

Conception d'un module à vibration interne

Ing. M. A. DION
Dr J. LECOINTRE
PIERRARD – Virton

Le but de cette étude est de concevoir un module à vibration interne capable de se mouvoir sans mécanisme d'entraînement externe. L'objectif à terme est de développer une capsule médicale miniaturisée.

Premièrement, une étude sur la modélisation d'un module à vibration interne a été réalisée. Une fois la conception choisie, les plans pour toutes les pièces ont été établis en deux et trois dimensions. Cet article donne la méthode suivie pour produire le premier prototype et le prototype final. Après cela, certains aspects théoriques qui ont été utilisés lors de la conception sont expliqués. Enfin, une étude théorique a été effectuée à l'aide de la fiche technique du moteur pour montrer le lien entre le mouvement de la capsule et les forces données par ou contre le moteur.

Mots-clefs : vibration, modélisation, design 3D, prototypage

The aim of this work is to design a capsule system to simulate an internal vibro-impact force for driving. The final objective is to develop a miniature capsule for medical purposes.

Firstly, an investigation about the modelling of a vibro-impact capsule system has been done. Once the design has been chosen, the plans for all the pieces have been drawn in two and three dimensions. This paper gives the method followed to produce the first prototype and the final prototype. After that, some theoretical aspects which have been used during the design are explained. Finally, a theoretical study has been done using the motor datasheet to show simply the link between the motion of the capsule and the forces given by the motor or against it.

Keywords: vibration, modelling, 3D design, prototyping

1. Introduction

Les mécanismes mobiles entraînés par leur propre force interne ont requis l'attention des chercheurs depuis de nombreuses années. Différentes disciplines se penchent sur ce phénomène : le domaine médical, le diagnostic en ingénierie et le sauvetage en cas de catastrophe. L'idée de base, proposée à l'origine par Chernousko [1], est que le mouvement rectiligne d'un système peut être obtenu en utilisant une masse interne interagissant périodiquement avec le corps principal du système en présence d'un frottement sec.

La capsule n'utilise pas de mécanisme d'entraînement externe pour se déplacer, mais uniquement une force interne. Le système se présente sous la forme d'un moteur de dispositif de vibration interne, pouvant être relié à une masse non équilibrée disposée dans un boîtier de dispositif de vibration, et entraînant ladite masse non équilibrée. Le principal avantage de ce système est qu'il peut être encapsulé hermétiquement et se déplacer de façon autonome dans un environnement complexe.

Le but ultime pourrait être une capsule médicale miniaturisée qui se déplace à l'intérieur du corps humain [2]. Toute complication due à un mécanisme d'entraînement externe peut ainsi être évitée. Comme tout récipient pressurisé et autres réservoirs de stockage, il s'agit d'un cylindre fermé à ses deux extrémités avec embouts hémisphériques. Cet article montre la conception d'une telle capsule à entraînement interne de taille moyenne.

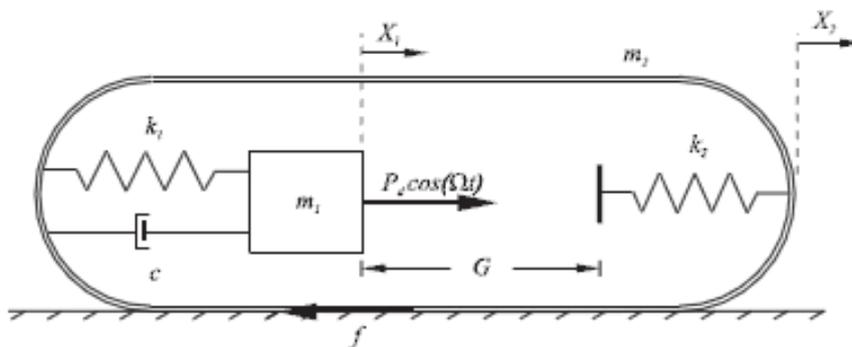


Figure 1 : modèle physique d'une capsule à vibration interne [3]

Quatre chercheurs de l'Université d'Aberdeen ont travaillé sur la modélisation d'un système de capsule à vibration interne. Le système est constitué d'une capsule qui utilise une force vibrante interne pour se propulser. Le modèle de frottement de Coulomb est utilisé pour décrire les interactions entre la capsule et l'environnement. Le déplacement est possible lorsque la force agissant sur la capsule est plus grande que la force de frottement sec.

Une représentation de la capsule est présentée en figure 1. La masse mobile m_1 est entraînée par un servomoteur à courant continu linéaire. Ceci occasionne la force interne. Le moteur est symbolisé par le ressort avec une raideur k_1 et l'amortisseur c . Le module comporte une partie mobile reliée à la masse interne et une partie fixe montée sur le corps rigide m_2 . Une plaque reliée à un ressort de raideur k_2 est montée sur la capsule. X_1 et X_2 représentent respectivement les déplacements absolus de la masse interne et le déplacement de la capsule. La masse interne va heurter la plaque lorsque le déplacement $(X_1 - X_2)$ sera égal ou supérieur à l'écart G . Le mouvement de la capsule a lieu lorsque la force agissant sur la capsule grâce à l'action de la masse interne est supérieure au seuil de friction à sec de la force de frottement P_f entre la capsule et l'environnement extérieur.

2. Prototypage

2.1. Premier prototype

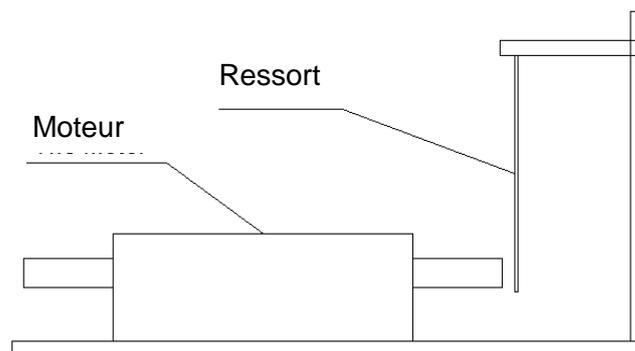


Figure 2 : Schéma de la capsule à vibration interne

Afin de prototyper la capsule (figure 1) : le mouvement de la masse m_1 est produit par un moteur à courant continu linéaire. La capsule est représentée par un module mécanique comme présenté sur les figures 2 et 3.

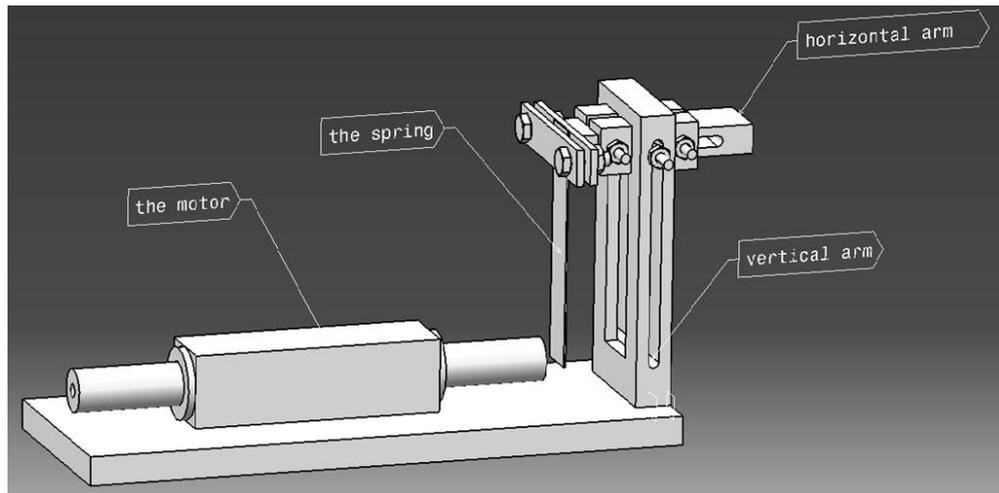


Figure 3 : Premier prototype de la capsule à vibration interne

La tige du moteur tape sur le ressort et si la force résultante est plus grande que la force de frottement, le module se déplace vers la droite. Tous les paramètres du moteur sont connus mais les autres paramètres sont à déterminer.

Le moteur étant fixé sur la plaque de fond avec quatre vis, seules les positions des autres pièces du module peuvent être modifiées. Un mécanisme pour ajuster la distance entre la tige du moteur et le ressort a été mis au point.

Le bras horizontal est capable de se déplacer vers le haut ou vers le bas dans le trou du bras vertical (figure 3). La longueur entre la plaque de fond et le haut du bras horizontal peut être ajustée. Le bras horizontal coulisse dans le bras vertical. Le réglage en hauteur permet à la variation de la longueur du ressort. La forme carrée des éléments empêche un mouvement de rotation. Les utilisateurs peuvent serrer les différentes vis pour éviter tout mouvement dans une direction ou une autre.

Le bras horizontal peut se déplacer sur la droite ou sur la gauche. Ce mouvement permet la variation de la distance entre la tige du moteur et le ressort.

Une autre caractéristique de ce module est la possibilité de changer la plaque inférieure. Pendant les phases d'essai, il est en-effet intéressant de changer le coefficient de frottement. Le module ne se déplace pas à la même vitesse lorsque vous modifiez la friction entre celui-ci et la plate-forme de test.

2.2. Prototype final

Sur base des essais sur le premier prototype, le prototype final a été mis au point (figure 4 et 5). Les longueurs des bras verticaux et horizontaux ont été ajustées. Le bras horizontal permet un réglage de 20 mm de la distance entre le ressort et la tige du moteur. La tige du moteur peut se déplacer sur un intervalle de 20 mm. Dans le prototype final, le bras vertical est composé de deux parties reliées entre elles par l'intermédiaire d'une tige filetée. Cette conception est plus souple et permet un meilleur serrage du bras horizontal. La plaque inférieure a également été modifiée. Deux ressorts peuvent être placés sur le côté gauche, ou sur le côté droit ou des deux côtés. Cela permettra l'étude de la réaction du module avec différents ressorts de raideur différente sur les côtés du module. Le prototype final est également équipé de deux barres de renfort pour assurer la rigidité du bras vertical et réduire les efforts sur celle-ci.

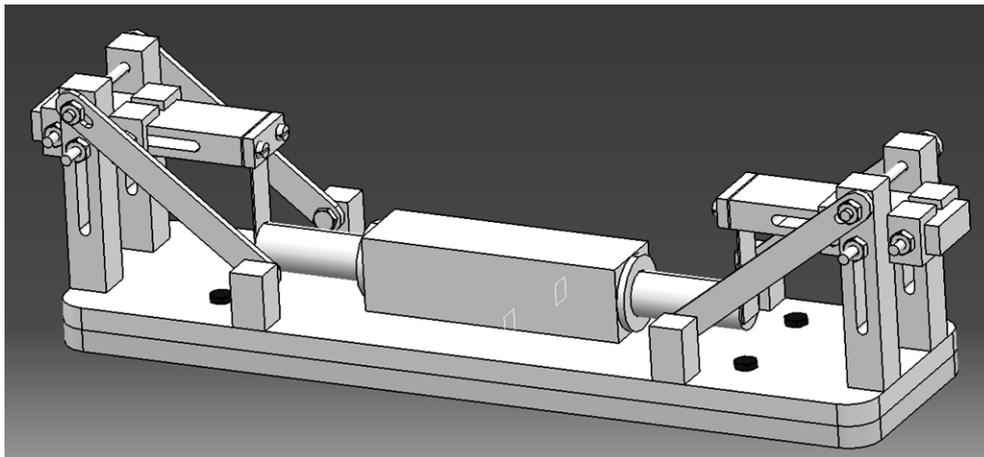


Figure 4 : Vue complète de la capsule à vibration interne

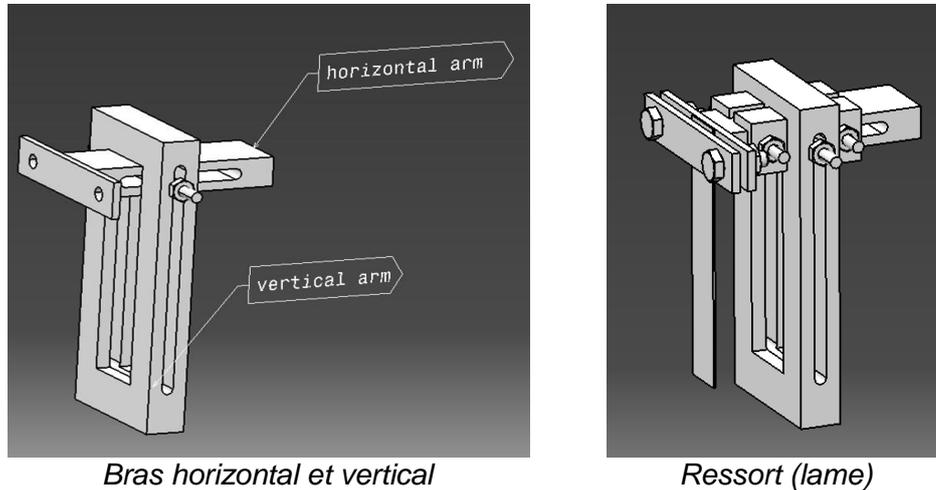


Figure 5 : Détails des bras et du ressort

3. Modélisation

3.1. Littérature

Des études ont déjà analysé les réponses de ce type de système de capsule [3] [4]. Le mouvement de la capsule (figure 1) est décrit dans des environnements différents via quatre modèles de frictions. Le frottement de Coulomb avec un amortissement visqueux [5] et l'effet Stribeck [6] sont principalement utilisés. Avec ces modèles, le mouvement du système est décrit avec de nombreuses équations du mouvement. Une équation est donnée pour chaque phase du déplacement. Il y a quatre phases :

- La capsule est à l'arrêt sans contact : la masse interne n'a aucun contact avec la plaque reliée à la source secondaire (k_2).
- La capsule se déplace sans contact : la masse n'est pas en contact avec la plaque, mais la force produite par le ressort (k_1) et de l'amortisseur est supérieure à la force de frottement.
- La capsule est stationnaire avec contact : la masse interne est en contact avec la plaque, mais la force produite par le ressort et l'amortisseur est plus petite que la force de frottement.

- La capsule se déplace avec contact : la masse interne est en contact avec la plaque et la force produite par le ressort et l'amortisseur est supérieure à la force de frottement.

Une fois que les équations de mouvement sont définies, l'analyse est grandement simplifiée et des variables non-dimensionnelles peuvent être introduites pour réaliser une analyse non-linéaire.

3.2. Force de friction

Le paramètre principal est le frottement entre la plaque qui supporte le poids total de la capsule et le support. La définition de la force de friction est la suivante:

$$F_f = \mu_s (m_1 + m_2)g \text{ [N]}$$

Le coefficient de frottement varie en fonction de la surface [7], le coefficient le plus défavorable correspond à un contact aluminium sur aluminium (avec une valeur de 1.35 [8]).

Le module est conçu en aluminium avec une masse volumique de 2700 [kg/m³]. Avec la fiche technique du moteur et les dessins 3D, le poids du module peut être estimé. La masse du moteur vaut 236 g et celle des parties mécaniques est 400 g. La force de frottement vaut donc 8.7 N (dans le cas le plus défavorable). Pour s'opposer à la force de frottement, il faut développer une force minimale de 8.7 N. Le moteur peut produire une force maximale continue de $F_{emax} = 9.2 \text{ N}$, celui-ci est donc suffisant pour le module. Pour les calculs qui suivent, une force de 9.2 N sur le ressort sera considérée.

3.3. Le ressort (la lame)

On cherche à répertorier les dimensions minimales du ressort. Le ressort est à lame uniforme, son moment de flexion vaut donc :

$$M_{max} = Pl = 374 \text{ N.mm}$$

Avec P , le poids ($P = mg = 0.636 \times 9.81 = 6.2 \text{ N}$) et l , la longueur (600 mm).

La contrainte maximale de flexion vaut :

$$\sigma = \frac{6Pl}{Be^2}$$

Avec un ressort en acier dont la contrainte est 240 N/mm^2 et B la largeur de la tige (12 mm), on trouve l'épaisseur de la tige $e = 0.88 \text{ mm}$.

La flèche est la suivante :

$$f = \frac{Bl^3}{3EI}$$

Avec E le module de Young de l'acier (210000 N/mm^2) et $I = Be^3/12$, on trouve $f = 3.29 \text{ mm}$.

Ainsi, la flexibilité vaut :

$$F = \frac{f}{P} = 0.53 \text{ mm/N}$$

Et on trouve la raideur : R ou $K = \frac{1}{F} = 1.89 \text{ N/mm}$.

3.4. Les bras horizontal et vertical

Pour dimensionner le bras horizontal (visualisation en figure 6), on considère le pire des cas lorsque le moment du ressort est appliqué sur l'extrémité du bras. On peut simplifier le problème avec une poutre encastrée à une extrémité et un moment appliqué à l'autre. Le bras doit être le plus rigide possible. Ainsi, la déformation à l'extrémité libre doit être au minimum.

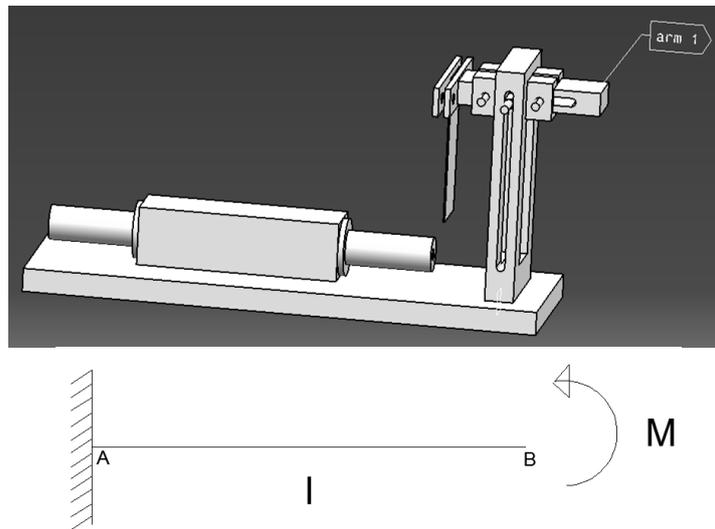


Figure 6 : Vue pour la modélisation du bras horizontal

La déformation est la suivante :

$$f = \frac{M_{max} l^3}{2EI}$$

Avec E le module de Young de l'acier, $I = Be^3/12$, $B = 6e$, et en fixant $f = 0.1$ mm, on trouve l'épaisseur $e = 3.11$ mm.

De façon similaire (visualisation en figure 7), on trouve l'épaisseur $e = 4.08$ mm pour le bras vertical.

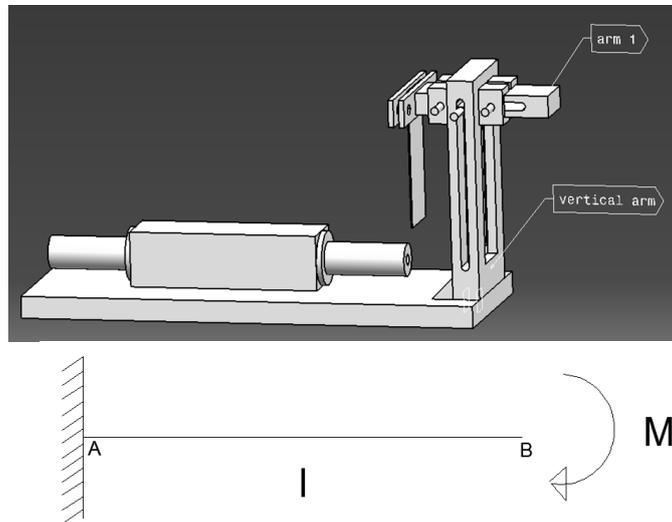


Figure 7 : Vue pour la modélisation du bras vertical

4. Etude théorique

4.1. Modèle

Le mouvement de base de la capsule est présenté dans cette partie (figure 8). Cette étude théorique est basée sur les informations techniques du moteur.

La capsule se déplace sur une plaque de fond. Par conséquent, la pente est égale à zéro et α est égal à zéro. Le moteur doit fournir une force pour accélérer la masse et surmonter toutes les forces qui s'opposent au mouvement.

Selon les lois de Newton du mouvement, nous savons : $\sum \vec{F} = m\vec{a}$

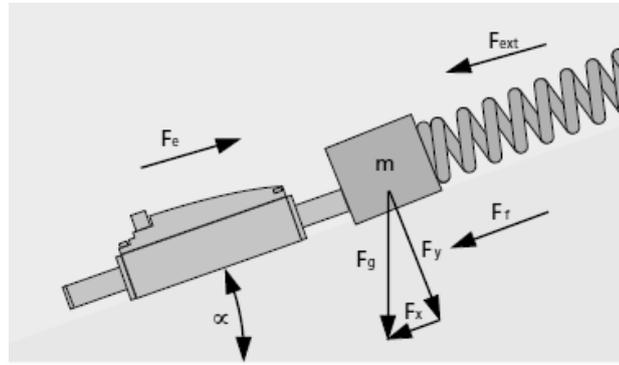


Figure 8 : Schéma des forces s'exerçant sur le moteur [9]

Où m est la masse (la masse du moteur + la masse du module) et a est accélération de la capsule.

donc

$$F_e - F_f - F_{ext} = ma$$

Où F_e est la force continue délivrée par le moteur, F_f la force de frottement entre la masse et le sol et F_{ext} la force extérieure. Ici, la force externe est donnée par le ressort.

Selon les informations techniques données dans fiche technique du moteur, on voit que le profil de vitesse est de type trapézoïdal (figure 9).

Cela signifie que la capsule se déplace selon le profil suivant :

- (1) phase d'accélération (MRUA),
- (2) mouvement à vitesse constante (MRU),
- (3) phase de décélération (MRUD).

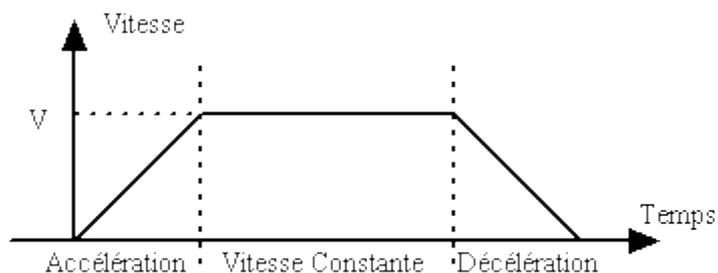


Figure 9 : Profil de vitesse trapézoïdal

4.2. Graphiques

Le programme Matlab[®] a été utilisé pour dessiner un graphe sur le mouvement théorique de la capsule en fonction de plusieurs paramètres. Chaque graphique est basé sur la constante ci-après :

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2; F_{e \text{ max}} = 9.2 \text{ N}; \alpha = 0.$$

4.2.1. Force externe nulle

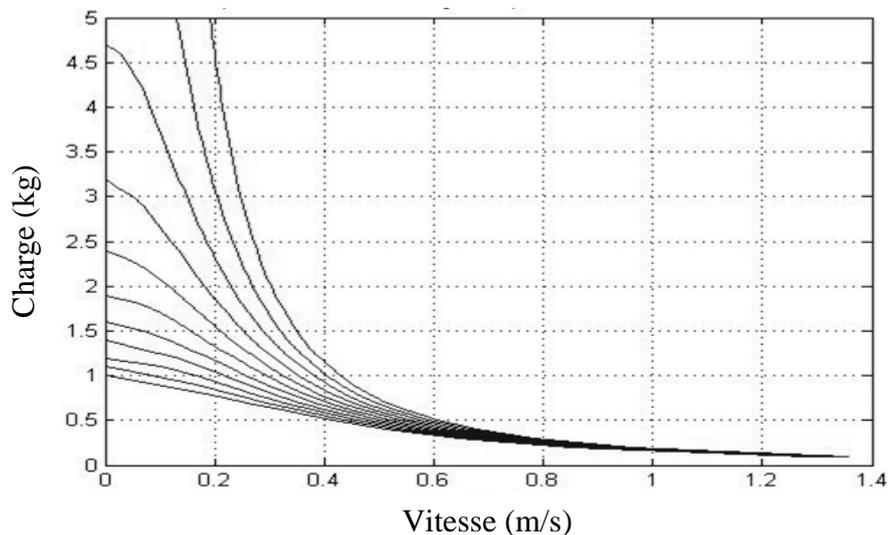


Figure 10 : Graphique de la charge en fonction de la vitesse ($F_e = 0 \text{ N}$)

Le graphique ci-dessus (figure 10) indique la charge admissible à une vitesse donnée du module et à une force externe de 0 N. Chaque courbe représente un coefficient de frottement différent. La courbe la plus basse est à un coefficient de frottement égal à 1 et le coefficient diminue de 0.1 unité pour chaque courbe la plus au-dessus de l'horizontale.

La courbe supérieure, la plus pentue, correspond à un coefficient de friction nul. Nous pouvons facilement comprendre que plus le coefficient de frottement est important, moins il est probable que le moteur soit capable de déplacer une charge élevée. Par exemple, avec un coefficient de frottement égal à 1, le moteur est capable de déplacer une charge maximum de 1 kg.

Une force constante (F_e) a été utilisée pour les calculs et pour tracer le graphique. Il est toutefois possible d'augmenter cette force lorsque l'on augmente le courant d'entrée du moteur. La force maximale peut atteindre 27 N. Cette force permet un mouvement avec une charge supérieure. Voici le graphe avec la force maximale de 27 N (figure 11).

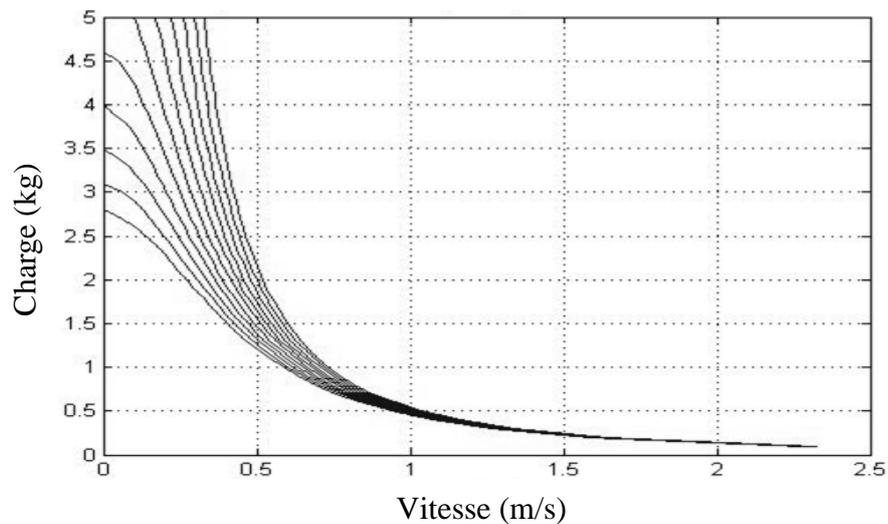


Figure 11 : Graphique de la charge en fonction de la vitesse ($F_e = 27$ N)

Lorsque l'on augmente la force du moteur, on augmente ainsi la charge admissible. Cette fois, pour un coefficient de friction de 1 le moteur est capable de déplacer une charge maximale de 2.8 kg.

4.2.2. Caractérisation du moteur en fonction de la charge

Le graphique ci-dessous (figure 12) permet de visualiser la force nécessaire en fonction du coefficient de frottement pour déplacer une certaine masse.

Chaque courbe du graphique représente une charge différente. La courbe inférieure représente la relation entre F_e et le coefficient de friction pour une charge de 0.1 kg. Les augmentations de charge sont de 0.1 kg pour chaque courbe au-dessus de l'horizontale. La courbe supérieure correspond à un maximum de 1 kg.

Nous en concluons aisément que pour une masse supérieure nous avons besoin d'une force supérieure pour la déplacer.

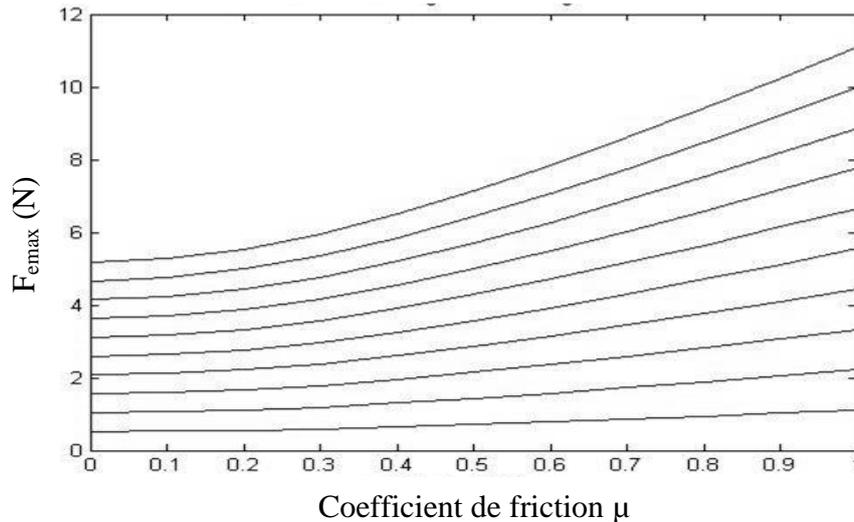


Figure 12 : Graphique de la force F_e nécessaire en fonction du coefficient de friction

Les trois graphiques ci-dessus sont très utiles pour déterminer les limites du moteur. Cela permet de connaître la vitesse atteinte par le module et la force nécessaire pour le déplacer selon la charge sur la capsule. La charge de la capsule sera donnée par le programme 3D CATIA[®].

5. Tests pratiques

Une plate-forme de test a été réalisée (figure 13), celle-ci est composée de trois parties.

La première partie sur le côté droit dans la figure 13 est nervurée. Cette pièce peut être enlevée et remplacée par une autre. L'objectif est d'étudier l'effet du revêtement sur le déplacement du module. La deuxième partie est un canal pour guider le module. Le module ne peut aller que l'avant ou vers l'arrière. Le canal évite tout mouvement vers la droite et vers la gauche. La troisième partie sur la gauche reste libre pour une future installation de test.

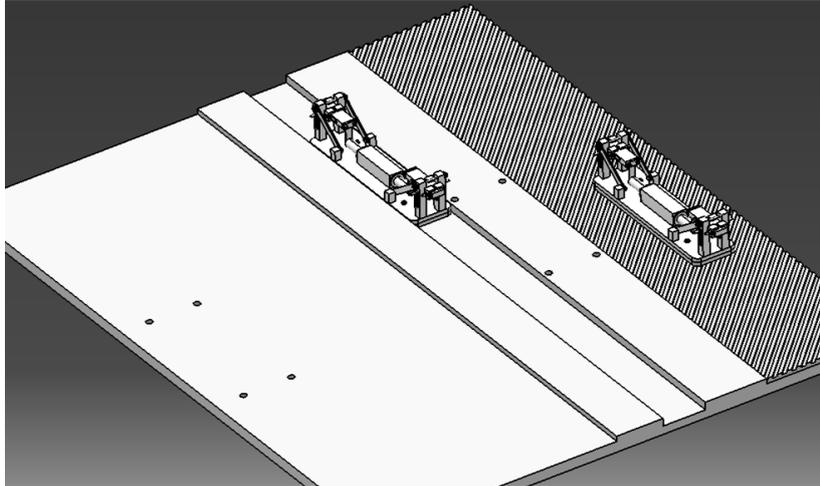


Figure 13 : Plate-forme de test

Le module a été testé et plusieurs essais ont été réalisés. Quelques simulations ont été effectuées pour analyser le comportement du module. Les tests sont assez basiques puisque seul un capteur pour mesurer la vitesse de déplacement du module est nécessaire.

Tout d'abord, différentes informations ont été envoyées au moteur. Plusieurs paramètres peuvent être réglés : la vitesse de la tige (mm/s), le déplacement de la tige (mm), l'accélération et la décélération.

Via le programme réalisé, on obtient des graphiques avec seulement deux données : la position réelle de la tige et la position de la tige sur la simulation.

Ci-dessous sont repris quelques graphiques. La courbe en créneau régulier représente la position réelle et la courbe moins régulière représente la position cible souhaitée.

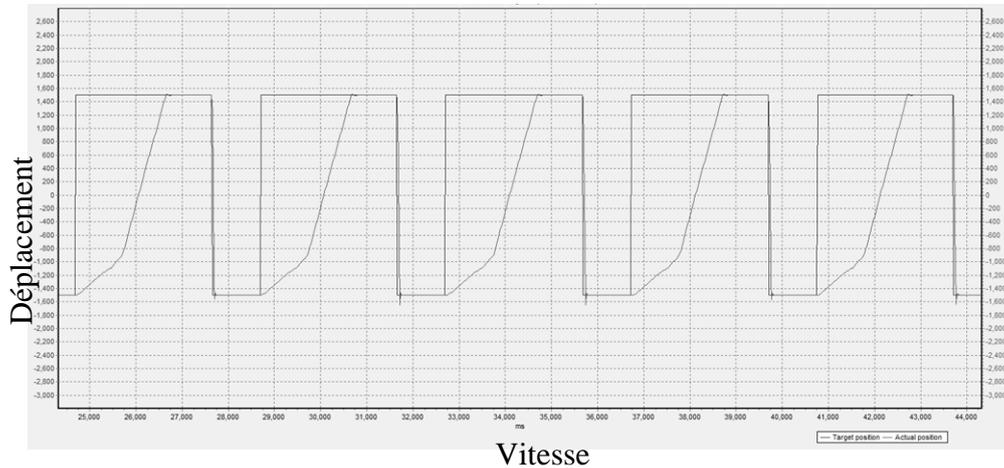


Figure 14 : Exemple de graphique de déplacement

Un déplacement de ± 9 mm de la tige avec une grande vitesse du module de 1 m/s et une faible vitesse de 20 mm/s ont été simulés.

Via ce type de graphique, on remarque que la tige suit correctement les instructions données par le programme. Sur la courbe réelle, on observe une pente faible suivie d'une forte pente. On déduit de ces graphiques que la tige touche légèrement le ressort parce que la courbe réelle dépasse légèrement la courbe de simulation (sur les parties hautes et basses du créneau cible souhaité).

Le module se déplace vers la gauche (du côté du ressort). Le mouvement est seulement dû à l'inertie de la tige (la vitesse est élevée lorsque la tige se déplace vers la gauche et diminue quand elle se déplace vers la droite) et non au ressort.

Le graphique en figure 15 représente la simulation d'un déplacement de ± 12 mm de la tige, avec une vitesse de 1 m/s. Ici, la pente de la droite est plus grande parce que la vitesse est fortement augmentée. La tige touche également le ressort, mais la force du moteur et la résistance du ressort ne permettent qu'un déplacement de 11 mm. Cette information est confirmée via la figure 15 puisque la courbe réelle dépasse la courbe théorique (sur la partie haute du créneau). Lorsque la tige touche le ressort, le ressort produit une force de répulsion. Par conséquent, la tige présente également un déplacement de l'autre côté (en partie basse du créneau cible souhaité).

Cette simulation correspond à un mouvement vers la droite (le ressort est fixé sur le côté gauche).

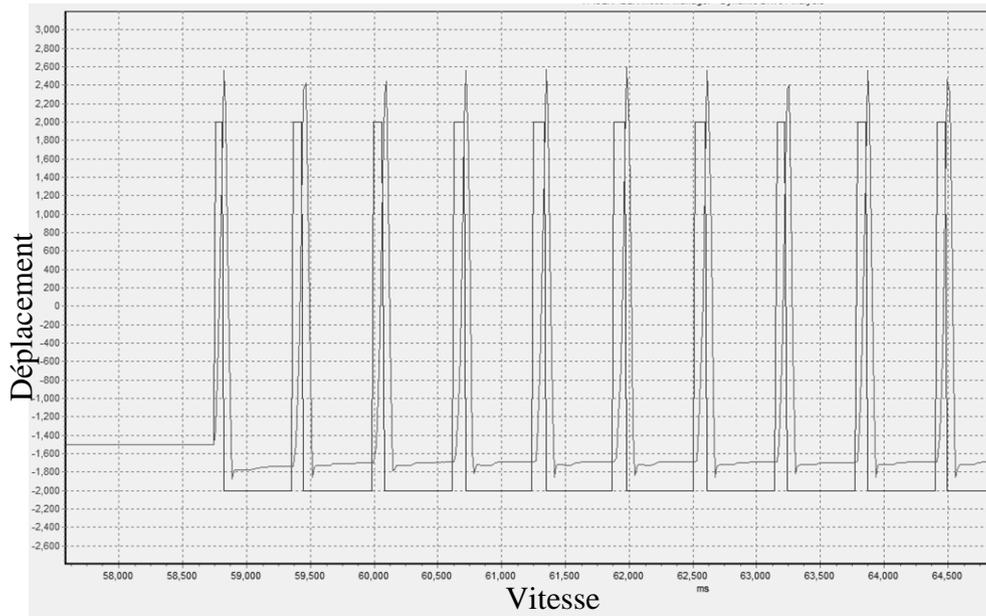


Figure 15 : Graphique de déplacement à 1 m/s

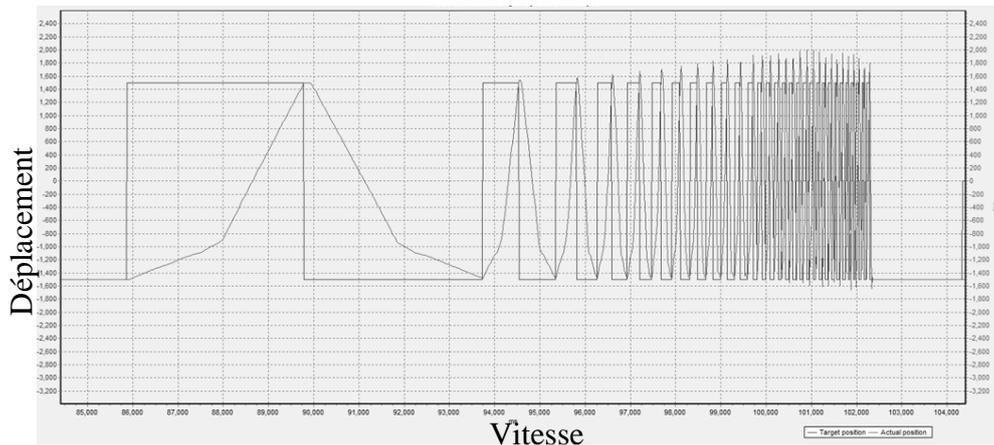


Figure 16 : Graphique de déplacement à 0.04 m/s

Dans la simulation présentée en figure 16, la tige se déplace avec un déplacement de ± 9 mm, et un incrément de vitesse de 0.04 m/s.

La vitesse de départ est de 0.01 m/s et la vitesse finale est 2.01 m/s (simulation de 50 itérations). Quand on augmente la vitesse, la courbe est similaire à celle observée précédemment. La force de répulsion du ressort donne un mouvement du module orienté vers la droite. Plus la vitesse est importante, plus la courbe réelle dépasse la courbe de simulation. A partir d'un certain point, ce dépassement tend à se stabiliser, voire même à diminuer.

Déplacement du côté du ressort [mm]	Déplacement de l'autre côté [mm]	Vitesse de la tige [m/s]	Déplacement du module [mm]
-12	12	1	11
-12	0	1	4
0	12	1	0
-18	0	1	15
-18	9	1	36
-18	18	1	46
-18	15	1	47
-18	6	1	31
-18	3	1	24
-18	-3	1	8
-12	12	1.9	24
-12	0	1.9	4
-18	18	1.9	61
-18	9	1.9	47
-18	15	1.9	60
-18	12	1.9	56
-18	6	1.9	39
-18	0	1.9	16
-12	18	1.9	15
-15	18	1.9	55
-9	18	1.9	0

Tableau 1 : Exemple de déplacement du module

Le tableau 1 indique le déplacement du module. Les déplacements ont été mesurés ; cette table montre donc le déplacement du module dans des conditions d'utilisation réelles. Chaque test est effectué avec 10 itérations et avec un écart entre le ressort et la tige de 10 mm.

Nous pouvons conclure de ces tests que le module se déplace correctement. D'autres tests pourront être effectués dès que la plate-forme et que le prototype finaux seront construits. Le prototype final permettra la modification de la surface de frottement et l'étude du mouvement avec un ressort de chaque côté. Des capteurs seront également nécessaires pour mesurer la vitesse et le déplacement du module avec précision.

6. Conclusion

Un modèle mécanique théorique a tout d'abord été réalisé, suivi par une réalisation pratique. L'ensemble des plans 2D/3D ont été dessinés, avec une collaboration avec l'atelier de l'Université de Aberdeen pour la réalisation pratique. Le module est parfaitement fonctionnel, a été testé et comparé aux simulations. Le but ultime est de développer une capsule médicale miniaturisée qui se déplace à l'intérieur du corps humain

Bien-entendu certaines améliorations peuvent être apportées. Par exemple, les dimensions peuvent être réduites afin d'alléger le module. En effet, si le poids du module est réduit, la force de frottement diminuera également. En l'état actuel des choses, les outils de l'atelier de l'université ne sont pas en mesure de produire un module plus petit.

Des matériaux plus légers (par exemple : fibre de carbone) peuvent être choisis, mais se pose alors le problème du coût de production. Ces choix doivent être pris en compte dès le début du projet.

Des tests plus complets peuvent être réalisés mais, pour ce faire, d'autres capteurs sont nécessaires.

Ce projet a donc été très enrichissant parce qu'il a été réalisé en complète autonomie et mené à bien avec succès.

7. Sources

- [1] Chermousko FL, 2002, *The optimum rectilinear motion of a two-mass system*, J Appl Math Mech; 66, p1-7
- [2] www.cbsnews.com/news/vibrating-capsule-may-relieve-constipation/, article de presse CBSnews, 06 mai 2014
- [3] Liu Y, Wiercigroch M, Pavlovskaja E, Yu H, 2013, *Modelling of a vibro-impact capsule system*, International Journal of Mechanical Sciences, 66, p2-11
- [4] Dr Fritz Faulhager GMBH & CO.KG, edition 2012-2013, *Linear DC-Servomotors with Analog Hall Sensors QUICKSHAFT Technology*
- [5] http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_S_M02_G01_01/co/Contenu_10.html E. Trizac et C. Ybert – Université de Lille 1
- [6] J. Denape, J.-Y. Paris et P. Stempflé, 2006, *Tribologie dans les transports, De l'analyse à l'échelle du contact à la fiabilité des systèmes mécaniques*, Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR)
- [7] www.meca.insa-toulouse.fr/~paredes/Ressorts/Generalites/Materiaux/materiaux.htm consulté en septembre 2014
- [8] www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html, consulté en janvier 2015
- [9] Dr Fritz Faulhager GMBH & CO.KG, edition 2012-2013, *Linear DC-Servomotors Technical Information*, www.faulhaber.com