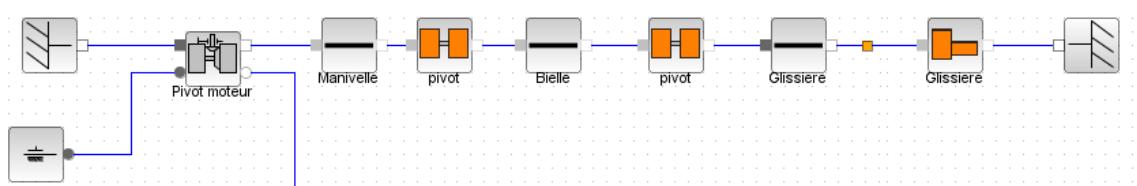
flangeT.s : position axiale
longueur : longueur de la bielle

flangeT.f : effort axial

Les paramètres à saisir sur l'objet sont le rayon et la longueur, un paramètre déphasage exprimé en degré a été ajouté pour déphaser les deux mouvements.

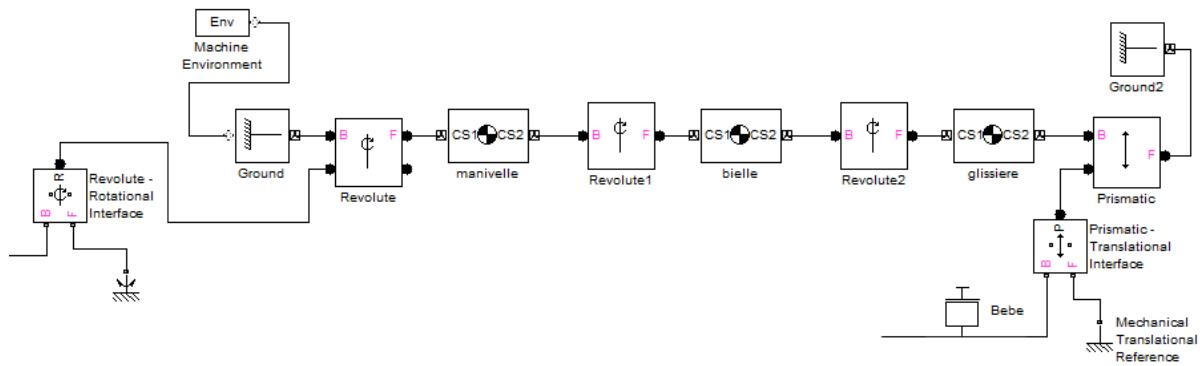
$$\phi = flangeR.phi + dephasage * pi / 180 - internalSupportR.phi$$

b) Version Scilab-Xcos (mécanique plane) :



Le système bielle-manivelle est constitué d'objets issus de la bibliothèque de mécanique plane. Les paramètres à saisir sont les longueurs des bielles et des manivelles.

c) Version Matlab Simulink (mécanique plane) :

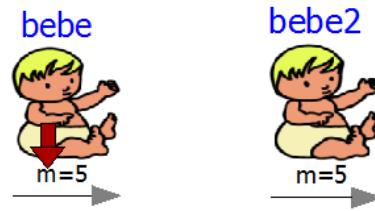


La construction est similaire au modèle Scilab

6 - Modélisation du bébé

a) Version Modelica (équation) :

Un objet particulier a été créé pour améliorer la lisibilité, il y a en fait deux bébés, un pour le mouvement horizontal constitué d'une simple masse en mouvement, un autre pour le mouvement vertical qui comporte une composante qui correspond à son poids.

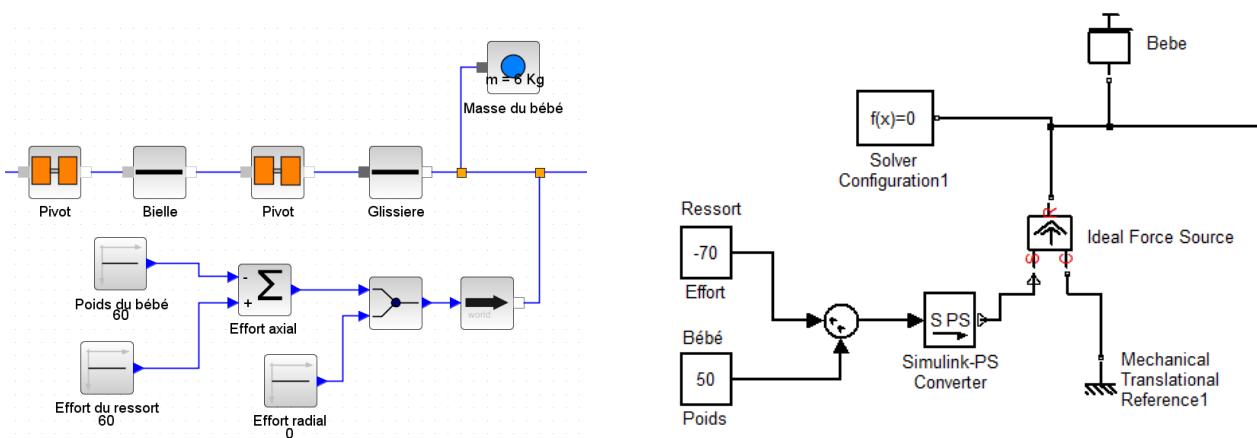


Equation Modélica du bébé avec le poids (effort = masse*accélération + effort entrant)

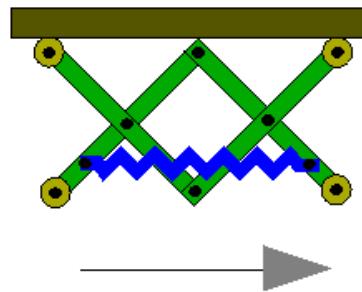
$$\begin{aligned} v &= \text{der}(s); \\ a &= \text{der}(v); \\ \text{flange_a.f} &= m * (a + 9.81) - \text{flange_b.f} \end{aligned}$$

b) Version Scilab-Xcos et Matlab

Un effort axial représente le poids du bébé, une inertie représente sa masse.

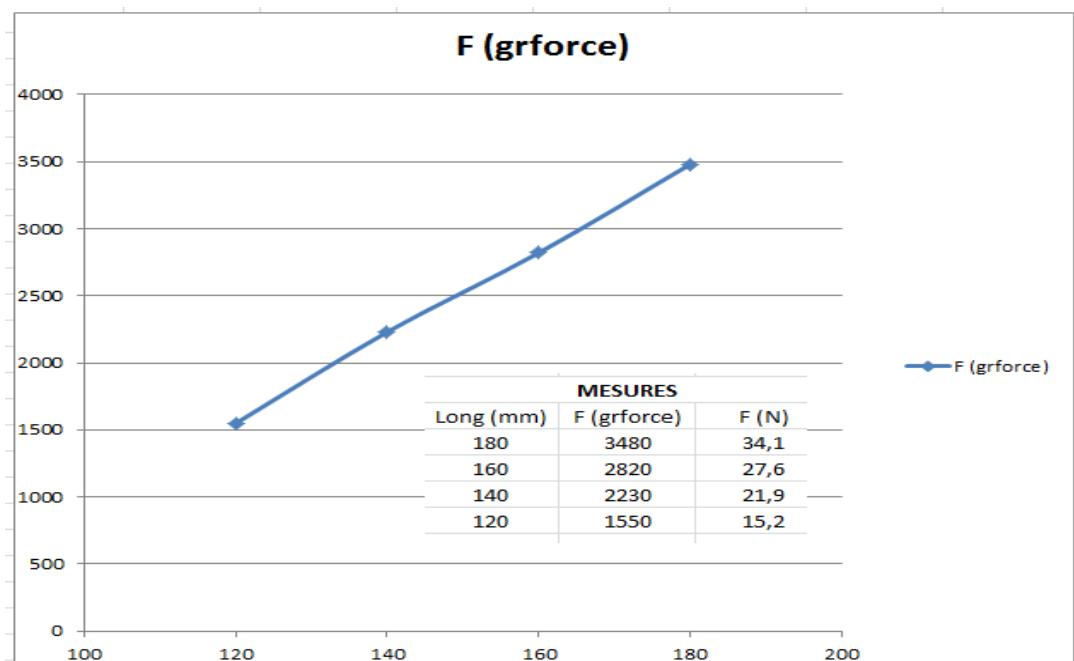


7 - Modélisation du double X



a) Calcul de l'effort :

Pour déterminer l'effort vertical du dispositif, il faut dans un premier temps déterminer la raideur du ressort et ensuite l'équation de l'effort en fonction du déplacement.

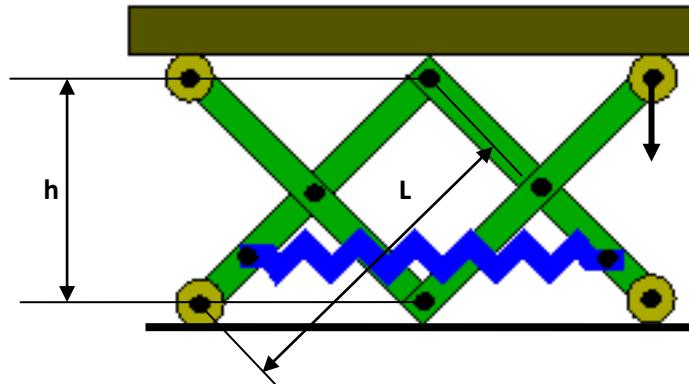


Les mesures nous permettent d'obtenir l'équation suivante $Fr = 316 \times L - 23$ (L en m)

Recherche de l'expression de l'effort vertical « Fv » transmis par le système :

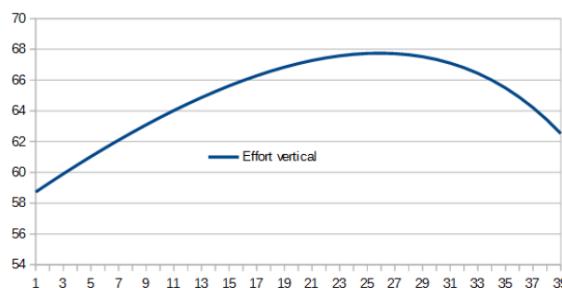
Une étude statique du système (détails fournis en pages suivantes) permet d'établir la relation suivante entre l'effort vertical « Fv » transmis par le système et :

- L'effort « Fr » transmis par les ressorts, variable au cours du fonctionnement
- La longueur « L » d'un levier
- La hauteur « h » de la structure en croix



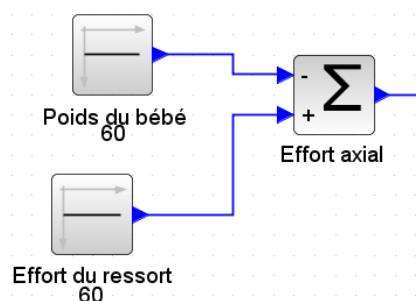
$$F_v = 3 \cdot F_r \cdot h / (L^2 - h^2)^{0,5}$$

Résultats, en considérant l'évolution de l'effort « Fv » suivant position du système :

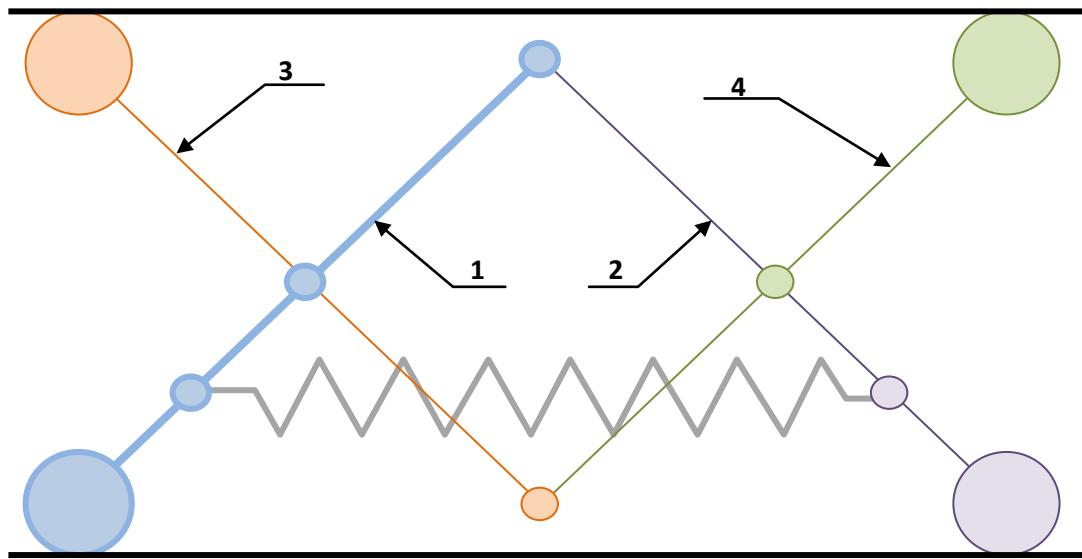


a) Modélisation de l'effort

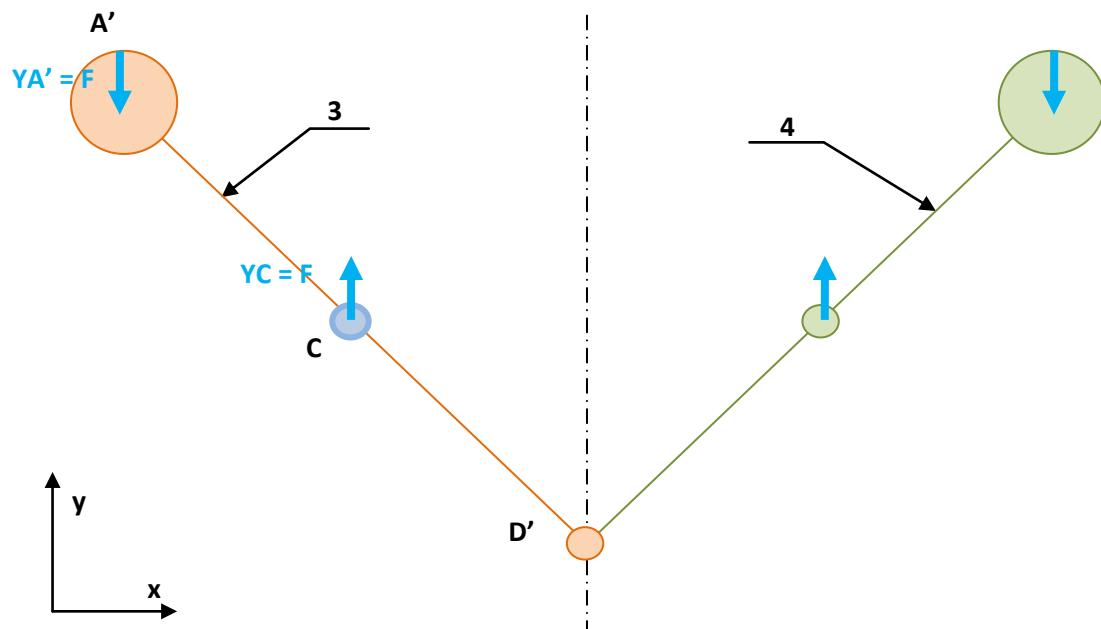
L'effort « Fv » est considéré comme étant constant et égal à 60N, en réalité il varie un peu, l'équation précédente peut aussi être intégrée au modèle. Cet effort est opposé au poids du bébé.



Détails d'étude statique :



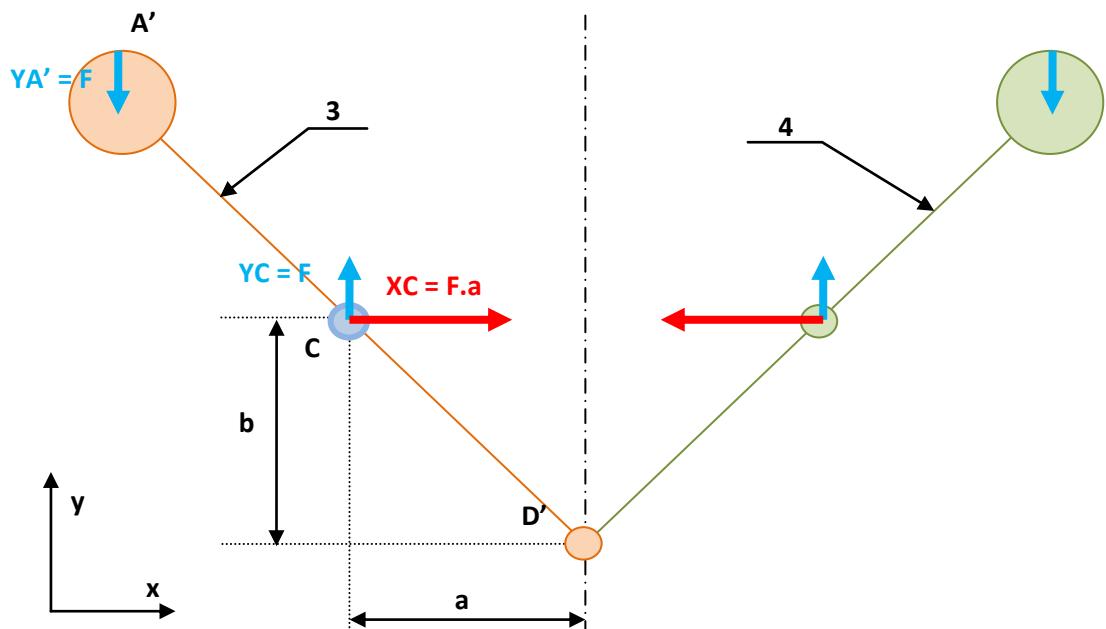
Equation de la résultante selon « y » appliquée à l'ensemble {3 ; 4} + symétrie du système :



$$YA' - YC = 0$$

$$\Rightarrow YC = YA' = F$$

Equation du moment résultant selon « z » appliquée à « 3 » en D' :



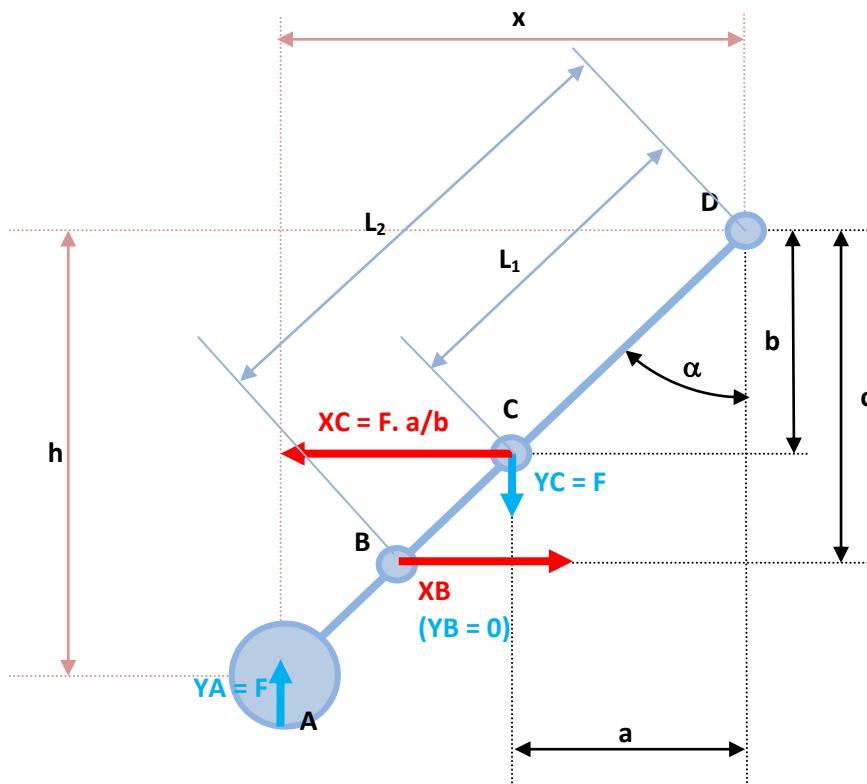
$$- YC.a - XC.b + YA'.2a = 0$$

$$\Rightarrow -F.a - XC.b + F.2a = 0$$

$$\Rightarrow F.a - XC.b = 0$$

$$\Rightarrow XC = F.(a/b)$$

Equation du moment résultant selon « z » appliquée à « 1 » en D :



$$- XC \cdot b + XB \cdot c + YC \cdot a - YA \cdot 2a = 0$$

$$\Rightarrow - F \cdot (a/b) \cdot b + XB \cdot c + F \cdot a - F \cdot 2a = 0$$

$$\Rightarrow - F \cdot a + XB \cdot c + F \cdot a - F \cdot 2a = 0$$

$$\Rightarrow XB \cdot c - F \cdot 2a = 0$$

$$\Rightarrow XB = 2 \cdot F \cdot (a/c)$$

$$\Rightarrow XB = 2 \cdot F \cdot (a/b) \cdot (b/c)$$

$$\Rightarrow XB = 2 \cdot F \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot (L_1/L_2) \quad (\text{action transmise par ressort})$$

Soit en considérant $(L_1/L_2) = 2/3$:

$$F_{\text{ressort}} = F \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot (4/3)$$

En constatant d'autre part $\operatorname{tg} \alpha = x/h$, $x = (L^2 - h^2)^{0.5}$ et $Fv^* = 4 \cdot F$, on obtient :

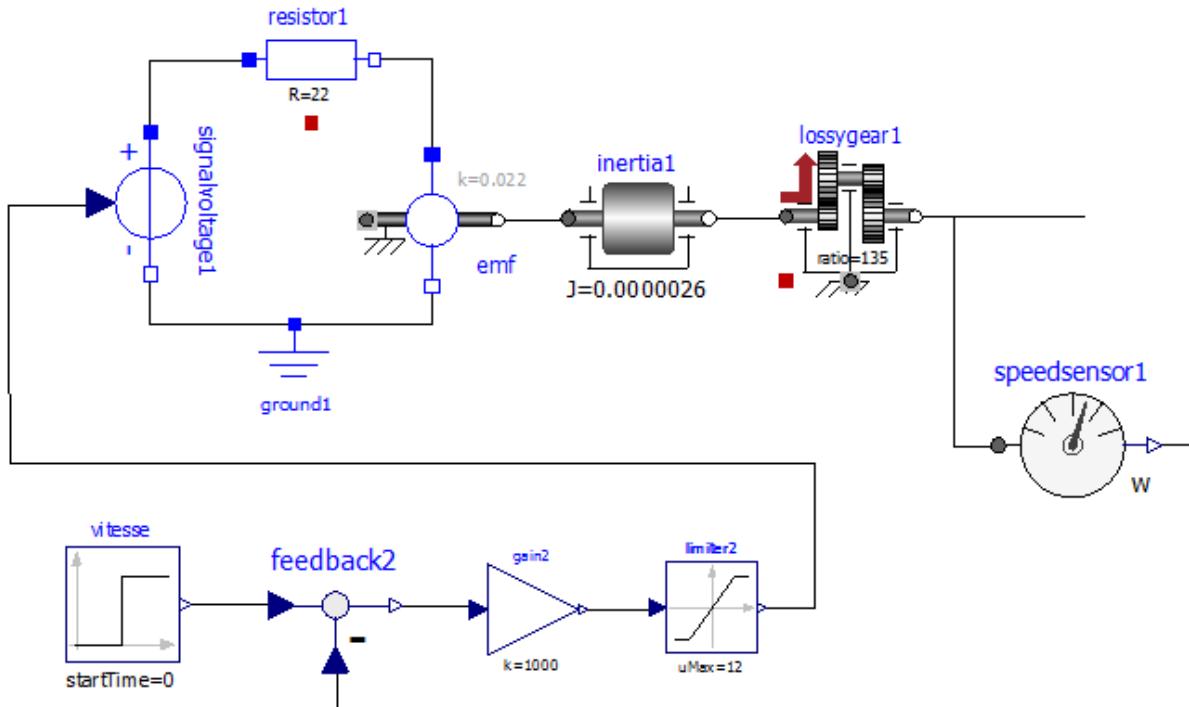
$$F_{\text{ressort}} = Fv \cdot (L^2 - h^2)^{0.5} / 3h$$

*Fv : « Effort vertical » obtenu grâce à la tension de ressorts

8 - Régulation de vitesse

Version Modelica

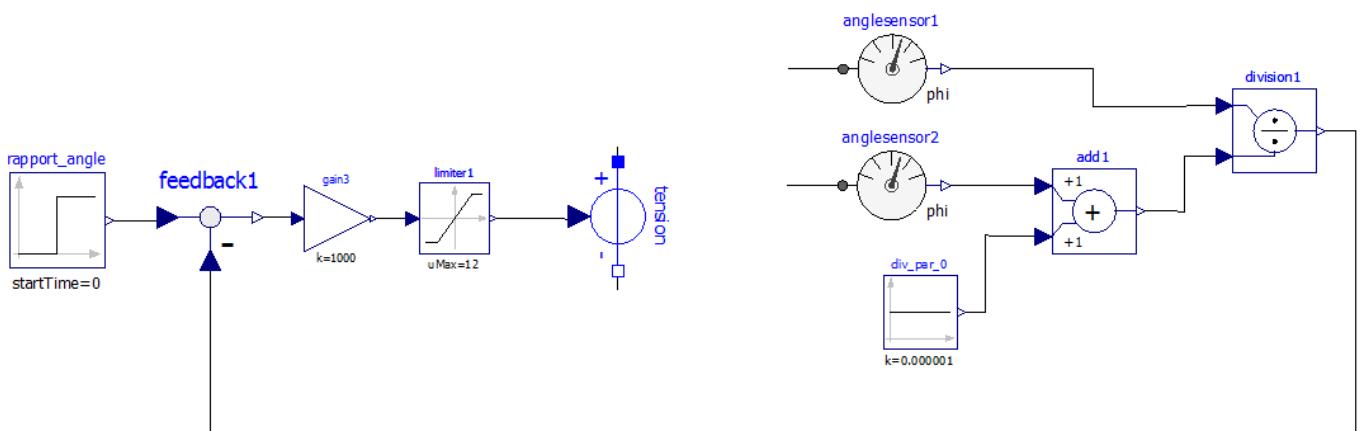
Un capteur de vitesse angulaire mesure la vitesse en sortie du réducteur, cette vitesse est comparée à la consigne, une simple régulation proportionnelle est mise en place ici, l'objectif étant ici d'obtenir des trajectoires réalisistes.



9 - Synchronisation des mouvements

Pour obtenir des trajectoires conformes au système réel, il est nécessaire de synchroniser les deux mouvements, le choix a été fait de mettre en place une boucle de régulation pour maintenir un rapport angulaire constant. La régulation de vitesse est mise en place sur un seul axe, le second est piloté par une régulation de position angulaire, le rapport angulaire étant maintenu constant (2 par exemple)

Un capteur de mesure angulaire est mis en place sur chacun des axes, le rapport entre les deux angles est comparé à la consigne.



9 – Visualisation des butées

Les butées qui nécessitent la mise en place d'un algorithme de commande ne sont pas prises en compte ici, elles sont cependant visualisées.

