

# Friction Modeling of a Linear Motor

Charlie Darricau

EPFL - MA1

Professeur : Prof. R. Longchamp

Collaborateur Scientifique : Dr. A Karimi

Assistant Doctorant : M. Butcher

2007

# Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>LE PROJET</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>LES FROTTEMENTS</b> .....	<b>4</b>
3.1	QUELQUES EXPLICATIONS SUR LES FROTTEMENTS .....	4
3.2	MODELES DE FROTTEMENT .....	5
3.3	MODELES DE FROTTEMENT DYNAMIQUES .....	5
<b>4</b>	<b>IDENTIFICATION DES PARAMETRES</b> .....	<b>7</b>
4.1	ETUDE PRECEDENTE .....	7
4.2	METHODE APPLIQUEE.....	7
4.3	APPLICATION A NOTRE MOTEUR .....	8
4.4	ACQUISITION DE DONNEES .....	9
4.5	UTILITE DU MODELE DYNAMIQUE.....	10
<b>5</b>	<b>PREPARATION A L'OPTIMISATION</b> .....	<b>12</b>
5.1	MODIFICATION DU MODELE SIMULINK.....	12
5.2	REGLAGES DE CERTAINES DONNEES .....	13
<b>6</b>	<b>OPTIMISATION</b> .....	<b>14</b>
6.1	METHODE.....	14
6.2	RESULTATS .....	14
<b>7</b>	<b>VALIDATION</b> .....	<b>15</b>
7.1	METHODE.....	15
7.2	RESULTATS .....	15
<b>8</b>	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>18</b>
<b>9</b>	<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>19</b>
	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>20</b>

## 1 Introduction

Dès qu'on parle de mouvement, automatiquement vient s'y ajouter la notion de frottement. C'est le cas pour tout système mécanique où il y a un déplacement entre deux objets (solide ou liquide). Les effets dus à ce phénomène peuvent être bénéfiques, comme pour l'adhérence des pneus, ou alors bien au contraire ils peuvent nuire aux performances d'un système, comme un moteur, en créant des erreurs de positionnement, des effets de stick-slip ou encore une surchauffe des parties en contact. Il est donc logique que l'on cherche à en diminuer les effets.

Dans cette optique, l'ingénieur doit pouvoir modéliser ce phénomène. Le modèle de Lund-Grenoble (LuGre) est l'un des modèles le plus complet. Le but de ce travail est d'identifier les paramètres dynamiques du modèle de LuGre d'un moteur.

Le moteur utilisé pour ce projet provient de chez ETEL, société fabriquant des moteurs linéaires de grande précision. Il est donc normal que ETEL soit intéressée à compenser les frottements présents dans ses systèmes de façon à obtenir une précision optimale.

Ce rapport va premièrement montrer différentes modélisation du frottement. La suite présentera la méthode employée pour l'identification des paramètres dynamiques ainsi que la validation de ces paramètres.

## 2 Le Projet

Ce projet se base sur un précédent projet [1], réalisé par Sébastien Thiery, qui a permis d'identifier les paramètres statiques et dynamiques du modèle de frottement de LuGre. Malheureusement, les résultats n'étaient pas assez satisfaisants pour les paramètres dynamiques.

Le projet actuel va donc tenter de déterminer de nouveaux paramètres dynamiques, en se basant sur les résultats trouvés par S. Thiery : on suppose que les paramètres statiques sont correctement identifiés, puisqu'il a été montré qu'ils sont répétables.

Pour y arriver, la méthode employée sera, dans un premier temps, de calculer la fonction de coût de l'erreur en position, puis d'utiliser une optimisation numérique non-linéaire pour diminuer la fonction de coût. Le tout sera réalisé à partir de Matlab et du modèle Simulink représentant le moteur ETEL. On suppose donc que le modèle Simulink du moteur le représente bien.

## 3 Les frottements

### 3.1 Quelques explications sur les frottements

Le frottement est une interaction de surface qui s'oppose au déplacement de deux surfaces en contact. Lors d'un contact solide-solide, on parle de frottement sec. Si un liquide est placé entre les deux surfaces (p. ex. un lubrifiant), on parle de frottement visqueux.

La variation de la vitesse de déplacement entraîne une variation de la force de frottement. Cet effet est connu sous le nom de celui qui l'a étudié : c'est l'effet Stribeck.

La courbe de Stribeck de la figure 1 modélise cet effet et montre quel est le type de frottement dominant en fonction de la vitesse de déplacement entre deux solides. On constate que lorsque la vitesse augmente, la force de frottement décroît jusqu'à un certain point et croît ensuite proportionnellement à la vitesse.

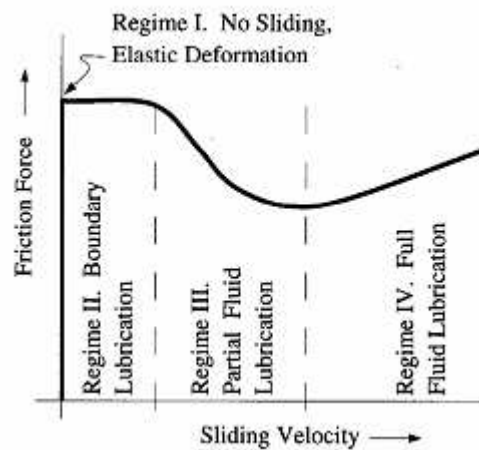


Fig. 1 - Courbe de Stribeck.

Voici les explications pour chaque zone de frottement :

- *Régime I* : la vitesse reste nulle car la force n'est pas assez grande pour qu'il y ait un déplacement. On est en zone de préglissement et il n'y a que des déformations plastiques.
- *Régime II* : la force étant suffisamment grande, les parties en contact commencent à bouger mais ce sont principalement les frottements secs qui dominent.
- *Régime III* : à partir d'une certaine vitesse, le lubrifiant commence à faire effet et les surfaces se décolent peu à peu, on est dans un frottement mixte. La force diminue alors jusqu'à un certain point.
- *Régime IV* : la vitesse augmente encore et le frottement devient visqueux. Le lubrifiant joue alors le rôle d'un frein et la force augmente avec la vitesse.

La vitesse pour laquelle la force est à son minimum est appelée la vitesse de Stribeck. Elle correspond à la vitesse optimale pour la lubrification appliquée.

### 3.2 Modèles de frottement

Pour ce qui est de la modélisation des frottements, il existe plusieurs modèles. Voici les plus courants, par ordre de complexité, selon les phénomènes pris en compte.

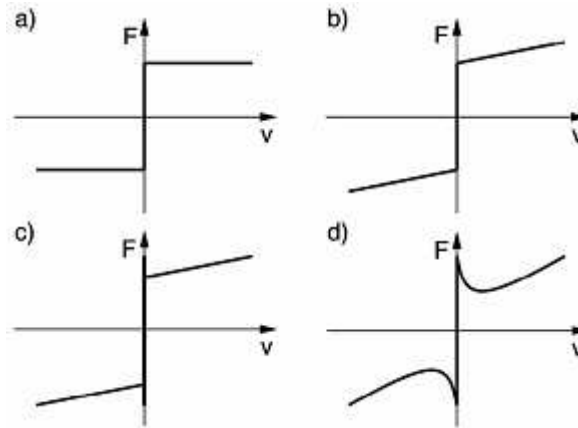


Fig. 2 - Différents modèles de frottement : a) modèle de Coulomb, b) modèle "Coulomb + visqueux", c) modèle "Coulomb + visqueux + statique", d) modèle complet avec effet Stribeck.

Au fil du temps, les recherches dans le domaine des frottements ont permis d'élaborer des modèles prenant en compte toujours plus de phénomènes. Cet ordre représente donc l'évolution des découvertes, chaque modèle étant un complément du modèle précédent.

### 3.3 Modèles de frottement dynamiques

Les modèles vus ci-dessus sont déjà satisfaisants selon les applications mais ce ne sont que des modèles quasi-statiques. En réalité des phénomènes dynamiques existent dans la zone de préglissement et il est nécessaire, afin de pouvoir prédire les effets du frottement, d'avoir un modèle plus performant, prenant en compte plus de phénomènes.

Dès lors, un des modèles les plus complets est le modèle de LuGre. Ce modèle est basé sur une approche microscopique de la modélisation des surfaces de contact par des lames. Dans cette hypothèse, chaque lame représente une aspérité de surface en contact avec une autre aspérité de l'autre surface. Ainsi, par la flexion des lames, on peut aussi modéliser la déformation plastique des surfaces avant leur déplacement. La figure 3 représente cette modélisation par lames.

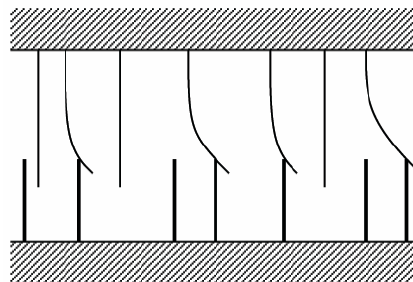


Fig. 3 - Modélisation des lames.

Avec ce modèle, on représente la déformation des lames par la variable  $z$ . La figure 4 montre cette déformation lorsque les surfaces se déplacent.

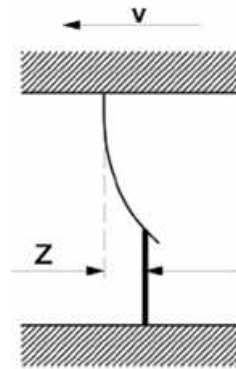


Fig. 4 - Déformation d'une lame.

Les équations mathématiques de ce modèle reposent sur la vitesse de déplacement des lames. On obtient donc l'équation suivante :

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma_0}{g(v)} z |v| \quad (1)$$

avec :

$$g(v) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(v/v_s)^2} \quad (2)$$

où  $v$  est la vitesse relatives de déplacement des surfaces,  $\sigma_0$  la rigidité des lames,  $F_c$  la force de Coulomb,  $F_s$  la force statique et  $v_s$  la vitesse de Stribeck. La force de frottement résultant du modèle de LuGre est donc :

$$F = \sigma_0 + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (3)$$

où  $\sigma_1$  est le coefficient d'amortissement et  $\sigma_2$  le coefficient de viscosité.

Dans son projet de fin de semestre, S. Thiery [1] a déterminé que la force de frottement n'augmente pas proportionnellement à la vitesse sans jamais s'arrêter. En fait, il y a un effet de saturation de la courbe force/vitesse. Ceci l'a amené à modifier légèrement le modèle de frottement de LuGre, ce qui nous donne :

$$F = \sigma_0 + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \sqrt[n]{|v|^n} \operatorname{sgn}(v) \quad (4)$$

Cette équation prend maintenant en compte la variable  $n$ , variable dépendant du lubrifiant utilisé. Selon Thiery, dans [1], il faut que  $0 < n < 1$  pour avoir un modèle se rapprochant des mesures.

## 4 Identification des paramètres

### 4.1 Etude précédente

Le projet mené par S. Thiery [1] avait identifié tous les paramètres du modèle de LuGre. La méthode employée pour déterminer les paramètres statiques était de réaliser des essais en régime permanent. Pour les paramètres dynamiques, la méthode était de linéariser le modèle de LuGre dans la zone de préglissement puis de réaliser des essais dans cette même zone.

Le modèle ainsi identifié avait été validé et la figure 5 montre le résultat de cette validation.

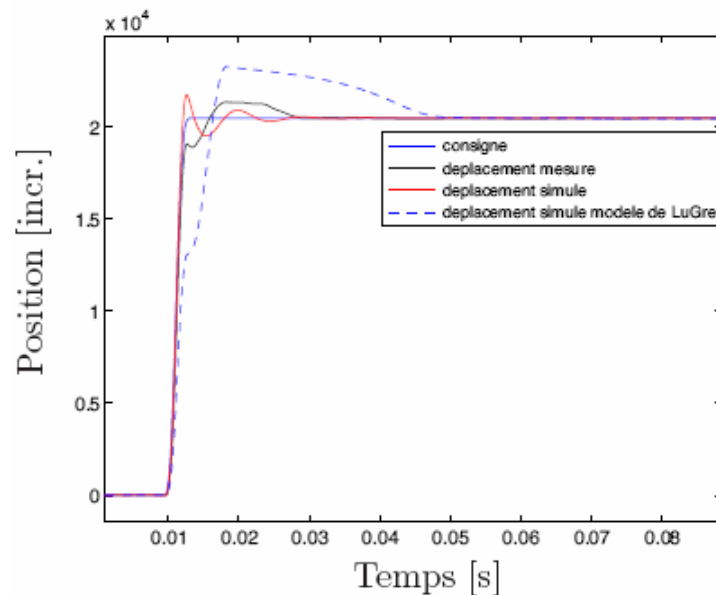


Fig. 5 - Validation du modèle trouvé par Thiery.

On peut constater que le résultat n'est pas très satisfaisant. On distingue cependant une certaine ressemblance entre le déplacement simulé avec son modèle de LuGre et le déplacement mesuré sur le moteur, à un facteur d'échelle près, ce qui laisse penser que les paramètres dynamiques identifiés ne sont pas trop loin de la réalité. Nous allons essayer de déterminer de nouveaux paramètres dynamiques à l'aide d'une autre méthode.

### 4.2 Méthode appliquée

L'approche tentée pour ce projet est de se dire que puisque les paramètres dynamiques précédemment trouvés ne sont pas totalement faux, nous allons essayer de les optimiser. A cet effet, la méthode qui va être employée est celle décrite par C. Canudas de Wit et P. Lischinsky dans [2], à savoir, minimiser la fonction de coût de l'erreur entre la position simulée et la position réelle à l'aide d'une optimisation numérique non-linéaire. L'équation d'une telle fonction est :

$$\hat{\sigma} = \arg \min_{\hat{\sigma}} E\{x, x_m; \hat{\sigma}\} = \arg \min_{\hat{\sigma}} \sum_{k=0}^N [x(k, \sigma) - x_m(k, \hat{\sigma})]^2 \quad (4)$$



où  $x$  représente la sortie mesurée et  $x_m$  la sortie simulée en fonction du groupe de paramètres dynamiques optimisés  $\hat{\sigma} = [\hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2]$ .

Dans leur travaux [2], C. Canudas de Wit et P. Lischinsky expliquent que pour avoir une bonne estimation des paramètres dynamiques  $\sigma_0$  et  $\sigma_1$ , il est important d'élaborer une expérience appropriée qui augmente les effets de ces paramètres. Il a été observé par des simulations que les mouvements stick-slip dus aux inversions de la vitesse sont très sensibles aux valeurs des paramètres dynamiques.

### 4.3 Application à notre moteur

Ainsi, pour l'identification de ces paramètres, nous travaillerons sur le moteur en boucle ouverte avec une entrée impliquant un mouvement stick-slip et des inversions de la vitesse. Il faut d'abord s'assurer que notre moteur suive le même comportement que le moteur utilisé dans [2], à savoir, pour une force appliquée sinusoïdale :

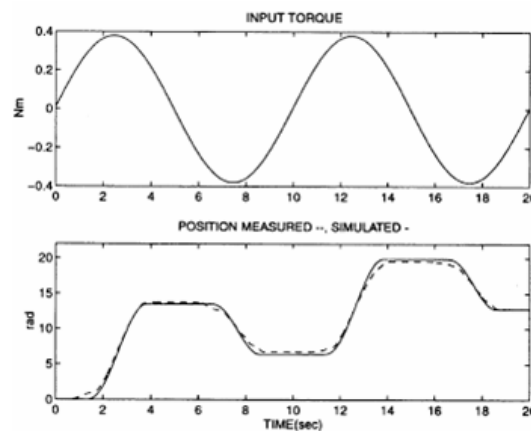


Fig. 6 - Comportement du moteur observé dans [2].

On peut observer un effet de stick-slip ainsi qu'un décalage en position au fil du temps. L'effet du décalage peut s'expliquer par le fait qu'à ce moment là le moteur devait encore se trouver en régime transitoire.

Nous réalisons à notre tour des essais avec différentes forces sinusoïdales sur le moteur de chez ETEL. Voici les comportements observés :

- 1<sup>er</sup> essai, avec une amplitude de 0,391 [N].

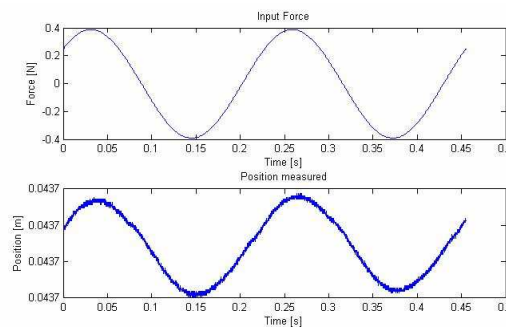
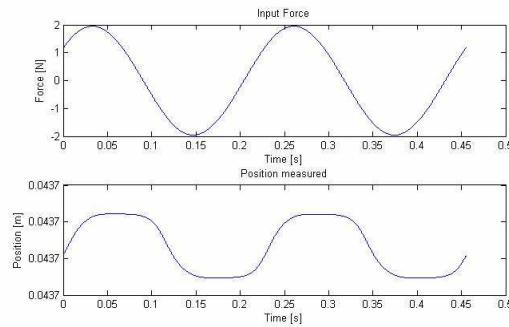


Fig. 7.1 - Comportement obtenu sur le moteur ETEL.

On observe ici un comportement du type zone de préglissement.

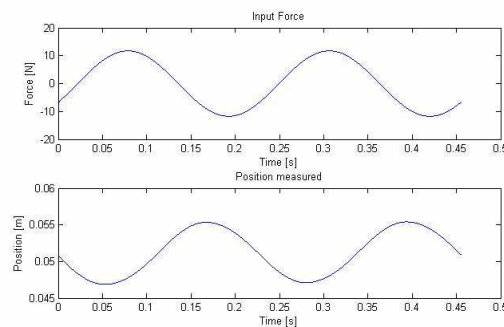
- 2<sup>ème</sup> essai, avec une amplitude de 1.955 [N].



**Fig. 7.2 - Comportement obtenu sur le moteur ETEL.**

On remarque bien l'effet de stick-slip.

- 3<sup>ème</sup> essai, avec une amplitude de 9,775 [N].



**Fig. 7.3 - Comportement obtenu sur le moteur ETEL.**

Ici on est entièrement en glissement. On remarque un déphasage de  $180^\circ$ , ce qui est normal puisqu'on a un système à double intégrateur.

On observe bien une similitude entre le 2<sup>ème</sup> essai et le comportement souhaité. Ainsi, pour l'acquisition de données, nous appliquerons une force sinusoïdale de 1,955 [N] d'amplitude.

#### 4.4 Acquisition de données

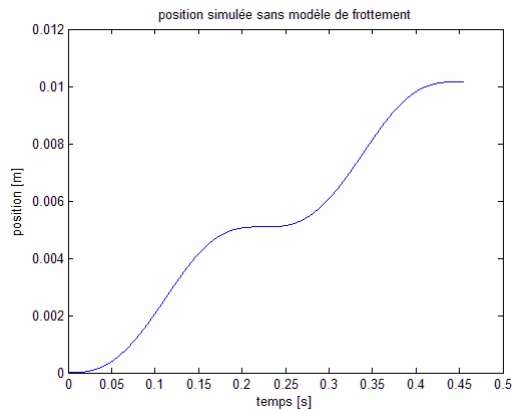
Pour une amplitude choisie, nous appliquons une force sinusoïdale au moteur. Nous mesurons son comportement en position, vitesse ainsi que la force appliquée, de façon à avoir des données synchronisées.

Ces données seront ensuite insérées dans le modèle Simulink et permettront de calculer l'écart entre les simulations et la réalité. L'écart servira ensuite pour le calcul de la fonction de coût.

### 4.5 Utilité du modèle dynamique

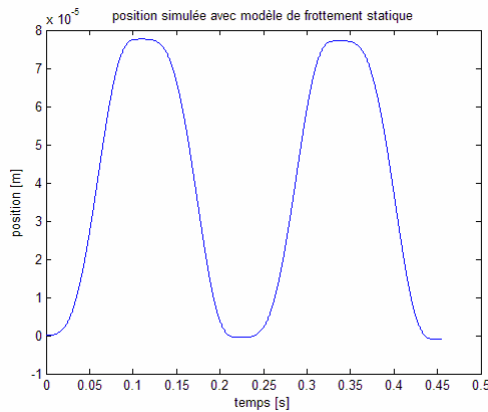
Avant de nous lancer dans des optimisations avec un modèle de frottement assez complexe et qui nécessite beaucoup de calculs, on peut se demander s'il apporte réellement une amélioration dans le comportement du moteur.

Pour le vérifier, nous simulons le comportement du moteur en réponse à notre entrée choisie. La première simulation est réalisée sans modèle de frottement, la seconde avec le modèle statique et la troisième avec le modèle dynamique de LuGre. Les résultats sont présentés dans les figures suivantes.

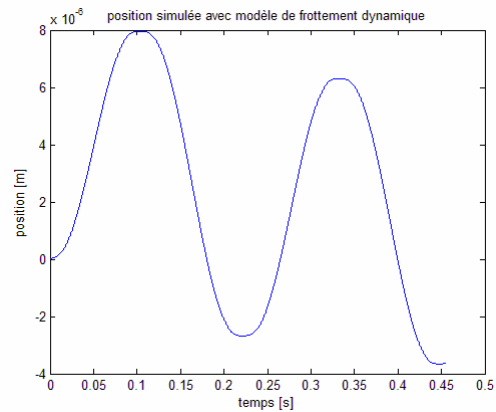


**Fig. 8.1 - Simulation sans modèle de frottement.**

On voit clairement sur la figure 8.1 que le comportement du moteur est aberrant et qu'on ne peut pas travailler sans modèle de frottements.



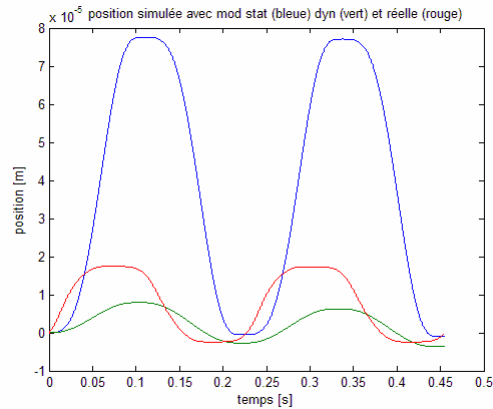
**Fig. 8.2 - Simulation avec modèle de frottement statique.**



**Fig. 8.3 - Simulation avec modèle de frottement dynamique.**

On observe sur les figures 8.2 et 8.3 un comportement assez similaire. Cependant les réponses ont une différence d'ordre de grandeur de 10.

On compare maintenant dans la figure 8.4 les réponses avec chaque modèle de frottement à la réponse mesurée.



**Fig. 8.4 - Simulation avec modèles de frottement et position réelle.**

Il paraît maintenant clair que le modèle statique ne suffit pas. Il ne prend pas assez de frottements en compte et lors de la simulation le déplacement est bien plus grand que la réalité. En revanche, le modèle dynamique est plus proche de la réalité et l'écart avec la position mesurée s'explique par le fait que les paramètres dynamiques ne sont pas assez bons, ce qui est justement le sujet de ce projet.

## 5 Préparation à l'optimisation

### 5.1 Modification du modèle Simulink

Le modèle Simulink fourni pour ce projet est celui utilisé par S. Thiery l'année dernière. Pour correspondre aux besoins de notre projet, il doit être légèrement modifié.

La première chose à faire est de couper la force de rétroaction et d'appliquer à la place la force mesurée sur le moteur. On peut voir sur la figure 9.1, dans la zone encadrée, la rétroaction coupée (en trait-tillé) et la force mesurée (force\_M30) qui la remplace.

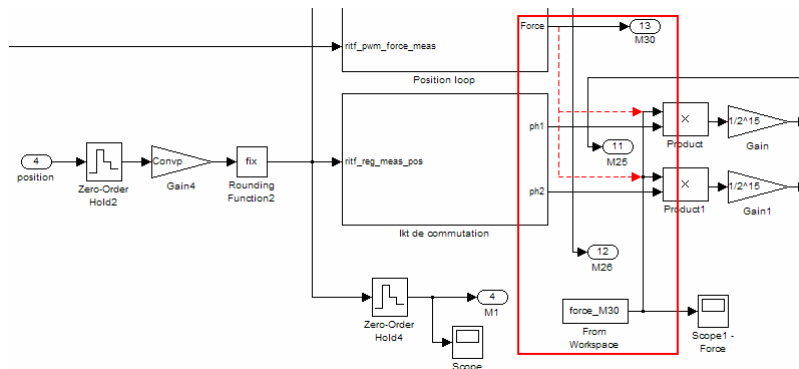


Fig. 9.1 - Modification dans le modèle Simulink.

Puis il faut rajouter un modèle dynamique au modèle de frottement déjà implanté, car ce n'est qu'un modèle statique. Sur la figure 9.2 on peut voir les paramètres dynamiques  $\sigma_0$  et  $\sigma_1$  ainsi que le bloc prenant en compte les effets dynamiques.

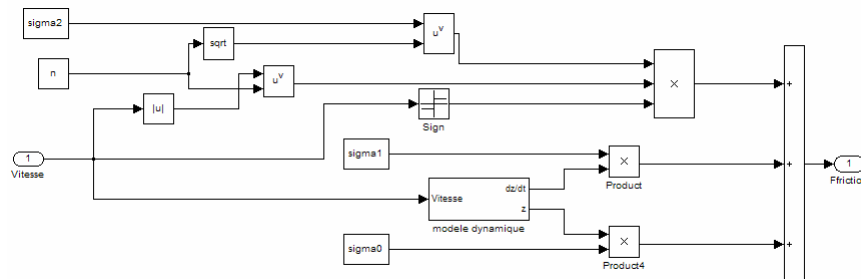


Fig. 9.2 - Modification dans le modèle Simulink.

Finalement, on rajoute à la sortie de quoi permettre le calcul de la fonction de coût. Sur la figure 9.3, l'erreur de position se mesure entre la position mesurée (position\_M1) et la position simulée. Puis, à partir de l'erreur, le coût est calculé.

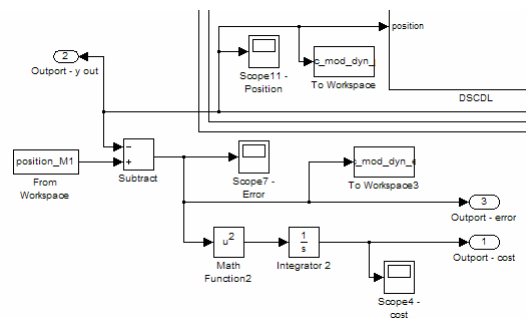


Fig. 9.3- Modification dans le modèle Simulink.

## 5.2 Réglages de certaines données

Avant de procéder à l'optimisation, il faut encore ajuster certains détails pour que les simulations soient au plus proches des mesures.

Lors des mesures, nous avons placé le moteur à une certaine position initiale pour être à un endroit où l'ondulation de force est nulle (voir [1], chap. 5), car pour les simulations, le modèle Simulink ne modélise pas ce phénomène. Il faut donc soustraire aux données de la position mesurée la valeur de la position initiale mesurée pour partir de zéro, car dans les simulations la position initiale est nulle. Il faut ensuite régler la vitesse initiale du modèle Simulink à la même vitesse initiale mesurée.

Lors de ses recherches [1], Thiery a trouvé deux valeurs très différentes pour  $\sigma_0$  :  $42,95 \cdot 10^3$  et  $32,85 \cdot 10^6$ . Etant donné que l'on va partir des paramètres trouvés par Thiery pour réaliser les optimisations, il faut d'abord choisir quel  $\sigma_0$  prendre.

Pour ce faire, on simule simplement le déplacement du moteur avec chaque  $\sigma_0$  et on regarde lequel donne une réponse proche de la réalité. La figure 10 montre le résultat de ces simulations, la première avec  $\sigma_0 = 42,95 \cdot 10^3$  et la seconde avec  $\sigma_0 = 32,85 \cdot 10^6$ .

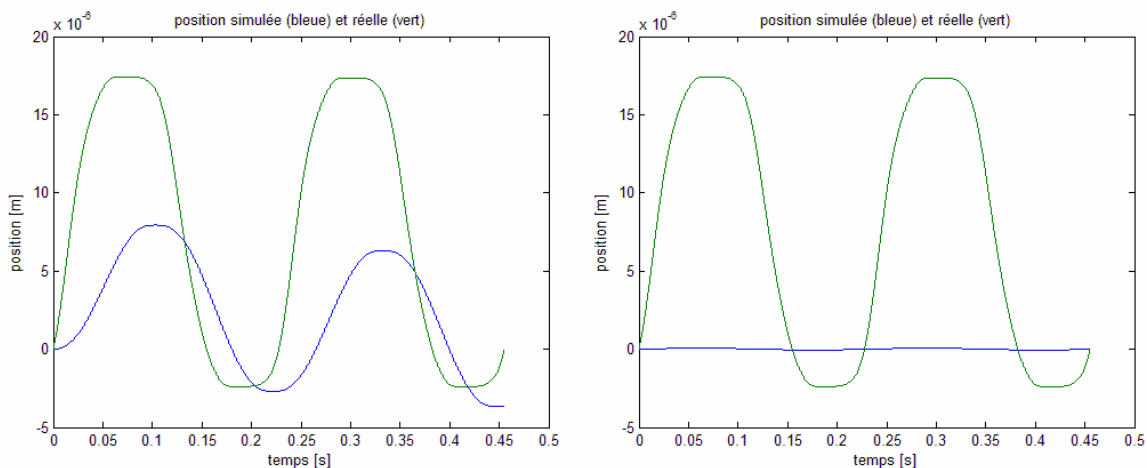


Fig. 10 - Positions simulées en fonction de  $\sigma_0$ , d'abord avec  $42,95 \cdot 10^3$  puis avec  $32,85 \cdot 10^6$ .

Il paraît évident que le meilleur  $\sigma_0$  est celui utilisé pour l'image de gauche,  $\sigma_0 = 42,95 \cdot 10^3$ . C'est donc logiquement que nous choisissons celui-là comme valeur initiale pour l'optimisation.

*Remarque* : la position simulée sur l'image de droite est en réalité 100 fois plus petite que celle de gauche.

## 6 Optimisation

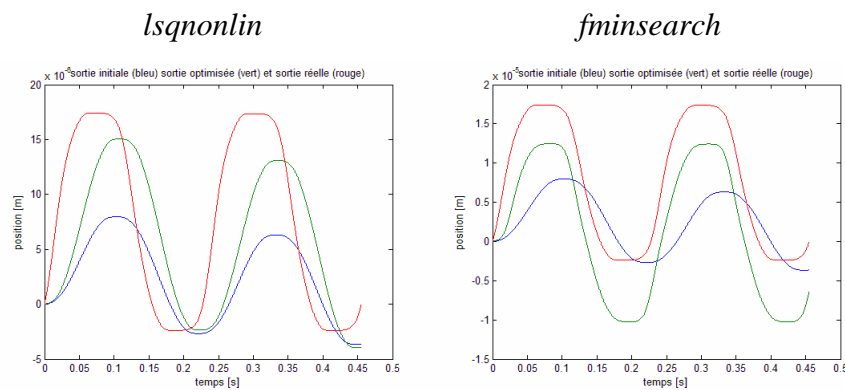
### 6.1 Méthode

Pour l'optimisation, on prend comme paramètres initiaux ceux trouvés par Thiery dans [1], c'est à dire  $\sigma_0 = 42,95 \cdot 10^3$  et  $\sigma_1 = 7098,4$ . On réalise les optimisations en utilisant les fonctions *lsqnonlin* et *fminsearch* de Matlab. Ensuite, on réalise encore une optimisation en mettant aussi les paramètres statiques comme variables.

### 6.2 Résultats

Voici les résultats obtenus pour chaque méthode. A chaque fois la figure contient la courbe de la position avant et après l'optimisation ainsi que la position mesurée sur le moteur.

- Méthode :



**Fig. 11.1 - Résultats de l'optimisation des paramètres dynamiques.**

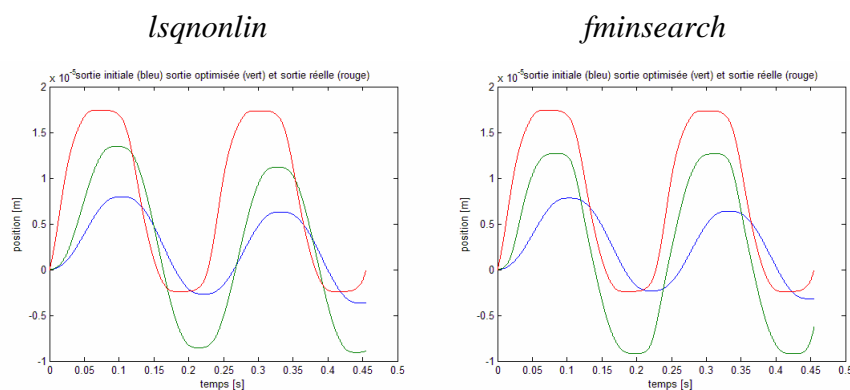
$$\sigma_0 = 10'331$$

$$\sigma_0 = 120'890$$

$$\sigma_1 = 3'383,3$$

$$\sigma_1 = - 634,9223$$

- Méthode, en optimisant tous les paramètres :



**Fig. 11.2 - Résultats de l'optimisation pour tous les paramètres.**

$$\sigma_0 = 55'254$$

$$\sigma_0 = 120'990$$

$$\sigma_1 = 2'118,2$$

$$\sigma_1 = - 631,7011$$

A noter que dans ce cas tous les paramètres étaient mis comme variables pour l'optimisation et que malgré cela, les paramètres statiques n'ont pas changé avec *lsqnonlin* et n'ont que très peu été modifié avec *fminsearch*.

## 7 Validation

### 7.1 Méthode

Pour valider nos résultats, il faut les tester dans un autre cas que celui qui a été utilisé pour l'optimisation. On va donc prendre comme consigne un saut indiciel et comparer le résultat simulé avec la réaction réelle du moteur. On réalise des essais pour deux consignes différentes :

- Un saut indiciel à  $5 \mu\text{m}$ .
- Un saut indiciel à  $25 \mu\text{m}$ .

Ces sauts sont d'abord appliqués sur le moteur de sorte que l'on mesure la consigne appliquée ainsi que le comportement en position. La consigne de position appliquée sur le moteur est ensuite utilisée comme consigne pour la simulation.

Pour chaque test on valide les résultats obtenus lors de l'optimisation des paramètres dynamiques et lors de l'optimisation avec tous les paramètres.

### 7.2 Résultats

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus pour le saut à  $5 \mu\text{m}$ .

- Avec les paramètres initiaux, pour visualiser l'écart initial :

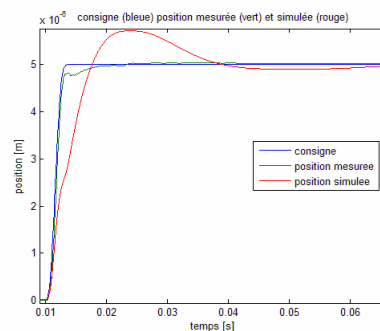


Fig. 92.1 – Validation : saut à  $5 \mu\text{m}$ .

On constate que la réponse simulée quitte assez tôt la réalité est fait un dépassement d'environ  $1 \mu\text{m}$ .

- Avec les paramètres obtenus par *lsqnonlin*.

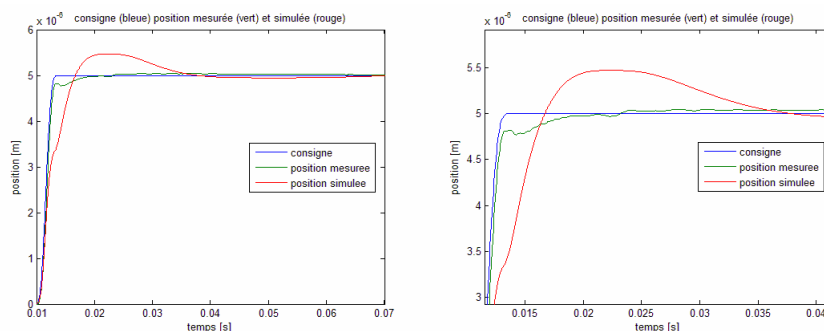


Fig. 12.2 – Validation : saut à  $5 \mu\text{m}$ .

La réponse n'est toujours pas très bonne mais on perçoit bien une amélioration au niveau du décoller et du dépassement par rapport aux paramètres initiaux.



- Avec les paramètres obtenus par *fminsearch*.

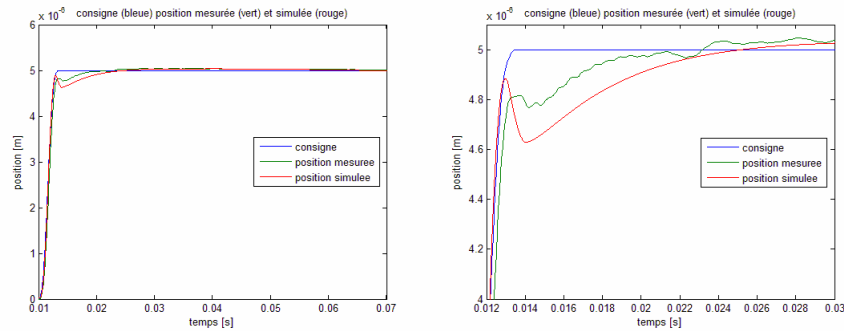


Fig. 12.3 – Validation : saut à 5  $\mu\text{m}$ .

On obtient là un très bon résultat. La simulation suit clairement, mais pas parfaitement, le comportement de la réponse mesurée.

- Avec les paramètres obtenus par *lsqnonlin*, en optimisant tous les paramètres.

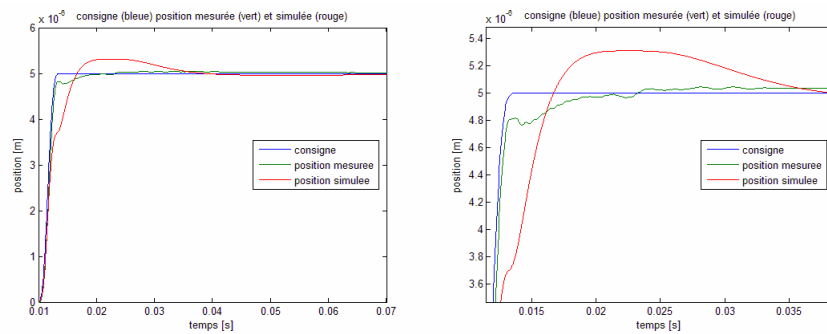


Fig. 12.4 – Validation : saut à 5  $\mu\text{m}$ .

Là encore, avec *lsqnonlin*, le résultat n'est pas très bon. Mais il est quand même légèrement meilleur que dans la figure 12.2.

- Avec les paramètres obtenus par *fminsearch*, en optimisant tous les paramètres.

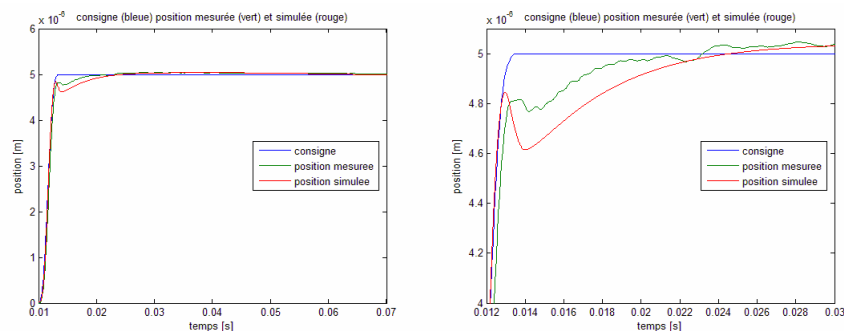


Fig. 12.5 - Validation : saut à 5  $\mu\text{m}$ .

De nouveau, on obtient une simulation très proche de la mesure, mais légèrement moins bien qu'à la figure 12.3.

Avec ce test, on peut dire que les paramètres identifiés avec *fminsearch* sont plutôt bons, puisqu'ils permettent de reproduire les mesures faites sur le moteur.

Nous allons maintenant valider les résultats avec le saut à 25 mm. Tous les résultats sont réunis sur la figure 13.

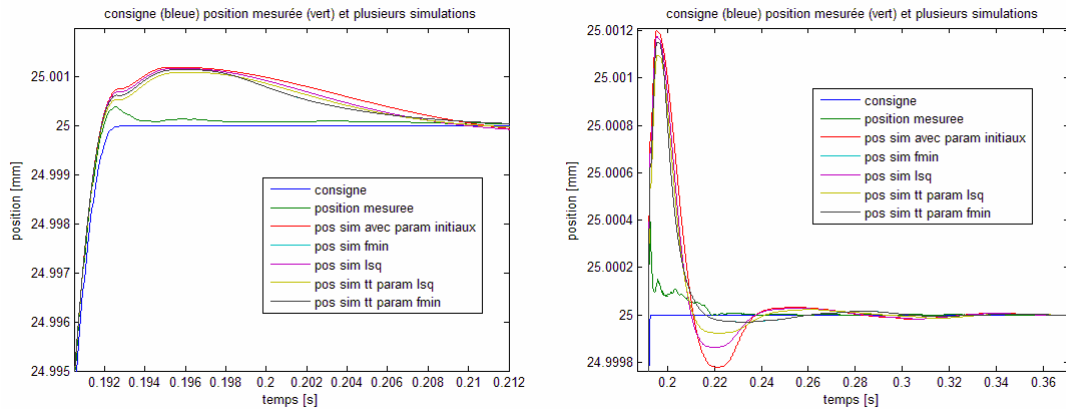


Fig. 13 - Validation : saut à 25 mm.

Le premier constat est que toutes les courbes sont similaires malgré des valeurs assez différentes pour les paramètres dynamiques. Ceci peut s'expliquer par le fait que le déplacement avec cette consigne est assez conséquent et que le mouvement se situe donc dans la zone de glissement. Dès lors, les paramètres dynamiques n'ont que peu d'influence sur le comportement du moteur car ce sont les paramètres statiques qui caractérisent le plus ce type de mouvement. On notera quand même, grâce à l'image de droite, que les simulations faites avec les paramètres trouvés à l'aide de *fminsearch* (bleu clair et noir, confondus sur l'image) donnent un meilleur amortissement que les autres.

La deuxième observation est que les courbes sont toutes similaires mais avec un écart à la position mesurée. Cela signifie que les paramètres statiques ne sont probablement pas tout à fait justes, même si on aurait pu croire avec les résultats vus au chapitre 6.2 que les paramètres statiques étaient bien identifiés, puisqu'ils ne changent pas ou très peu quand on les optimise. Mais lors de l'optimisation, à l'inverse de ce test, nous étions dans une zone de travail où ce sont les paramètres dynamiques qui influencent le plus le comportement du moteur, ce qui fait que nous ne pouvions pas encore dire si les paramètres statiques étaient parfaitement identifiés.

*Remarque* : même si les paramètres trouvés avec *fminsearch* produisent de bons résultats lors de la simulation, il faut remarquer que ce n'est physiquement pas justifiable car dans la fonction de transfert cela donnerait un pôle négatif.

## 8 Conclusion et perspectives

Les frottements constituent un sujet délicat que l'homme aimerait bien maîtriser. L'étude de ce phénomène a permis au fil du temps d'établir des modèles toujours plus performants. Nous comprenons bien tout l'intérêt que revêt l'identification correcte des paramètres dynamiques du modèle de LuGre pour une société comme ETEL produisant des moteurs qui travaillent au micromètre près.

Ce projet de semestre, sur la base d'un travail effectué l'année d'avant, avait pour objectif d'améliorer un modèle de frottement existant en optimisant ses paramètres dynamiques. Le modèle choisi était celui de LuGre car c'est un modèle dynamique qui prend en compte un maximum de phénomènes.

Lors de ce travail, deux approches ont été testées pour l'optimisation, une donnant de meilleurs résultats que l'autre. Les bons résultats nous permettent d'obtenir une simulation très proche de la réalité et confortent ainsi l'hypothèse que le modèle Simulink du moteur représente bien le comportement du moteur de chez ETEL.

Cependant nous avons pu constater lors de la validation que les paramètres statiques ne semblent pas être correctement identifiés. Il serait nécessaire de tester ces résultats sur le système réel en implémentant un modèle de compensation.

Dans les différents travaux restant à effectuer, le premier serait de refaire l'identification des paramètres statiques, étant donné que le moteur est maintenant sur une base qui le sépare des perturbations dues au contact avec le sol et que l'identification des paramètres statiques actuels avait été faite sans cette base.

Ensuite il serait envisageable de réaliser une optimisation des paramètres pour de plus grands déplacements faisant travailler le moteur en zone de glissement.

Finalement, ce travail a été très intéressant et nous avons pu constater que pour reproduire un comportement réel, la qualité de la modélisation dépend directement du choix du modèle de frottement. Même si cette modélisation est le fruit d'un travail compliqué, elle est indispensable car à la base de toute étude sur le sujet des frottements.

## 9 Remerciements

Je profite de ces quelques lignes pour remercier les personnes sans qui ce projet n'aurait pas pu aboutir : le Professeur Roland Longchamp et le Docteur Alizera Karimi pour leurs critiques et leurs conseils lors du suivi de ce projet, ainsi que la société ETEL pour la mise à disposition du matériel.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement Mark Butcher, l'assistant qui m'a suivi, pour m'avoir aidé, soutenu et remis sur la bonne voie à chaque fois que j'allais le voir.

Finalement, ce projet m'a permis de travailler dans un milieu de recherche où les gens n'hésitaient pas à prendre quelques minutes pour m'aider même s'ils avaient un emploi du temps encore plus chargé que le mien. La liste étant longue, je remercie ici tous ceux qui ont travaillé autour de moi.

Lausanne, le 15 Février 2007

Charlie DARRICAU

## Références

- [1] S. Thiery. *Modélisation et Compensation de Frottements dans un Moteur Linéaire*. Technical report, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2005.
- [2] C. Canudas de Wit et P. Lischinsky, *Adaptive Friction Compensation with partially known Dynamic Friction Model*, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 11: 65-80, 1997.
- [3] M. Kunze. *Modeling and Identification*, Chapter: Robust RST Controller Design for High Performance Positioning of Direct Drive Systems, Technical report, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2005.