

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

Université Aboubekr BELKAID  
TLEMCEM  
Faculté de Technologie



Département de Génie  
Electrique et Electronique  
Laboratoire d'Automatique de  
Tlemcen

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de  
**Magister**  
En Automatique

## **Etude et Commande d'un Moteur Synchrone Linéaire à Aimants**

Présenté par :

**KHOUANE Boulanouar**

Ingénieur en Automatique, UABT

Soutenu le / / 2012

Devant le jury composé de :

Président :	CHERKI Brahim	Professeur UABT, Tlemcen
Examineurs :	ZERIKAT Mokhtar	Maître de conférences –A– ENSET, Oran
	MEGHEBBAR Abdelmadjid	Maître de conférences –A– UABT, Tlemcen
	BOUMEDIENE Abdelmadjid	Maître de conférences –A– UABT, Tlemcen
Rapporteur :	BAGHLI.Lotfi	Maître de conférences –A– UABT, Tlemcen

Année universitaire 2012 / 2013

## *Remerciements*

Je tiens à remercier Monsieur B. CHERKI, Professeur à l'Université Aboubekr Belkaid, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Je remercie vivement Monsieur, A. MEGHEBBAR, Maître de conférences à l'Université Aboubekr Belkaid, Monsieur M. ZERIKAT, Maître de conférences à l'ENSET et Monsieur A. BOUMEDIENE Maître de conférences à l'Université Aboubekr Belkaid, pour avoir accepté d'examiner mon travail et pour l'intérêt qu'ils y ont porté.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur L. BAGHLI, Maître de conférences à l'Université Aboubekr Belkaid, pour avoir dirigé ce travail, pour son aide et ses précieux conseils ainsi que pour les nombreuses discussions que nous avons eues.

Mes profonds remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail, ainsi qu'à tous les étudiants de notre promotion.

Enfin, je remercie, tout particulièrement, mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.

<b>Introduction générale.....</b>	<b>8</b>
<b>Chapitre I : Etat de l’art des Moteurs Linéaires.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Introduction :.....</b>	<b>12</b>
<b>2. Structures et topologies des moteurs linéaires.....</b>	<b>13</b>
<b>3. Description du moteur synchrone linéaire.....</b>	<b>15</b>
<b>4. Les avantages et limites des moteurs linéaires.....</b>	<b>15</b>
<b>5. Domaines d’application .....</b>	<b>16</b>
5.1. Utilisation des moteurs linéaires dans les systèmes ferroviaires : .....	17
5.1.1. Train traditionnels avec roues .....	17
5.1.2. Système à lévitation magnétique (Maglev).....	17
<b>6. La recherche actuelle sur les moteurs linéaires.....</b>	<b>18</b>
<b>7. Conclusion.....</b>	<b>18</b>
<b>Chapitre II : Etude descriptive du moteur synchrone linéaire.....</b>	<b>19</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>20</b>
<b>2. Présentation du moteur synchrone linéaire utilisé.....</b>	<b>20</b>
<b>3. Description fonctionnelle du moteur synchrone linéaire.....</b>	<b>20</b>
<b>4. Commutation des séquences de la commande 6 secteurs .....</b>	<b>25</b>
<b>5. Réalisation de la commande .....</b>	<b>27</b>
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>27</b>
<b>Chapitre III : Modélisation et dimensionnement du Moteur Synchrone linéaire.....</b>	<b>28</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>29</b>
<b>2. Paramètres géométriques du mobile et du rail du prototype MSlinV3 .....</b>	<b>31</b>
<b>3. Calcul des forces .....</b>	<b>32</b>
3.1. Force électromagnétique de Laplace.....	32
3.1.1. Application numérique .....	32
3.2. La force Normale ( <b>Fz</b> ).....	33
3.3. La force de détente .....	33
3.3.1. Effets d’extrémités .....	34
3.3.2. Effets d’encoches ou de denture (Cogging).....	34
<b>4. Méthodes d’analyse numérique du moteur synchrone linéaire à aimant permanent .....</b>	<b>34</b>
4.1. L’outil de modélisation .....	35
4.2. Présentation du logiciel FEMM .....	36
4.3. Définition de la structure de l’actionneur sous FEMM.....	36
<b>5. Distribution de l’induction magnétique dans la structure .....</b>	<b>39</b>
<b>6. Représentation des forces .....</b>	<b>40</b>
6.1. Calcul de la force de détente .....	41
6.2. Calcul de l’induction magnétique .....	42
<b>7. Variation de la force tangentielle et normale pour différents matériaux utilisés.....</b>	<b>44</b>

<b>8. Présentation de la nouvelle structure du moteur linéaire employé dans notre étude (MSlinV4).....</b>	<b>47</b>
<b>9. Conclusion.....</b>	<b>52</b>
<b>Chapitre IV : Réalisation de la structure choisie (MSlinV4) .....</b>	<b>53</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>54</b>
<b>2. Mode de pilotage du MSlin.....</b>	<b>55</b>
2.1. Boucle de commande .....	55
<b>3. Régulateur PID:.....</b>	<b>57</b>
<b>4. Mesures de la position.....</b>	<b>58</b>
4.1. Mesure de la position basée sur les sondes à effet Hall .....	58
4.2. Estimateur de position .....	59
4.3. Mesure de la position à partir de l'accéléromètre .....	60
4.3.1. Principe de fonctionnement d'un accéléromètre MEMS .....	60
4.3.2. Les sources d'erreurs sur les mesures .....	61
4.3.3. Influence des pentes .....	62
4.4. Mesure de l'accéléromètre .....	62
<b>5. Filtre passe-bas .....</b>	<b>63</b>
5.1. Intégration des données de l'accéléromètre .....	66
5.1.1. Solution 1 .....	67
5.1.2. Solution 2 .....	67
5.1.3. Solution 3 .....	67
<b>6. Calcul de l'accélération sous Matlab.....</b>	<b>68</b>
6.1. Programmation des équations sous Matlab .....	68
6.2. Régulation et fonction de transfert .....	71
6.3. Méthode de discrétisation.....	72
<b>7. Méthode proposée pour la régulation de la position.....</b>	<b>72</b>
7.1. L'évolution de la position et du courant en boucle fermée .....	73
7.2. Réglage et choix du régulateur:.....	73
7.2.1. Simulation (1) : évolution de la position basée sur l'estimateur.....	74
7.2.2. Simulation (2) : évolution de la position basée sur la fusion de données .....	76
7.3. L'évolution de la position en boucle fermée calculée par FEMM .....	78
7.3.1. Simulation (1) : évolution de la position basée sur l'estimateur.....	78
7.3.2. Simulation (2) : évolution de la position basée sur la fusion de données .....	81
<b>8. Application expérimentale.....</b>	<b>83</b>
<b>9. Conclusion.....</b>	<b>85</b>
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>86</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>89</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>92</b>
<b>1. Annexe 1 : Paramètres du MSlinV3 .....</b>	<b>93</b>
<b>2. Annexe2 : Paramètres du MSlinV4.....</b>	<b>95</b>
<b>3. Annexe3.....</b>	<b>98</b>
<b>4. Annexe 4 : Description du dispositif expérimental .....</b>	<b>100</b>

<b>5. Annexe 5 :.....</b>	<b>103</b>
5.1. Routine de l'estimation de la position.....	103
5.2. Routine de l'étalonnage d'accéléromètres MEMS.....	103
5.3. Paramètres du modèle de MSlin simulé sous Matlab .....	103

## Liste des Figures

Figure 1. Géométrie linéaire plate, en U et tubulaire .....	13
Figure 2. Classement des moteurs linéaires selon leur géométrie.....	14
Figure 3. Schéma simplifié d'un stator court et d'un stator long .....	15
Figure 4. Maglev (Japon) [11].....	17
Figure 5. Transrapid synchrone à long stator EMS système(Allemagne) sustentation électromagnétique [11].....	17
Figure 6. Moteur synchrone linéaire (mobile et rail) .....	20
Figure 7. Effort normal et tangentiel dans un actionneur électromagnétique .....	21
Figure 8. Répartition des phases $a, b, c$ dans l'inducteur (partie mobile).....	22
Figure 9. Induction générée par les aimants le long du rail .....	22
Figure 10. Force contre électromotrice et courant dans chaque bobine.....	23
Figure 11. Structure de l'onduleur .....	24
Figure 12. Signal capteur à effet Hall de la variable Secteur .....	24
Figure 13. Branchement des trois phases avec l'onduleur (L6234).....	26
Figure 14. Forme générale de la structure choisie .....	30
Figure 15. Les paramètres de dimension du mobile.....	30
Figure 16. Les paramètres de dimension du rail .....	30
Figure 17. Induction générée par les aimants le long du rail [14].....	33
Figure 18. Présentation des phénomènes d'extrémités .....	34
Figure 19. Discrétisation par élément finis en deux dimensions.....	35
Figure 20. Structure du MSlinV3 définie sous FEMM.....	37
Figure 21. Détail du maillage de la structure du MSlinV3 sous FEMM .....	37
Figure 22. Détail du maillage près de l'entrefer.....	38
Figure 23. Structure des blocs de même matériaux du MSlinV3 sous FEMM.....	38
Figure 24. Champ magnétique de MSlinV3 sous FEMM.....	38
Figure 25. Calcul des forces sur les 4 positions du MSlinV3 .....	40
Figure 26. Force tangentielle en fonction de la position de MSlinV3 .....	40
Figure 27. Force normale en fonction de la position de MSlinV3.....	41
Figure 28. Force de détente en fonction de la position de MSlinV3.....	41
Figure 29. Induction magnétique au niveau du trois sondes effet Hall a, b, c en fonction de la position de MSlinV3 .....	42
Figure 30. Induction magnétique en fonction de la position sous FEMM.....	43
Figure 31. Parcours des lignes de champ .....	43
Figure 32. Force tangentielle en fonction de la position pour différentes configurations .....	44
Figure 33. Force de détente en fonction de la position pour différentes configurations.....	45
Figure 34. Force normale en fonction de la position pour différentes configurations .....	45
Figure 35. Induction magnétique au niveau des trois sondes à effet Hall a, b, c pour différentes configurations.....	46
Figure 36. Structure du MSlinV4 définie sous FEMM.....	47
Figure 37. Champ magnétique de MSlinV4 sous FEMM.....	48
Figure 38. Force tangentielle en fonction de la position pour différentes configurations .....	49
Figure 39. Force normale en fonction de la position pour différentes configurations .....	49
Figure 40. Induction magnétique au niveau du trois sondes à effet Hall a, b, c pour différentes configurations.....	50
Figure 41. Sortie des sondes à effet Hall et calcul du Secteur en fonction de la position.....	50
Figure 42. Force de détente en fonction de la position pour différentes configurations, à vide .....	51
Figure 43. Force normale en fonction de la position pour différentes configurations, à vide .	51

Figure 44. Prototype MSlinV4 sur son rail .....	54
Figure 45. Secteur en fonction de la position à l'aide de l'interface graphique (relevé expérimentale).....	55
Figure 46. Schéma fonctionnel de la boucle de commande .....	55
Figure 47. Relevé expérimental d'un essai en régulation de position, échelon de position de référence entre -130 et 130 mm.....	56
Figure 48. Interface graphique Commande dspic qui permet la communication avec le MSlin .....	57
Figure 49. Caractéristique de la position issue du secteur en fonction du temps.....	58
Figure 50. Position absolue, incrémentale et position estimée .....	60
Figure 51. Accéléromètre MEMS [19]    Figure 52. Accéléromètre 3 axes [7].....	61
Figure 53. Accélérations perçue par le MEMS [19] .....	62
Figure 54. Schéma du principe de traitement des informations de l'accéléromètre pour calculer la position .....	62
Figure 55. Mesure des accélérations avant et après calibrage au repos .....	63
Figure 56. Mesure des accélérations avant et après filtrage au repos .....	65
Figure 57. Mesure de l'accélération suivant l'axe de mouvement.....	65
Figure 58. La vitesse de mobile issue de l'accéléromètre au repos .....	66
Figure 59. Évolution de l'accélération (données gravitationnelles, données bruitées avec un offset et données filtrées) sur l'axe de déplacement en fonction du temps sous Matlab .....	69
Figure 60. Accélération sous Matlab.....	69
Figure 61. Position absolue et position estimée en fonction du déplacement du mobile sous Matlab (Zoom) .....	70
Figure 62. Estimation de la position intermédiaire (Zoom).....	70
Figure 63. Réponse de G(s) à un échelon (système continu).....	71
Figure 64. Boucle de régulation de la position <i>Pos</i> .....	73
Figure 65. Evolution de la position, échelon de position de référence de 100mm .....	74
Figure 66. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 100mm	74
Figure 67. Evolution de la position, échelon de position de référence de 500mm .....	75
Figure 68. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 500mm .....	75
Figure 69. Evolution de la position, échelon de position de référence de 100mm .....	76
Figure 70. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 100mm	77
Figure 71. Evolution de la position, échelon de position de référence de 500mm .....	77
Figure 72. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 500mm	77
Figure 73. Evolution de la position, échelon de position de référence de 500mm .....	78
Figure 74. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 500mm	79
Figure 75. Evolution de la force, échelon de position de référence de 500mm .....	79
Figure 76. Evolution de la l'accélération et de la vitesse, échelon de position de référence de 500mm.....	80
Figure 77. Evolution de la position, échelon de position de référence de 500mm .....	81
Figure 78. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 500mm	81
Figure 79. Evolution de la force, échelon de position de référence de 500mm .....	82
Figure 80. Evolution de l'accélération et de la vitesse, échelon de position de référence de 500mm.....	82
Figure 81. Relevé expérimental d'un essai en régulation de position basé sur un estimateur, échelon de position de référence 500 mm .....	83
Figure 82. Relevé expérimental d'un essai en régulation de position basé sur une fusion de données, échelon de position de référence 500 mm.....	84
Figure 83. Les paramètres de dimension du mobile.....	93

Figure 84. Les paramètres de dimension du rail .....	93
Figure 85. Partie mobile (MSlinv3) .....	94
Figure 86. Essieu porte roulement.....	95
Figure 87. Partie mobile (MSlinv3) .....	96
Figure 88. Essieu porte roulement.....	96
Figure 89. Rail (inducteur) .....	97
Figure 90. Vue générale du MSlinv4 .....	97
Figure 91. Le Programmeur USB du dspic : Pickit2.....	100
Figure 92. Interface graphique.....	100
Figure 93. Schéma électronique de la carte de MSlin.....	101
Figure 94. MSlin V4 : Détails de la carte électronique de commande et de .....	102

### ***Liste des Tableaux***

Tableau 1. Séquence pour la réalisation de la marche avant.....	25
Tableau 2. Séquence pour la réalisation de la marche arrière .....	25
Tableau 3. Liste des principales grandeurs géométriques du MSlin.....	31
Tableau 4. Matériaux utilisés dans différentes structures .....	44
Tableau 5. Perméabilités relatives pour chaque matériau .....	44

**Liste des Abréviations**

ADC	Analog to Digital Converter
BT	Blue Tooth
DSC	Digital Signal Controller
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development environment
IMU	Inertia Measurement Units
MEMS	MicroElectroMechanical Systems
MIPS	Million Instructions Per Second
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PID	Proportionnel Integral Derivative
PWM	Pulse Width Modulation
SPI	Serial Peripheral Interface
SPP	Serial Port Profile
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter

## *Introduction générale*

Le moteur électrique, dont la conception initiale date de la deuxième moitié du XIX siècle, a été envisagé initialement sous la forme linéaire puis, presque aussitôt, sous la forme tournante. Pour des raisons technologiques évidentes le moteur tournant a connu le développement que l'on sait [1].

Actuellement, les moteurs linéaires sont de plus en plus utilisés dans de nombreuses applications industrielles et ferroviaires. Sans système intermédiaire de transmission, le moteur linéaire permet de générer directement une force de poussée. Si l'on compare les moteurs linéaires aux systèmes mécaniques plus traditionnels, on peut mettre en évidence des avantages significatifs tels que : la réduction des masses, la dynamique élevée, l'absence de jeu de transmission (donc moins de frottement et de bruit), la grande précision, la longue durée de vie, la fiabilité accrue,...

Le fonctionnement d'un moteur linéaire synchrone repose simplement sur les lois physiques liées à la force de Laplace. Un courant est appliqué dans les enroulements successifs ce qui les attire (ou les repousse) vers les différentes polarités provoquées par les aimants permanents du stator. La force attirant (ou repoussant) la partie mobile se transforme donc en une force permettant le déplacement, nous parlerons alors de force de poussée du translateur [2].

De nos jours, les méthodes numériques de résolution par éléments finis sont de plus en plus utilisées du fait de l'accroissement de puissance des ordinateurs. En effet, ces méthodes permettent une représentation très fidèle de la distribution des champs et des courants à l'intérieur du moteur linéaire.

Le sujet qui nous a été confié s'intitule «Etude et Commande d'un Moteur Synchrone Linéaire à Aimants». Il s'agit d'étudier le dimensionnement et la commande embarquée d'un moteur synchrone linéaire à aimants baptisé **MSlin**. Cet actionneur, de la taille d'une quinzaine de centimètres, sera piloté par un microcontrôleur dsPIC [3] et alimenté via un onduleur triphasé embarqué [4]. Le niveau de tension sera de l'ordre de 15V avec un courant maximum de 2.5 A de manière à rester compatible avec les alimentations de TP. Une liaison Bluetooth permettra de piloter le mobile à distance via un PC et de rapatrier les courbes des grandeurs en fonction du temps. Cette possibilité nous permettra également de confronter les résultats de simulation et les résultats expérimentaux.

Les points que nous allons approfondir dans ce travail, par rapport à un travail qui a déjà été fait sur un précédent prototype (MSlinV3) concerne principalement trois objectifs :

- Modéliser le moteur synchrone linéaire à l'aide d'un logiciel d'analyse par la méthode des éléments finis. Cela permettra de calculer l'induction magnétique en tout point, la force normale, la force de traction et la force de détente et ainsi mettre en évidence les phénomènes perturbateurs.

- Dimensionner le nouveau moteur (MSlinV4) en étudiant plusieurs configurations de matériaux et de dimensions des dents de la partie mobile et des aimants de la partie fixe.
- Construire un nouvel estimateur de la position du mobile via différentes méthodes. Dans un premier temps, La résolution dépend du capteur Hall [5]. Dans ce cas, on utilise uniquement les sondes à effet Hall qui permettent de connaître la position de manière discrète avec une grossière résolution. Par la suite, nous allons utiliser un accéléromètre pour améliorer l'estimation de la position. Cette solution pose de nombreux problèmes que nous mettrons en évidence, expérimentalement et par simulation et que nous essayerons de résoudre.

Le présent mémoire est organisé comme suit :

Le chapitre 1 présente un historique des applications du moteur linéaire dans plusieurs domaines, puis nous établirons la liste des différents types de moteurs linéaires et leur domaine d'application, afin de réduire par la suite le champ d'étude au seul moteur linéaire synchrone à aimants permanents qui fait l'objet de notre étude.

Le deuxième chapitre traite de la stratégie de commande du moteur synchrone linéaire basée sur les sondes à effet Hall. Ces capteurs fournissent une information de position afin de synchroniser la commutation des interrupteurs de l'onduleur de puissance.

Dans le chapitre III, nous présentons une étude du moteur synchrone linéaire à l'aide de la méthode des éléments finis et du logiciel libre FEMM [6]. Après le dimensionnement du prototype, nous développerons un programme de simulation couplé à FEMM qui permet de simuler le fonctionnement du moteur en régime commandé (autopilotage à l'aide des sondes à effet Hall) et qui calcule les forces et l'induction magnétique au cours du déplacement du moteur.

Le chapitre IV, porte sur l'expérimentation du prototype MslinV4 dimensionné dans l'étude ainsi que sur les différentes méthodes d'estimation de la position. Dans un premier temps, on a utilisé uniquement les sondes à effet Hall, puis on a utilisé un accéléromètre MEMS [7] qui permet de mesurer l'accélération absolue du mobile. On obtient la vitesse et la position par intégrations. Des problèmes de calibrage, de filtrage, de fusion de données sont mis en exergue et une comparaison avec une étude par simulation sous Matlab et FEMM permet de donner des éléments de réponse à ces problèmes.

Le mémoire se termine par une conclusion et des perspectives à ce travail.

Les annexes regroupent les paramètres des moteurs linéaires étudiés, une présentation des organes de la carte de commande du MSlin et des extraits de programmes de simulation (Matlab/FEMM) et de commande embarquée (C pour dspic / MPLAB).

# *Chapitre I*

*Etat de l'art des  
Moteurs Linéaires*

## 1. Introduction :

L'entraînement électromécanique direct représente la simplification ultime des systèmes de conversion électromécanique d'énergie puisqu'il permet de supprimer les organes de transmissions mécaniques : réducteurs, multiplicateurs, transformation de mouvement de rotation et mouvement linéaires [8].

Le moteur linéaire est dit à entraînement linéaire direct, c'est à dire qu'il n'y a aucune pièce pour convertir un mouvement d'une autre nature (rotatif par exemple) en mouvement linéaire. Le mouvement et l'effort sont directement appliqués au niveau de la charge, alors que les autres entraînements linéaires sont effectués sur la base d'un mouvement rotatif transformé en mouvement linéaire. Pour le second mode, il reste très employé actuellement et nécessite un organe mécanique entre le moteur et sa charge.

Le moteur linéaire est depuis longtemps utilisé dans l'industrie, aussi bien sur les grosses machines-outils que sur les petits équipements de fabrication de semi-conducteurs. Il s'impose lorsqu'une grande précision et /ou une grande vitesse sont nécessaires.

Jusqu'à présent, les différents types de systèmes linéaires conventionnels étaient actionnés par servomoteurs rotatifs. Le mouvement rotatif était transformé en mouvement linéaire à l'aide d'engrenages de crémaillères de courroies ou de vis à billes, ceux-ci sont utilisés sans aucun problème dans de multiples applications. Dans d'autres applications ces systèmes atteignent souvent leurs limites techniques en termes de dynamique et de précision.

Il y a deux types de base de moteurs linéaires : ceux à accélération faible et ceux à accélération rapide. Les moteurs linéaires à faible accélération sont généralement utilisés pour les applications dans lesquelles l'endurance (ou la résistance) est favorisée par rapport à la puissance ou l'énergie. Ces types de moteurs linéaires sont conçus pour le transport (trains à lévitation magnétique) et les systèmes automatisés.

Les moteurs linéaires à accélération rapide ce sont des moteurs qui peuvent produire des vitesses plus élevées pour des courtes périodes de temps, tels que ceux utilisés dans les équipements militaires (torpilles, lanceur...), des engins spatiaux de propulsion, etc.

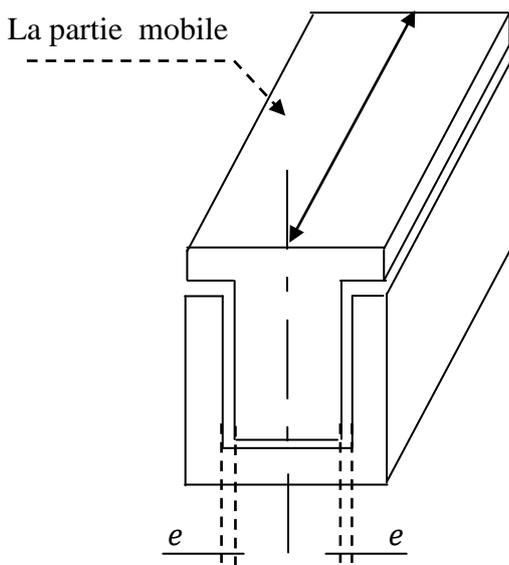
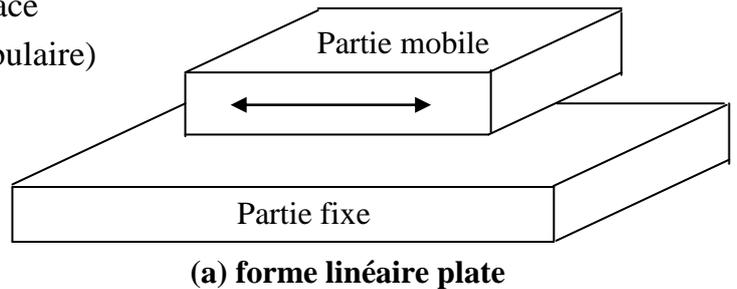
Dans notre étude, on s'intéresse à un moteur synchrone linéaire à aimants permanents (structure ouverte), à un seul primaire court, dont un premier prototype a été mis à notre disposition par notre encadrant. Le détail de la géométrie de ce moteur se trouve en annexe.

## 2. Structures et topologies des moteurs linéaires

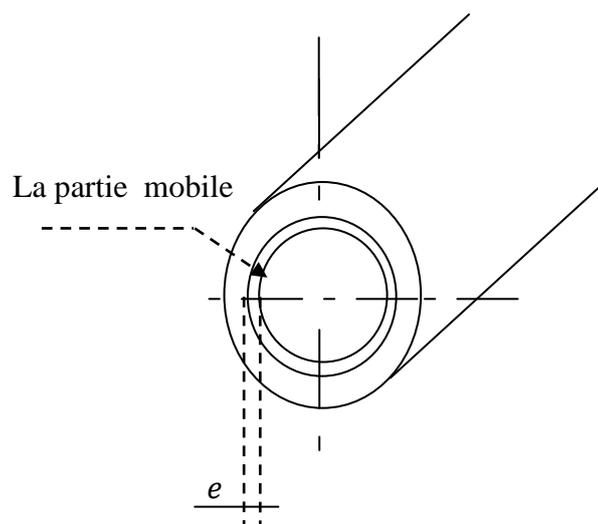
Les moteurs linéaires sont caractérisés par plusieurs topologies avec des géométries de type plat, forme U ou tubulaire. Ces différentes variantes offrent une multitude de possibilités pour effectuer un mouvement linéaire (Figure 1).

Il existe différentes structures des moteurs linéaires synchrones à aimants permanents qui peuvent se classer en trois grands groupes :

- Mono latéral sous forme plate
- Bilatéral en forme de U, double face
- Cylindrique en forme de tube (tubulaire)



(b) forme en U et T



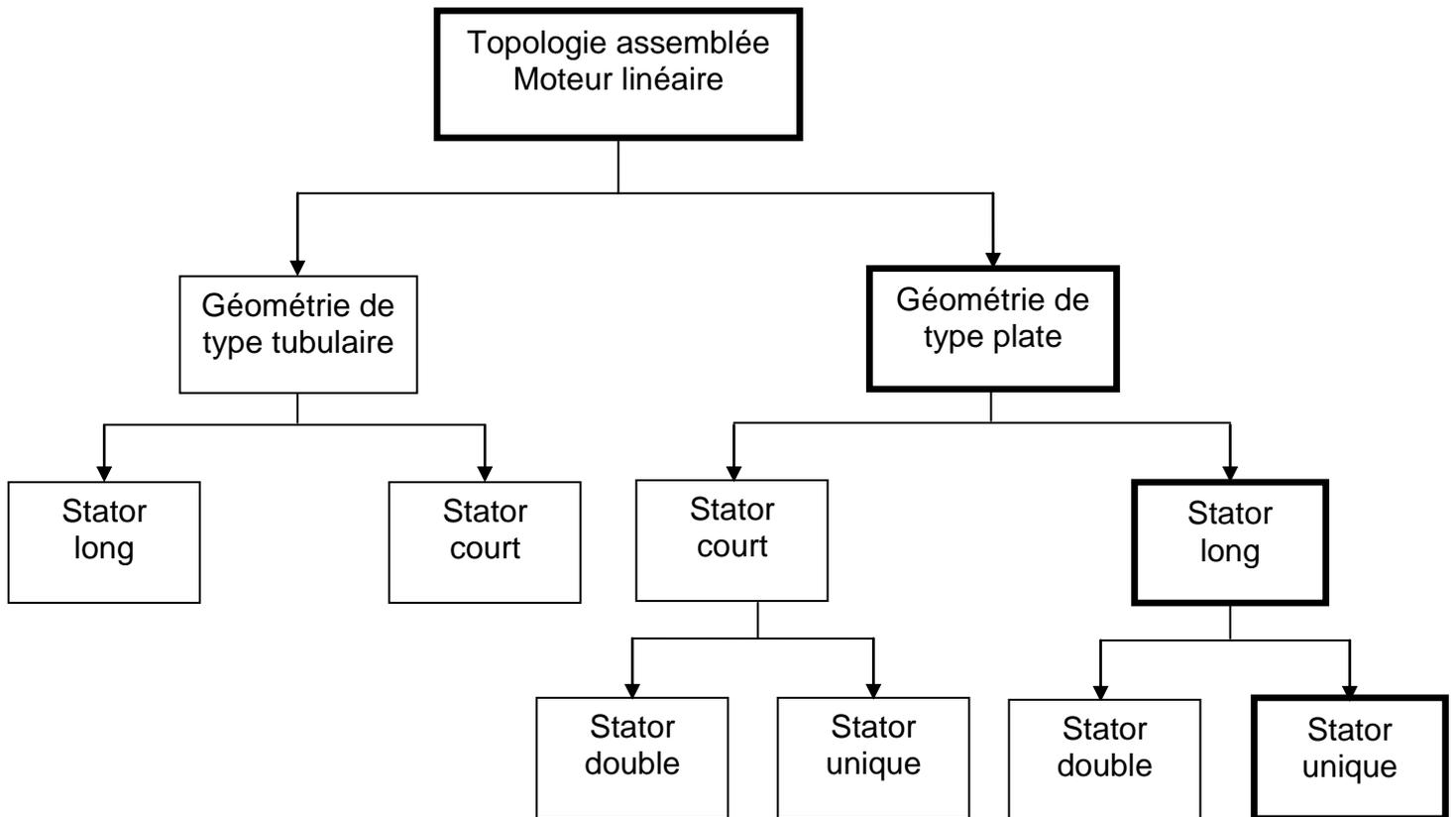
(c) forme tubulaire

**Figure 1. Géométrie linéaire plate, en U et tubulaire**

Si la surface active d'entrefer est plane et unique, les efforts normaux (non productifs du mouvement attendu) sont loin d'être négligeables et créent des contraintes très fortes sur les guidages. Lorsque cela est possible, on essaie de réduire ces efforts en adoptant des structures symétriques, par exemple, avec des stators en forme de U (figure b) ou encore tubulaires (figure c). Les efforts normaux ont alors une résultante nulle si le centrage est parfait (comme dans les machines tournantes cylindriques), mais l'équilibre obtenu est instable et il subsiste toujours un effort résiduel de décentrement. Il est donc nécessaire de réaliser un guidage mécanique très précis.

Généralement, celui-ci est déporté et lié à la charge entraînée. Ce guidage devra avoir avec un coefficient de frottement aussi faible que possible, surtout dans les applications où la masse embarquée est grande.

À chaque type de moteur linéaire correspond un type de moteur rotatif. Cela permet d'avoir le même classement que les moteurs rotatifs. Les moteurs linéaires peuvent aussi être classés suivant leur géométrie.



**Figure 2. Classement des moteurs linéaires selon leur géométrie**

La Figure 2 présente le classement des moteurs linéaires selon leur géométrie [9]. Nous nous limiterons pour la suite de ce chapitre, à la description du moteur linéaire synchrone à aimants permanents (**P**ermanent **M**agnet **L**inear **S**ynchronous **M**otor ou PMLSM).

Le fonctionnement d'un moteur linéaire synchrone se base sur les mêmes principes électromagnétiques qu'un moteur rotatif. Les principaux éléments, bobines et aimants sont simplement arrangés de manière à produire une force et non un couple.

Du point de vue technologique, deux configurations sont possibles :

- Un inducteur court et un induit long
- Un inducteur long et un induit court

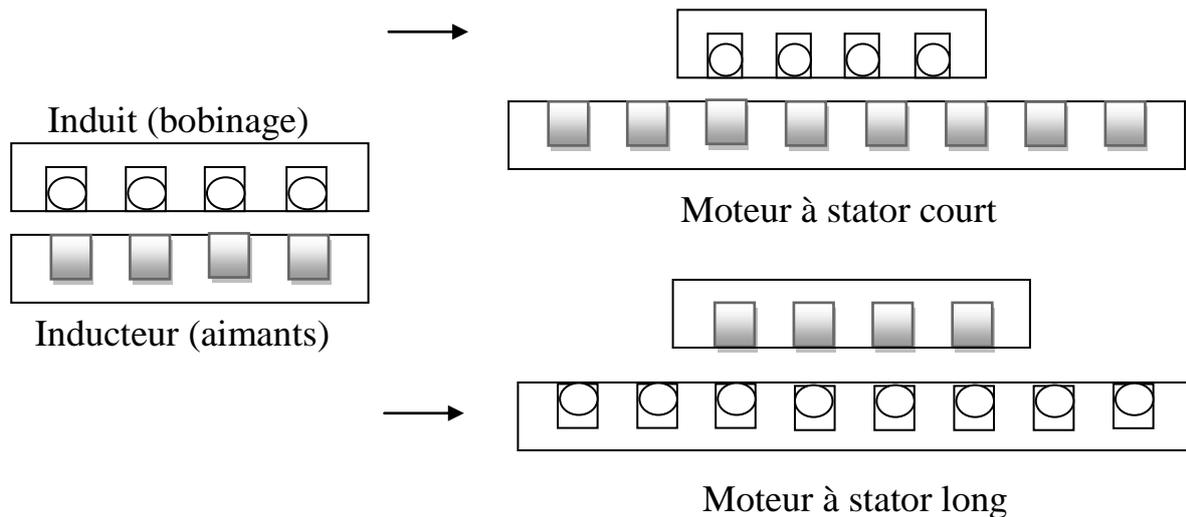


Figure 3. Schéma simplifié d'un stator court et d'un stator long

### 3. Description du moteur synchrone linéaire

Un moteur linéaire est essentiellement un moteur électrique qui a été déroulé de sorte qu'au lieu de produire un couple (rotation), il produit une force linéaire sur toute sa longueur.

Grâce à l'interaction électromagnétique entre un ensemble de bobines (partie mobile) et les aimants permanents (rail), l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique linéaire avec un certain niveau de rendement.

Il se compose de deux parties essentielles, l'inducteur et l'induit (ou primaire et secondaire). L'une de ces parties peut se déplacer sous l'effet de la force d'interaction des champs magnétiques (inducteur-induit) tandis que l'autre reste bloquée.

- L'induit est réalisé avec des tôles ferromagnétiques et incorpore le bobinage.
- L'inducteur se présente sous la forme d'une règle qui comporte des aimants pour un moteur linéaire synchrone.

### 4. Les avantages et limites des moteurs linéaires

L'avantage principal de tout moteur linéaire est qu'il élimine le besoin d'éléments de transmission tels que des supports, des vis à billes, des pignons, des courroies et des poulies. Dans le cas d'un train à lévitation magnétique par exemple, il n'y a aucun contact avec les pièces en mouvement. Il n'y a donc aucune usure mécanique, ce qui engendre une excellente fiabilité et une longue durée de vie. La réduction du nombre de composants mécaniques minimise la maintenance et réduit le coût du système. La technologie de l'entraînement directe propre aux systèmes basés sur des moteurs linéaires assure un ensemble efficace et performant. De cette façon, la complexité du système mécanique est considérablement réduite.

En se limitant à des critères principalement techniques, l'attrait pour l'entraînement linéaire direct s'explique aisément par les avantages apportés par la technologie. Ces avantages sont :

- Grande dynamique de mouvement (vitesse maximale ou accélération)
- L'absence de jeu entre les éléments d'entraînement permet un positionnement de très haute précision ou résolution de positionnement.
- Accroissement de la durée de vie, grande fiabilité.
- Réduction du nombre de composants pour réaliser un axe motorisé
- Flexibilité et souplesse avec, entre autres, la possibilité de monter plusieurs parties mobiles indépendantes sur un seul axe.

Techniquement toujours, les principales limites sont les suivantes :

- Le moteur linéaire placé à proximité de la charge peut nuire au processus : échauffement, aimantation de copaux sur la partie magnétique, environnement agressif. Dans ces cas, l'entraînement indirect est technologiquement plus adapté.
- Le coût d'un moteur linéaire synchrone à aimants permanents est étroitement lié au marché des aimants permanents
- Par contre, il existe un inconvénient majeur à la technologie Néodyme-Fer-Bore Un échauffement limité ( $<150^{\circ}\text{C}$ ) dans les moteurs linéaires est prévu lors de leur conception.

Nous avons volontairement ciblé les avantages et les limites sur un plan technique car l'entraînement direct linéaire n'a pas encore atteint une expansion industrielle importante, ainsi les critères de coûts lui sont encore défavorables par rapport à l'entraînement indirect.

## 5. Domaines d'application

Les moteurs linéaires sont principalement dédiés aux applications très variées dans plusieurs domaines principalement pour dépasser les limites des moteurs tournants associés aux systèmes de transformation de mouvement ou pour des applications hautement dynamiques, de grande précision de positionnement :

- La traction ferroviaire : Transrapid (Allemagne) et Maglev (Japon)
- Les applications machines-outils, orientées.
- Les applications pilotées au moyen d'un PC.
- Le semi-conducteur et le circuit imprimé (montage et contrôle final de composants en microélectronique), la machine textile, la manutention, l'emballage, les machines de coupe au laser, les lecteurs de disque dur, la domotique.
- Les techniques médicales.

## 5.1. Utilisation des moteurs linéaires dans les systèmes ferroviaires :

La technique ferroviaire a connu, au cours des ces quinze dernières années, une évolution considérable qui a permis de donner au chemin de fer une nouvelle jeunesse. Il existe depuis longtemps des applications avec des moteurs linéaires dans le domaine ferroviaire. Les moteurs linéaires se sont développés grâce à leurs capacités à générer des systèmes de lévitation, mais aussi pour leurs capacités de traction. Un moteur linéaire permet de générer directement une force de poussée sans aucun système intermédiaire de transformation de l'énergie de rotation en énergie de translation. Le premier brevet du moteur linéaire pour un train a été proposé par un inventeur allemand, Alfred Zehden, aux Etats-Unis en 1902 [10]. A l'heure actuelle, les applications du moteur linéaire pour le ferroviaire peuvent être divisées principalement en deux catégories : les trains traditionnels avec des roues et les trains sans roues qui utilisent la technologie de la lévitation magnétique (Maglev).

### 5.1.1. *Train traditionnels avec roues*

Ce type d'application utilise des roues et des rails traditionnels. Le train est propulsé par des forces magnétique provenant de courant induit dans une bande conductrice située entres les rails.

### 5.1.2. *Système à lévitation magnétique (Maglev)*

Le Maglev est un système de transport qui suspend, guide et propulse le train. Tandis qu'un train conventionnel est propulse à l'aide de frottement entre les roues et les rails, les Maglev utilise la lévitation sur la voie de guidage et se propulse grâce à un moteur linéaire.



Figure 4. Maglev (Japon) [11]



Figure 5. Transrapid synchrone à long stator EMS système(Allemagne) sustentation électromagnétique [11]

## 6. La recherche actuelle sur les moteurs linéaires

Depuis les années 1960 [10], le Japon est le pays le plus innovateur dans le domaine des moteurs linéaires, notamment grâce aux financements investis dans la recherche via les études menées sur le MAGLEV.

D'autres projets, notamment de transport, ont été arrêtés (Swissmetro) à cause du coût prohibitif de l'infrastructure et de la non compatibilité de la ligne avec celles déjà installées, ce qui n'est pas le cas du concurrent direct, le TGV, même si le coût à l'entretien est nettement moindre que celui d'une ligne à grande vitesse de type TGV.

Les progrès du moteur linéaire se font sur les applications à faible course et le positionnement.

Les études actuelles au Japon concernent surtout :

- Les systèmes motorisés multidirectionnels,
- Les méthodes d'analyse systématique de systèmes à moteurs linéaires,
- Les méthodes de mesure et d'évaluation des moteurs industriels,
- La promotion des moteurs linéaires dans l'industrie médicale (IRM).

Actuellement, les activités de recherche pour les moteurs linéaires s'articulent autour des axes suivants :

- Commandes permettant de réduire les perturbations extérieures.
- Commandes limitant les variations des paramètres (évolution et répartition de la masse, etc.)
- Commande et structures de machines réduisant les effets d'ondulation de force et de force de détente.
- Commandes et optimisations de la force de poussée du moteur linéaire.

## 7. Conclusion

Aujourd'hui, les moteurs linéaires sont largement utilisés dans l'industrie, les systèmes de traction et dans les équipements militaires, en raison de leur taille compacte, leur commandabilité et leur efficacité. Les avantages et les limites des moteurs linéaires ont été présentés dans cette partie, la recherche actuelle et future a ensuite été abordée. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons au moteur linéaire synchrone à aimants permanent mono latéral à primaire court, que nous appellerons "moteur synchrone linéaire".

## *Chapitre II*

*Etude descriptive du moteur synchrone  
linéaire*

## 1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation technologique de notre moteur linéaire synchrone à aimants, sa constitution et son mode de fonctionnement d'une part, et d'autre part, à un rappel de la technique de commande qui nécessite la connaissance de la position relative du bobinage par rapport aux aimants.

## 2. Présentation du moteur synchrone linéaire utilisé

Le prototype initial fournit pour cette étude est un moteur synchrone linéaire à aimants permanent (MSlin V3). Il est constitué d'un mobile (induit) comportant un bobinage triphasé à une paire de pôle, une encoche par pôle et par phase et d'un support de rail en plexiglas avec des aimants en NFeB (Néodyme-Fer-Bore) plats collé à sa surface. Cet actionneur, de la taille d'une quinzaine de centimètres est piloté par un Digital Signal Controller (DSC) de marque dsPIC [3] et alimenté via un onduleur triphasé embarqué L6234 [4]. L'autopilotage du moteur synchrone linéaire ou commande six secteurs nécessite la connaissance de la position relative du bobinage par rapport aux aimants. Cela est souvent réalisé par 3 sondes à effet Hall placées comme indiqué sur la Figure 6; sonde effet Hall : c'est une sonde qui permet une mesure locale du champ magnétique  $B$ .

## 3. Description fonctionnelle du moteur synchrone linéaire

Pour expliquer simplement le fonctionnement d'un moteur linéaire synchrone à aimant permanent (MSlinv3), nous pouvons préciser qu'il est essentiellement composé de deux éléments principaux (Figure 6) :

- Une partie fixe (le rail), composée d'une série d'aimants permanents à polarités alternées, c'est l'inducteur
- Une partie mobile composée du bobinage (induit) et trois capteurs magnétiques à effet Hall. Ces capteurs permettent de connaître à chaque instant la position du mobile par rapport au rail.

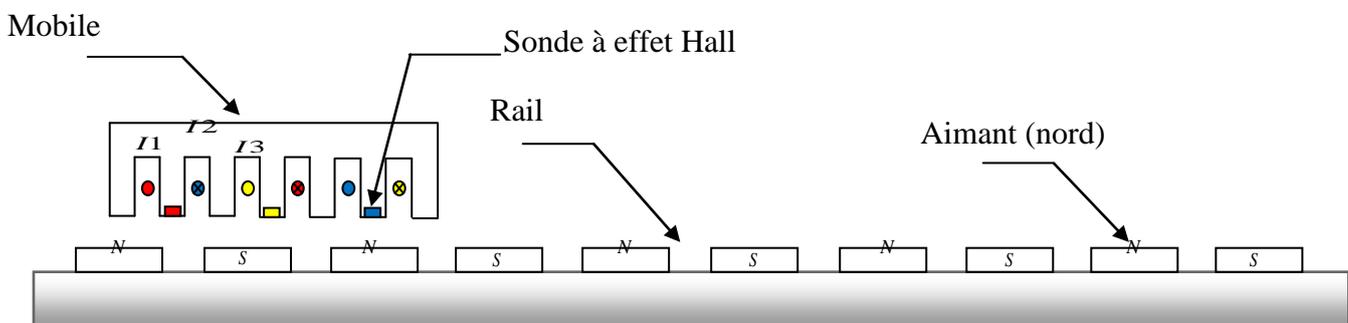


Figure 6. Moteur synchrone linéaire (mobile et rail)

Puisque le moteur linéaire synchrone suit le même principe que le moteur rotatif, nous retrouvons aussi les mêmes caractéristiques. Il y a cependant quelques petites différences.

Le couple devient une poussée linéaire (force tangentielle) et la vitesse de rotation devient une vitesse linéaire. Outre la force tangentielle  $F_x$  il faut tenir compte de l'attraction (la force normale  $F_z$ ) qui s'exerce entre l'inducteur et l'induit. En effet, les bobines jouent aussi le rôle d'électroaimant collant le mobile au rail.

De manière simplifiée, on peut décomposer les efforts électromagnétiques en deux catégories (Figure 7):

- Les efforts tangentiels, dans le sens du déplacement, sont les efforts utiles.
- Les efforts normaux, perpendiculaires au déplacement, sont des efforts parasites. Dans une structure à aimants, ceux-ci sont dus essentiellement aux aimants et aux dimensions du mobile.

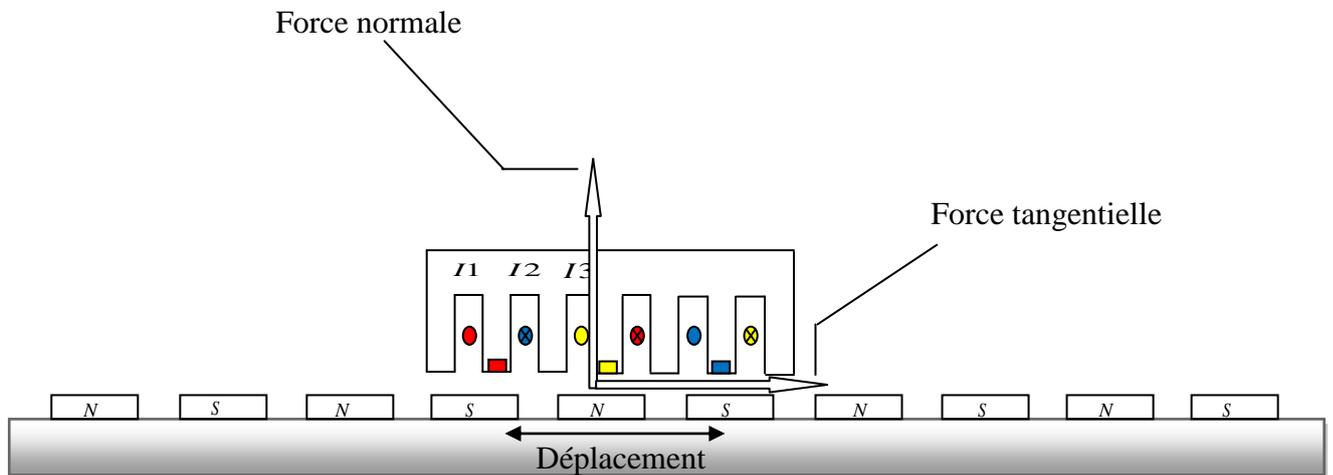


Figure 7. Effort normal et tangentiel dans un actionneur électromagnétique

Une phase est constituée par plusieurs spires ( $N=120$ ). Ces bobines sont alors connectées entre elles et passent dans les encoches suivant un schéma de répartition ( $a, c', b, a', c, b'$ ) Figure 8.

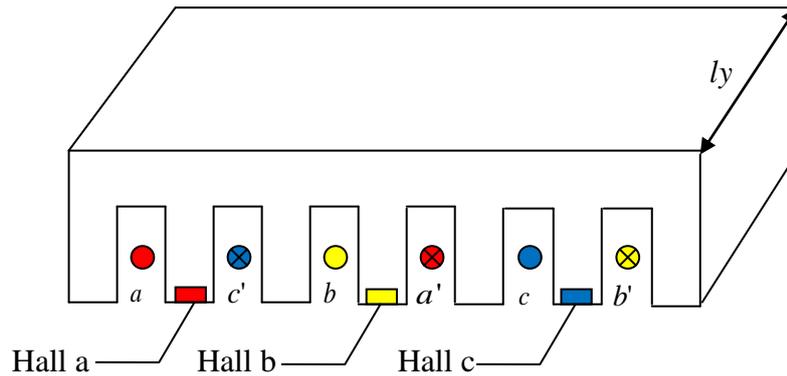


Figure 8. Répartition des phases (a, b, c) dans l'inducteur (partie mobile)

Les capteurs à effet Hall sont situés dans une partie fraisée des dents entre les faisceaux et sont désignés par : Hall a, Hall b, Hall c. Ces sondes vont basculer leur sortie logique à 0 ou 1, en fonction de l'induction magnétique qu'ils subissent. Donc, en l'absence d'une réaction d'induit, Si le capteur est face à un Sud, il bascule à 0 et s'il est face à un Nord, il bascule à 1.

On génère alors numériquement dans le programme de commande du dsPIC, une variable appelé secteur :

$$\text{Secteur} = 2^0 \cdot \text{Hall } a + 2^1 \cdot \text{Hall } b + 2^2 \cdot \text{Hall } c$$

Cette variable va prendre les valeurs (3, 2, 6, 4, 5, 1) ou (1, 5, 4, 6, 2, 3) quand le mobile va parcourir le rail, sur une longueur active.

La relation entre les phases du moteur linéaire et les capteurs à effet Hall est la propriété qui définit la configuration correcte et permet au microcontrôleur de commuter le courant dans les bobines pour appliquer la commande 6 secteurs, dite aussi commande 120° ou autopilotage. On peut également reconstituer la position relative du mobile, avec plus ou moins de précision, par la lecture des sondes à effet Hall.

Le rail est composé d'une série d'aimants permanents donc on a une force contre-électromotrice qui a la forme d'un trapèze, cela s'explique par le fait que la loi d'induction est de cette forme (Figure 9).

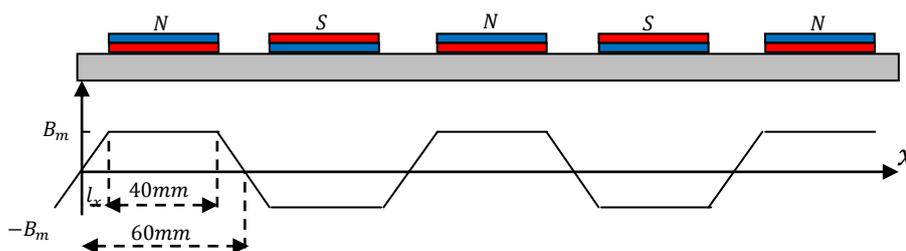


Figure 9. Induction générée par les aimants le long du rail

Donc en fonction de la position du mobile et du secteur, on doit imposer du courant dans deux phases et annuler celui de la troisième phase. On a une force contre-électromotrice qui a la forme d'un trapèze sur les 6 secteurs.

Le contrôle permet d'obtenir une force de la forme :  $F=k\Phi I$

Du point de vue de l'extérieur, la machine est vue comme une MCC sans balais (brushless DC) BLDC, exactement comme pour la version rotative.

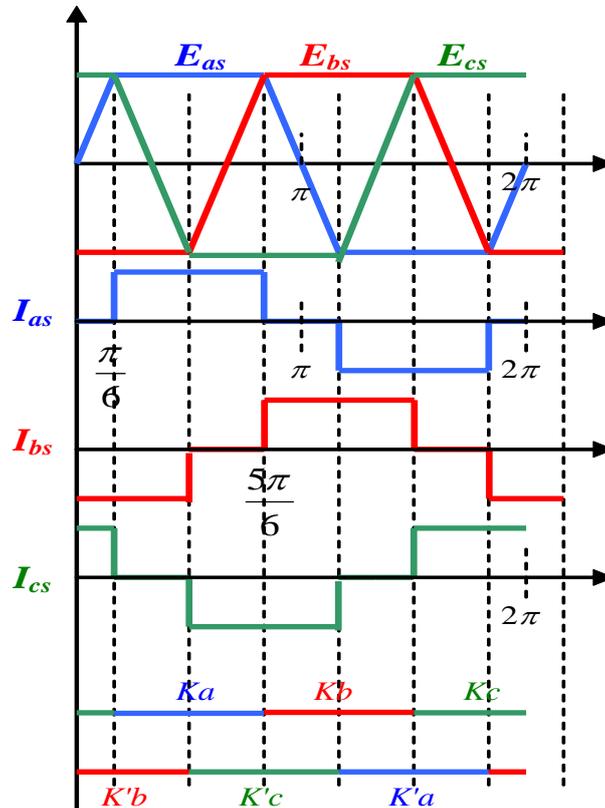


Figure 10. Force contre électromotrice et courant dans chaque bobine

Cela nécessite un onduleur particulier où l'on doit pouvoir contrôler l'arrêt d'un bras de hachage, tandis que les 2 autres continuent à hacher la tension du bus continu, en MLI afin de contrôler le courant absorbé.

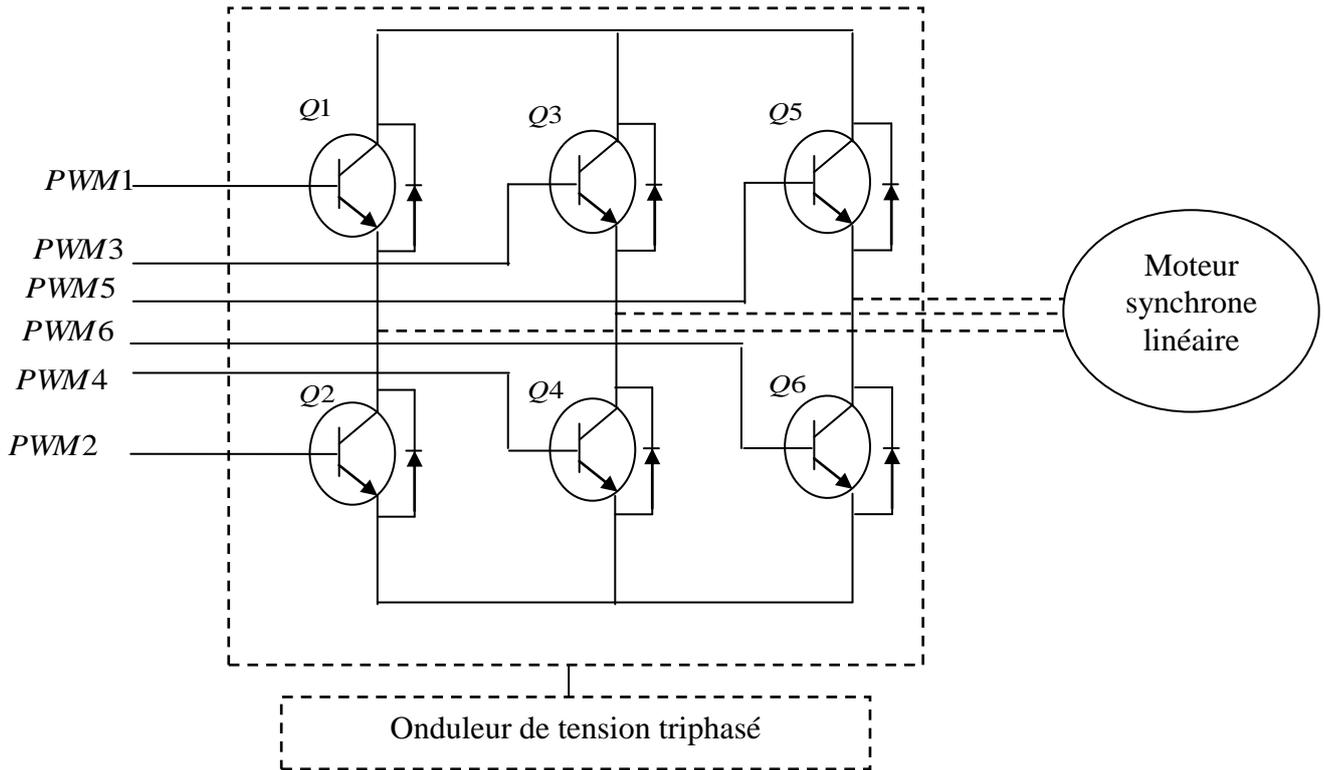


Figure 11. Structure de l'onduleur

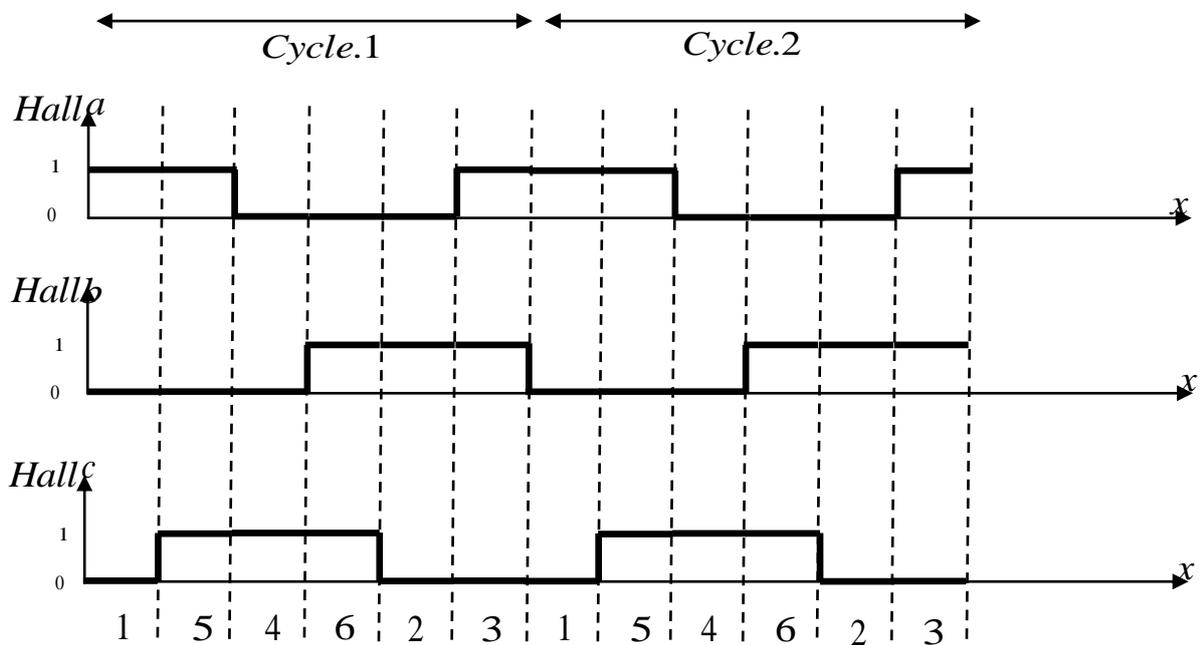


Figure 12. Signal capteur à effet Hall de la variable Secteur

#### 4. Commutation des séquences de la commande 6 secteurs

Pour créer un programme qui nous permet de mouvoir le moteur dans les deux sens, on s'est basé sur les deux tableaux suivants.

Tableau1 : donne le séquençement des phases qui nous permettent de réaliser la marche avant.

Tableau 2 : donne le séquençement des phases pour réaliser la marche arrière.

Notre premier objectif est de réaliser la commande en suivant les séquences de commande décrite ci-dessous :

**Tableau 1. Séquence pour la réalisation de la marche avant**

Séquences	Sondes effet Hall			PWMs		Courants		
	C	B	A			C	B	A
3	0	1	1	PWM1(Q1)	PWM4(Q6)	-i	0	+i
6	1	1	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q4)	0	-i	+i
2	0	1	0	PWM5(Q5)	PWM2(Q4)	+i	-i	0
5	1	0	1	PWM5(Q5)	PWM0(Q2)	+i	0	-i
1	0	0	1	PWM3(Q3)	PWM0(Q2)	0	+i	-i
4	1	0	0	PWM3(Q3)	PWM4(Q6)	-i	+i	0

**Tableau 2. Séquence pour la réalisation de la marche arrière**

Séquences	Sondes effet Hall			PWMs		Courants		
	C	B	A			C	B	A
5	1	0	1	PWM1(Q5)	PWM4(Q4)	+i	-i	0
3	0	1	1	PWM1(Q1)	PWM2(Q4)	0	-i	+i
1	0	0	1	PWM5(Q1)	PWM2(Q6)	-i	0	+i
6	1	1	0	PWM5(Q3)	PWM0(Q6)	-i	+i	0
4	1	0	0	PWM3(Q3)	PWM0(Q2)	0	+i	-i
2	0	1	0	PWM3(Q5)	PWM4(Q2)	+i	0	-i

On remarque qu'à chaque phase il n'y a que 2 bras qui conduisent à la fois et que le changement d'une séquence à une autre n'implique qu'un bras à la fois. Cela permet de recourir à plusieurs types de solutions d'électronique de puissance.

Notre choix s'est porté sur un onduleur triphasé compact et de faible tension suivant le cahier des charges (ST L6234, voir annexe 3).

Ce composant est disponible sur le marché et peut délivrer 2,8 A sans radiateur dans sa version DIP (20 broches) et 4A dans sa version PowerSO 20 (annexe 3).

Le but de l'onduleur est de permettre au moteur de fonctionner en assurant une commutation correcte de l'alimentation de ses enroulements.

Pour répondre aux besoins du moteur en termes de commutations, chaque interrupteur est constitué de la mise en antiparallèle d'une diode et d'un transistor.

Les diodes placées en antiparallèle avec les transistors sont importantes, sans celles-ci lorsque les transistors formant un bras de l'onduleur sont ouverts simultanément, aucun courant ne pourrait passer par ce bras. L'ouverture de ces transistors risquerait de couper le courant dans la source de courant que forme l'enroulement du moteur commandé par ce bras. Cela n'aurait pour conséquence que de mener à la destruction des transistors à cause de la surtension provoquée par l'effet selfique de la bobine en question. La présence de la diode permet de régler ce problème en laissant toujours un chemin libre au courant vers l'alimentation.

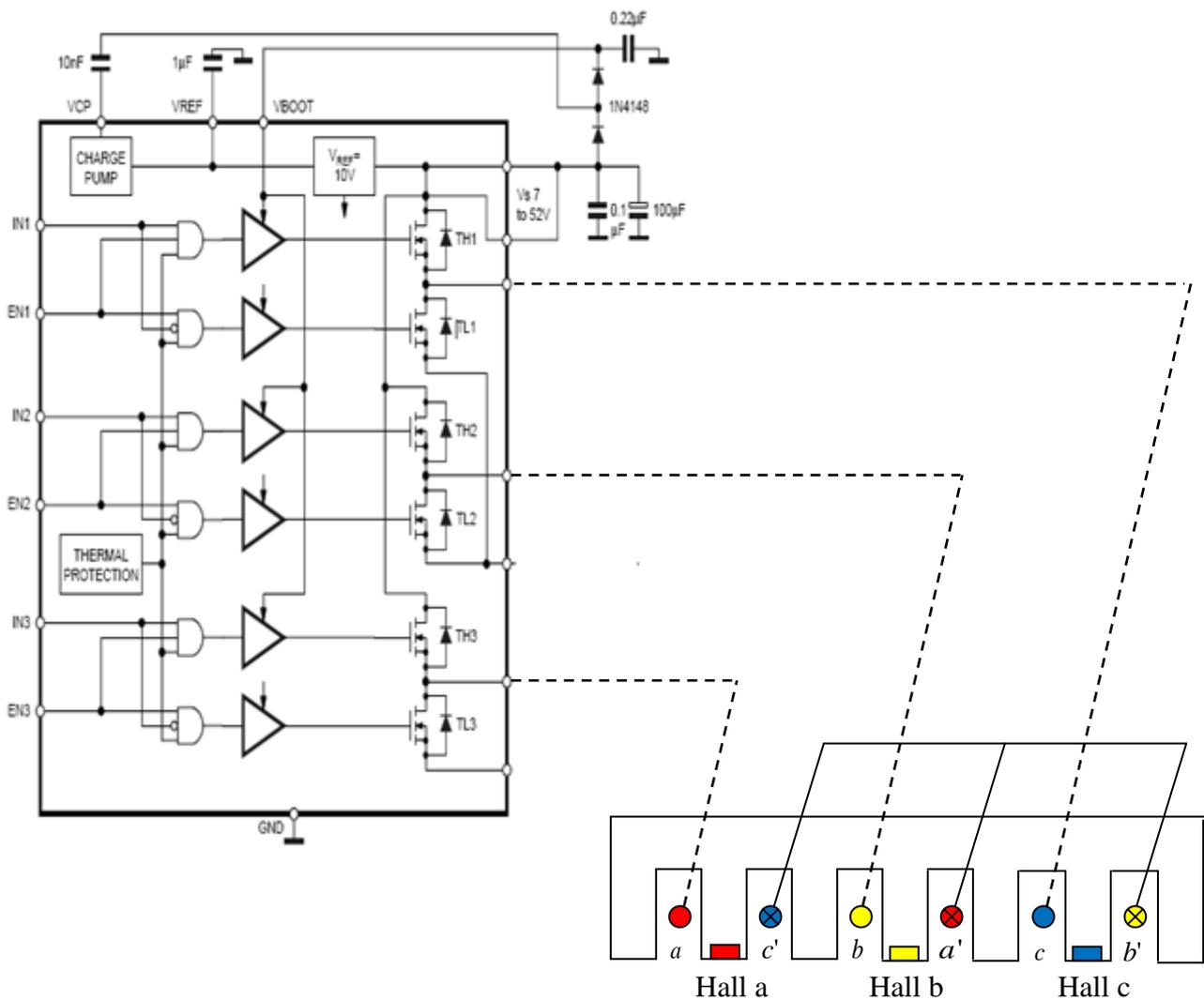


Figure 13. Branchement des trois phases avec l'onduleur (L6234)

C'est l'interaction du courant dans chacun des 4 faisceaux des bobines alimentées avec l'induction magnétique créée par les aimants en vis-à-vis qui donne 4 forces de Laplace qui s'additionnent pour donner la force de traction totale :  $F_x = 4l_y N_s B I$

Evidemment, cette force est une approximation de la force réelle car beaucoup d'éléments restent non modélisables (effet de bords, réaction magnétique d'induit, matériaux ferromagnétiques, entrefer, saturation, denture).

On va donc par la suite effectuer une modélisation plus fine en ayant recours à l'analyse par éléments finis.

## **5. Réalisation de la commande**

La commande est implantée sur un microcontrôleur. Ce dernier se programme en langage C ou en assembleur. Le choix réalisé pour le premier prototype a été reconduit pour notre étude, pour des raisons d'adéquation et de disponibilité. Il s'agit du dsPIC 33FJ128MC804 de Microchip. C'est un Digital Signal Controller (DSC) de 16 bits, Il dispose de nombreux périphériques intégrés nécessaires à notre application :

- Un module PWM triphasé pour contrôler l'onduleur.
- Un convertisseur analogique numérique (ADC) 10 bits, pour la mesure du courant de plateau
- Une liaison série asynchrone (UART) qui sera utilisée pour interfacer le module Bluetooth
- Une liaison série synchrone (SPI) pour interfacer l'accéléromètre MEMS
- De nombreuses Entrées/Sorties logiques
- Un noyau DSP pour accélérer le traitement numérique de certaines opérations
- Avec un quartz adéquat, on peut le faire fonctionner à 40 MIPS (Millions d'Instructions Par Seconde).
- Mémoire Flash, liaison I2C, timers, watch dog, In Situ Programming, bus CAN.

L'interface de gestion de la compilation et du flashage (programmation de la mémoire Flash) du DSC est MPLAB. C'est un IDE (Environnement de Développement Intégré) qui est fourni gratuitement par Microchip.

Chaque programme C compilé doit être flashé sur le dsPIC à l'aide d'un programmeur PICKIT2 (voir annexe 4) dont nous disposons. Il permet aussi de déboguer le programme mais au risque de bloquer la gestion temps réel des événements.

## **6. Conclusion**

Ce chapitre a permis de présenter le moteur synchrone linéaire dans sa version initiale (MSlinV3) ainsi que les principes de sa commande et les éléments matériels y afférant. Dans notre système, le cœur de la commande de l'onduleur est basé sur le dsPIC. C'est un DSC qui se programme en C et qui va permettre, une fois flashée, le pilotage en temps réel de l'onduleur par MLI et donc du moteur.

## *Chapitre III*

*Modélisation et dimensionnement du  
Moteur Synchrone linéaire*

## 1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter une étude numérique du moteur synchrone linéaire à aimants permanent et d'aboutir à un dimensionnement puis à la construction d'un prototype (MSlinV4). Partant de l'étude précédente, qui présente la structure générale, nous allons étudier les raisons qui ont fait que le prototype que nous a remis notre encadrant (MSlinV3) ne donnait pas un fonctionnement satisfaisant et chercher les modifications à apporter à son dimensionnement.

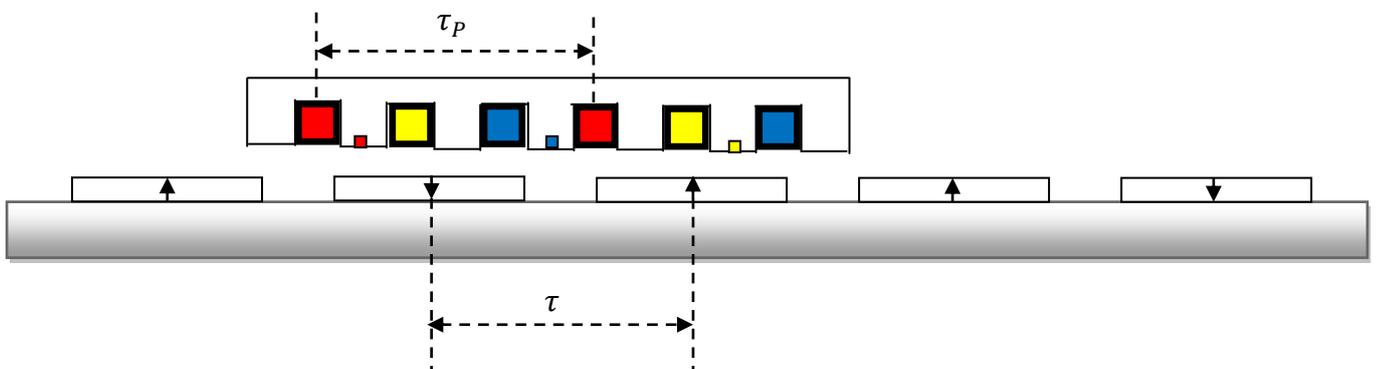
Pour ce faire, une modélisation numérique avec un logiciel d'éléments finis libre FEMM [6] doit être conduite. On étudiera notamment l'influence des matériaux choisis (rail et mobile), du pas polaire, de la largeur d'encoche, de l'entrefer, de l'enfoncement des sondes à effet Hall, sur le fonctionnement du moteur. Nous présenterons les principaux résultats. L'analyse se fait par le calcul des forces de traction, de détente et de collage (force verticale).

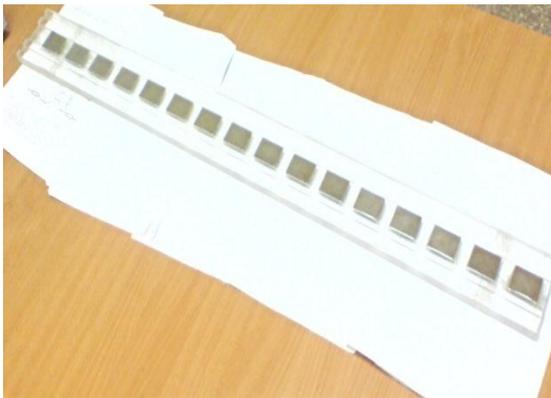
Du fait de l'utilisation de FEMM, les hypothèses simplificatrices sont moins sévères. Les effets de bords en x et en z seront pris en compte mais pas en y (profondeur par rapport à la Figure 14). Nous conduirons des études en régime linéaire mais aussi en prenant en compte la courbe de saturation des matériaux utilisés.

Par contre, la répartition des conducteurs dans les encoches sera considérés comme uniforme et continue (densité de courant), les commutations des courants ne seront pas prises en compte.

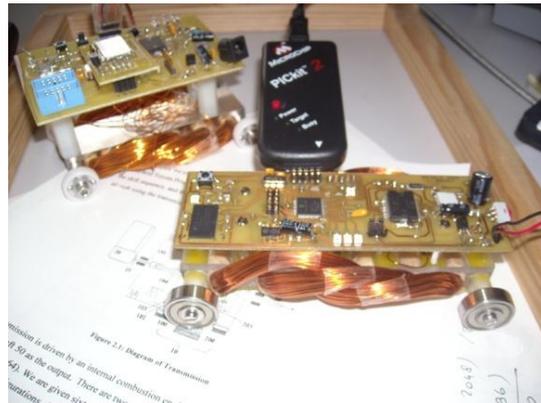
Du fait de la possibilité de couplage entre le logiciel FEMM et Matlab, nous avons trouvé l'intérêt de piloter le modèle simulé sous FEMM avec un programme sous Matlab (script .m) qui permet de lancer un calcul d'éléments finis pour une configuration donnée (position du mobile par rapport aux aimants du rail, courants dans les encoches), de calculer les forces à l'aide du tenseur de Maxwell, de l'induction magnétique au niveau des sondes à effet Hall, puis d'utiliser ces informations pour simuler son déplacement (intégration de la RFD, calcul du secteur en fonction de la réponse des capteurs à effet Hall, changement des courants dans les encoches suivant la commande 6 secteurs) et rebouclage...

Il faut cependant savoir qu'un calcul d'EF sous FEMM, avec les moyens de calcul dont nous disposons, prend beaucoup de temps (plusieurs heures), particulièrement lorsqu'il s'agit de la simulation de déplacement avec un pas de calcul faible.



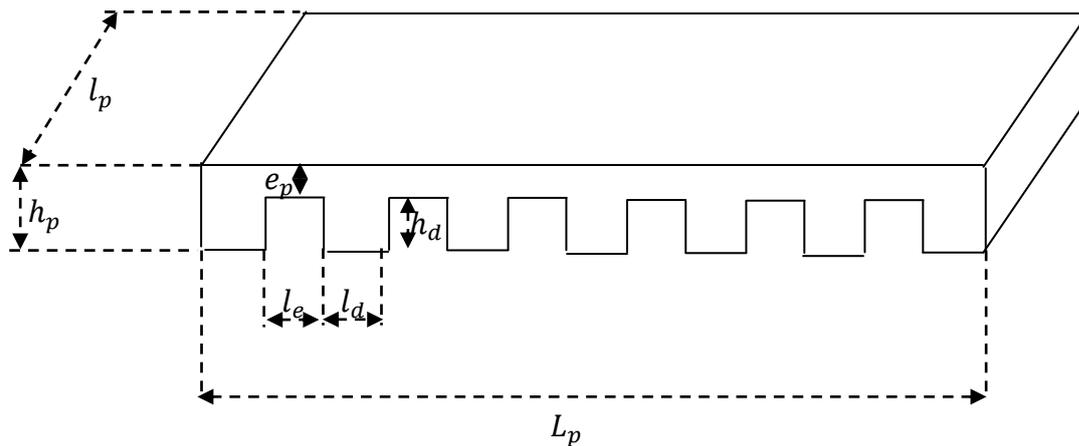


a) Le rail en plexiglas



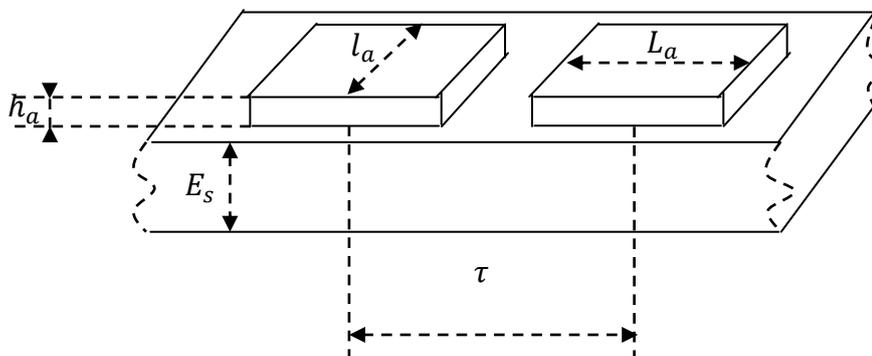
b) un mobile bobiné en plexiglas

**Figure 14. Forme générale de la structure choisie**



**Figure 15. Les paramètres de dimension du mobile**

Les aimants utilisés dans notre moteur linéaire synchrone sont de type N38, blocs plaqué au nickel, en Neodyme-Fer-Bore (NdFeB).



**Figure 16. Les paramètres de dimension du rail**

## 2. Paramètres géométriques du mobile et du rail du prototype MSlinV3

La Figure 14 montre la structure du mobile et le bobinage. Il y a six encoches et sept dents, les encoches sont droites. Il y a 120 conducteurs par encoche, les trois enroulements sont bobinés diamétralement (chapitre 2).

Le détail des dimensions du circuit ferromagnétique est donné par la Figure 15 et la Figure 16. Ces données seront utilisées pour modéliser le moteur linéaire par la méthode des éléments finis. D'autres informations quand à la structure mécanique (essieu porte roulement,..) sont présentées en Annexe 1.

La Figure 15 présente les dimensions du mobile.

La Figure 16 présente la disposition des aimants sur le secondaire du MSlinV3. La structure du moteur linéaire est définie en deux dimensions sous FEMM et la définition de la profondeur permet d'extrapoler les résultats de calcul uniquement. Les effets de bord dus à cette troisième dimension ne sont pas pris en compte par FEMM.

Le tableau ci-dessous présente une liste des principales grandeurs géométriques du MSlin

**Tableau 3. Liste des principales grandeurs géométriques du MSlin**

Composants	Listes des paramètres	Symbole	Valeur
Mobile	Longueur totale du circuit magnétique	$L_p$	130mm
	Largeur totale du circuit magnétique	$l_y$	30mm
	Hauteur totale du circuit magnétique	$h_p$	15mm
	Profondeur d'encoche	$h_d$	10mm
	Épaisseur de la culasse	$e_p$	5mm
	Largeur d'une dent	$l_d$	10mm
	Nombre d'encoches	$N_e$	6
	Nombre de spires par phase	$N_s$	120
	Nombre de dents	$N_d$	7
	Nombre de phases	$q$	3
Pas d'encoche	$\tau_e$	20mm	
Rail (inducteur)	Pas polaire	$\tau$	60mm
	Épaisseur de la culasse	$E_s$	10mm
	Longueur des aimants	$l_a$	29mm
	Largeur des aimants	$L_a$	40mm
	Épaisseur des aimants	$h_a$	3mm

$\tau$  : Pas polaire (le pas entre deux pôles d'aimants consécutifs)

$h_s$  : Épaisseur de la culasse

$l_a$  : Longueur des aimants

$L_a$  : Largeur des aimants

$h_a$  : Hauteur des aimants

### 3. Calcul des forces

La principale force de déplacement est une force tangentielle. Elle peut se calculer par la loi de Laplace. Les autres forces sont perturbatrices. Elle peuvent être déterminées numériquement, par l'évaluation du tenseur de Maxwell ou de la force de Lorentz (si le matériau conducteur est de perméabilité relative unitaire  $\mu_r = 1$ ) [12].

#### 3.1. Force électromagnétique de Laplace

La force de Lorentz se réduit à la force de Laplace en absence de charge électrostatique [13].

La force électromagnétique  $\vec{F}$  s'exprime alors :

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

La force magnétique n'agit donc que sur un conducteur traversé par un courant. Pour  $N$  conducteurs (nombre de spires de la bobine) traversant l'encoche de longueur active  $l_y$  soumis à une induction magnétique supposée constante et perpendiculaire partout sous le conducteur (de module  $B_m$ ), la force vaut :

$$\text{la force } F = B_m I N l_y$$

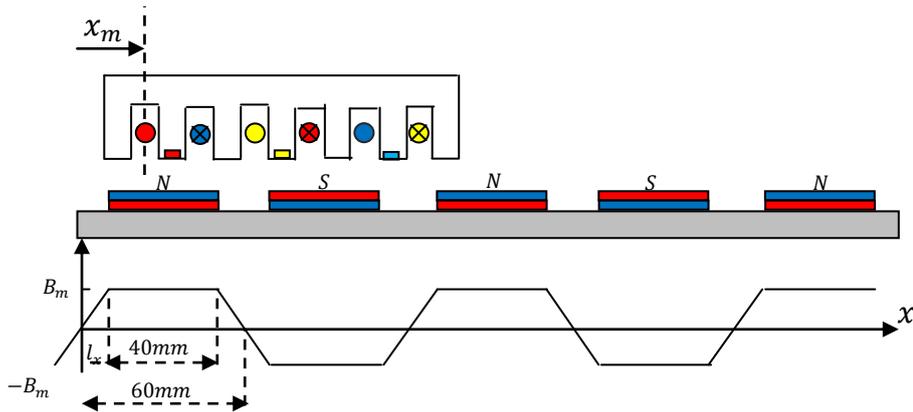
##### 3.1.1. Application numérique

Une culasse en plexiglas  $\mu_r = 1$  pour la partie mobile, un support en plexiglas  $\mu_r = 1$  pour le rail, pour un entrefer  $e = 3\text{mm}$ ,  $l_x = 10\text{mm}$ ,  $l_y = 30\text{mm}$ ,  $I = 2\text{A}$  et  $N = 120$  spires.

On impose des courants dans les bobines de sorte que si les faisceaux  $a$  et  $c'$  des bobines sont face à un Nord, que les faisceaux  $b$  et  $b'$  sont face à une pente de  $B$  croissante ou décroissante et que les faisceaux  $a'$  et  $c$  sont face à un Sud (

Figure 17), alors on doit alimenter les phases respectivement par  $+I, 0$  et  $-I$ . On obtient ainsi 4 forces qui vont s'additionner pour agir sur le mobile :

$$F_x = 4F_a = 4B_m I N l_y$$



**Figure 17. Induction générée par les aimants le long du rail [14].**

Pour du plexiglas,  $B_m = 0.073 T$ , la force en  $x$  dans un faisceau est  $F_x = 0.49 N$ , donc  $F_T = 2.13 N$ .

C'est pratiquement proche de la valeur calculée par la méthode numérique FEMM, sachant que la détermination de la valeur de  $B_m$ , utilisée pour ce calcul, été faite par FEMM.

### 3.2. La force Normale ( $F_z$ )

Dans les actionneurs linéaires synchrones à aimants permanents, la force normale (c'est-à-dire perpendiculaire au déplacement) est la source des contraintes mécaniques sur la structure. Dans notre structure, nous avons opté pour une solution simple qui consiste à fabriquer un mobile en plexiglas (culasse) ou un matériel peu ferromagnétique en acier-inox inoxydable. Cela diminue ou annule toutes les forces de détente, la force  $F_z$ . Le contrôle du moteur linéaire synchrone est donc plus simple.

### 3.3. La force de détente

Par définition, la force de détente [10] est la force issue de l'interaction aimant / fer en l'absence de courant. En présence de courant, ces phénomènes d'interaction aimant / fer sont toujours présents mais ne correspondent plus à la définition de la force de détente. On parlera donc d'ondulations de force, la force de poussée n'étant alors que la composante utile de la force électromagnétique. L'interaction aimant / fer participe aux ondulations de force qui sont indésirables pour le bon fonctionnement de l'actionneur.

Dans la littérature, les forces de denture (cogging) et les forces d'extrémités sont regroupées sous le nom de force de détente :

$$\text{Force de détente} = \text{Forces de cogging} + \text{Forces d'extrémités}$$

### 3.3.1. Effets d'extrémités

Les effets d'extrémités [10] regroupent deux grands phénomènes (Figure 18) :

- Les effets liés à la largeur finie du primaire qui génèrent des forces d'extrémités (en rouge).
- L'influence du bobinage des têtes de bobines qui crée une asymétrie des couplages entre les différentes inductances qui composent le bobinage (en bleu).

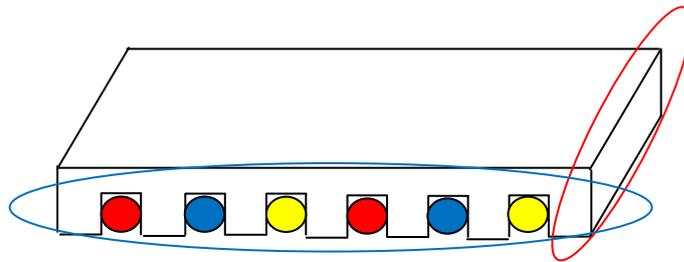


Figure 18. Présentation des phénomènes d'extrémités

Les aimants ont une influence sur le circuit magnétique, ils génèrent donc des forces parasites. Dans le cas de la largeur finie du primaire, les aimants créent une force sur les extrémités du primaire, cette force est appelée force d'extrémités.

Les forces d'extrémités dépendent donc de la position du mobile par rapport aux aimants, elles dépendent aussi de la forme des extrémités du circuit magnétique. Une solution pour réduire les effets de ces forces d'extrémités est d'incliner les extrémités du circuit magnétique du mobile.

### 3.3.2. Effets d'encoches ou de denture (Cogging)

Tout comme celle des moteurs tournants, les encoches du primaire du PMLSM, étant constituées de matériaux ferromagnétiques, subissent l'attraction des aimants. Ainsi, il en résulte une force normale et une force tangentielle. Cette force tangentielle aux encoches vient donc s'ajouter à la force de poussée du moteur, et donc doit être considérée comme une force perturbatrice. Ce phénomène est appelé cogging [10], et génère une composante de la force de détente. Il peut être très important et gênant pour la marche régulière du moteur et pour son contrôle.

## 4. Méthodes d'analyse numérique du moteur synchrone linéaire à aimant permanent

Avec l'apparition des ordinateurs assez puissants en terme d'espace mémoire, rapides en terme d'exécution des calculs, l'utilisation des méthodes numériques pour la résolution des problèmes de champs électromagnétiques, devient un choix réaliste. Ce type de problèmes est modélisé de façon fondamentale, en partant des équations de

Maxwell, qui sont manipulées pour aboutir à une équation différentielle globale régissant le fonctionnement du dispositif électromagnétique dans un cadre d'hypothèses restreintes et bien déterminées.

#### 4.1. L'outil de modélisation

Nous n'allons pas comparer les méthodes d'éléments finis ou de différences finies pour l'analyse de notre moteur. Le choix d'un logiciel libre (FEMM [6]), d'analyse par éléments finis en 2D, nous a été imposé par notre encadrant. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées pour résoudre d'une manière efficace, les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques.

La méthode des éléments finis consiste à rechercher une fonction globale représentant les phénomènes étudiés, sur un domaine de résolution préalablement subdivisé en parties finis adjacents appelées élément finis.

Le principe du calcul par éléments finis est de diviser la structure de la machine étudiée en un nombre important d'éléments de dimensions finies puis de résoudre les équations de Maxwell sur chacun de ces éléments. Les conditions aux limites de chaque élément sont fixées par les éléments voisins. La combinaison de tous ces éléments de calcul permet alors de connaître l'état magnétique de la structure complète et donc d'effectuer des calculs de flux, de force et d'inductance.

Le domaine, dans lequel est effectuée la simulation, est décomposé en éléments sur lesquels sont construites des solutions approchées dont les inconnues sont les valeurs de la solution en ensemble de points finis qui sont les nœuds de la discrétisation. Sur chaque point est calculé un potentiel (Figure 19). D'habitude, on utilise des triangles ou des quadrilatères pour les problèmes 2D et des tétraèdres ou des hexaèdres pour les problèmes 3D.

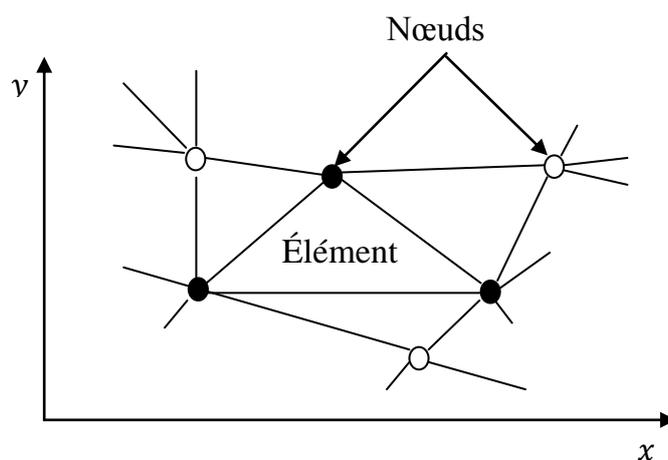


Figure 19. Discrétisation par élément finis en deux dimensions

## 4.2. Présentation du logiciel FEMM

Le logiciel FEMM (**F**inite **E**lement **M**ethod **M**agnetics) comporte une suite de programmes permettant de résoudre des problèmes d'électromagnétisme à basse fréquence dans des domaines 2D ou axisymétriques. Ce logiciel, développé par *David Meeker*, est disponible gratuitement (*Aladdin Free Public License*) [15].

FEMM se compose de trois programmes :

- *femm.exe* : est un pré et post-processeur contenant une interface graphique qui permet de fixer la géométrie du problème, les propriétés matérielles ainsi que les conditions aux limites. Après l'analyse, la solution est affichée sous forme de contour, densité de flux... Le logiciel permet également d'évaluer un certain nombre d'intégrales et de tracer diverses quantités d'intérêt le long de contours définis par l'utilisateur.
- *triangle.exe* : découpe les régions du problème en éléments triangulaires, ce qui constitue une étape importante de l'analyse par éléments finis.
- *fkern.exe* : est un solveur qui résout les équations aux dérivées partielles pour obtenir les valeurs du champ magnétique dans le domaine étudié.

Le langage *LUA* est également intégré dans les pré et post-processeurs. Il suffit d'écrire un programme ou donner des instructions dans la console *LUA* pour commander les étapes de calculs. Toute modification sur le domaine d'étude, analyses ou exploitations des résultats peut être effectuée de manière automatique par un programme en *LUA* sans l'intervention manuelle de l'utilisateur.

La version FEMM 4.2 contient une bibliothèque, qui permet d'interfacer FEMM avec Matlab, Scilab et Octave. Toutes les commandes en *LUA* sont reprises dans la bibliothèque.

La modélisation de moteur synchrone linéaire à aimant permanent par la méthode des éléments finis va nous permettre de résoudre les équations. Une fois la résolution des équations de Maxwell terminée, on détermine l'induction magnétique (sous les capteurs à effet Hall) et les composantes de la force électromagnétique que subit le mobile. Ces études sont réalisées pour différentes positions relatives, courants, et matériaux. Elles permettront de déterminer la position optimale du capteur par rapport à l'aimant, l'entrefer, les matériaux à utiliser, les dimensions, les forces résultantes (amplitude et ondulations)...

## 4.3. Définition de la structure de l'actionneur sous FEMM

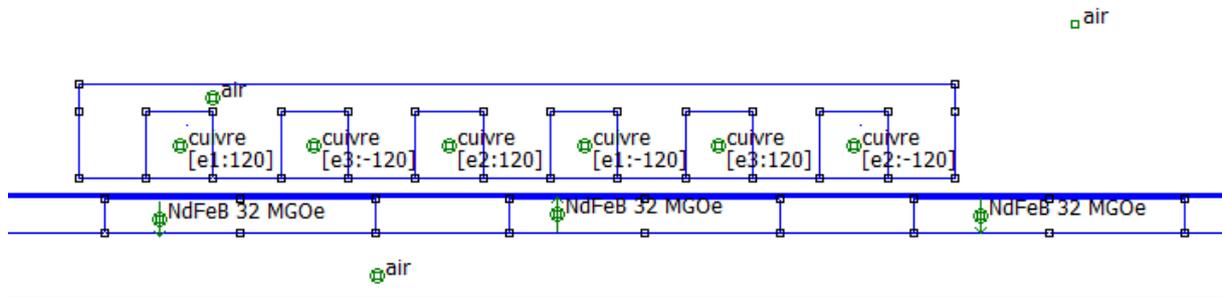
On définit la structure de moteur linéaire qui comporte deux parties, chacune des deux parties est décrite par un matériau dont les caractéristiques sont modifiables. La Figure 20 présente la structure de l'actionneur avec les différents matériaux utilisés :

- Un support en plexiglas (rail) pour les aimants, le matériau est assimilé à de l'air ( $\mu_r = 1$ );

- Des aimants de perméabilité relative  $\mu_r = 1.045$  ;
- Le bobinage en cuivre de perméabilité relative  $\mu_r = 1$  ;
- Une culasse en plexiglas pour le mobile, assimilé à de l'air ( $\mu_r = 1$ ) ;
- De l'air autour de la structure du moteur et dans la zone d'entrefer.

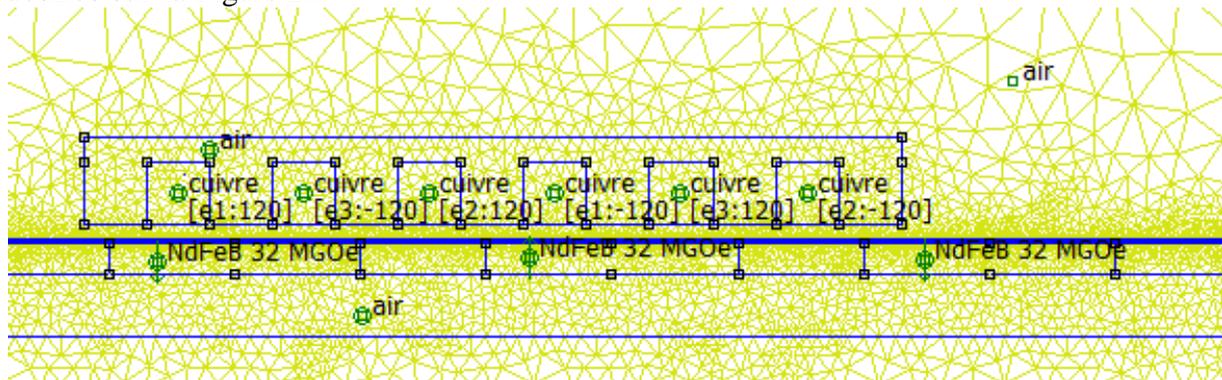
Les capteurs à effet hall ne sont pas modélisés, mais leur position sera utilisée pour déterminer l'induction magnétique et changer la séquence d'alimentation;

Nous présentons les résultats de modélisation sous FEMM de la version MSlin V3 (Figure 20), dont l'ensemble des paramètres géométriques et électromagnétiques sont récapitulés dans Tableau 3.



**Figure 20. Structure du MSlinV3 définie sous FEMM**

Le maillage s'effectue automatiquement, en fonction de la taille des éléments. Afin de forcer un maillage plus fin dans la zone d'entrefer, nous avons rajouté des lignes fictives, non fermées (Figure 21). Le logiciel FEMM choisi automatiquement un maillage de 23962 nœuds et 47644 éléments comme illustré sur la Figure 21. Nous obtenons le résultat d'un maillage resserré aux niveaux des points de calculs désirés sur la Figure 21.



**Figure 21. Détail du maillage de la structure du MSlinV3 sous FEMM**

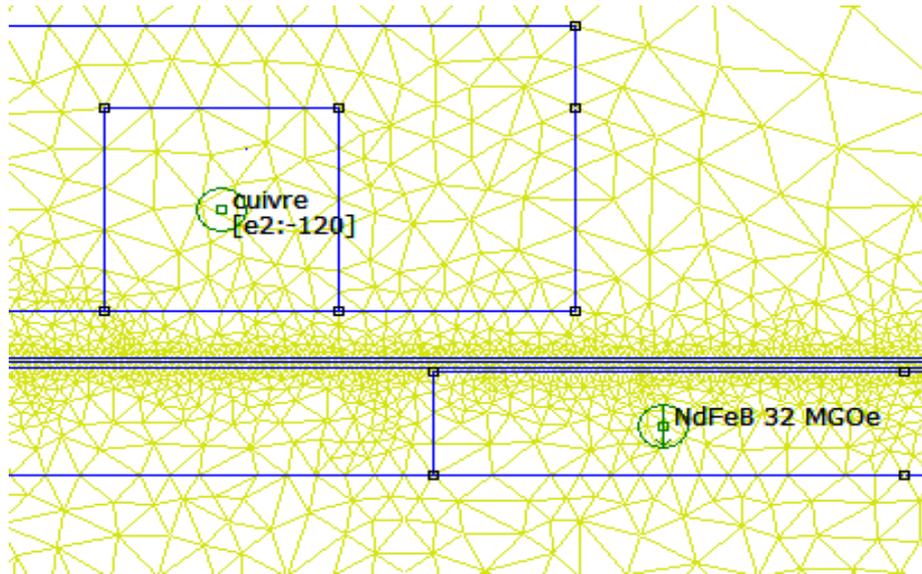


Figure 22. Détail du maillage près de l'entrefer

Un maillage fin augmente la précision de calcul mais requiert beaucoup de temps lors de la résolution des équations, particulièrement en non-linéaire.

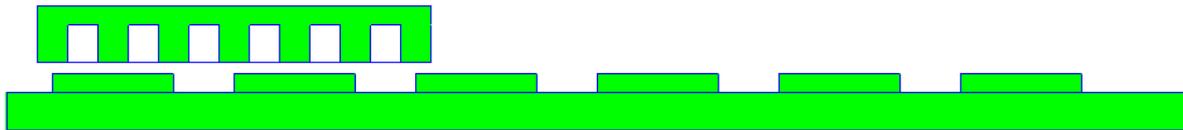


Figure 23. Structure des blocs de même matériaux du MSlinV3 sous FEMM

La Figure 24 permet la visualisation de la valeur de l'induction magnétique en tout point. Nous observons que le champ magnétique est plus fort sur les bords des aimants permanents.

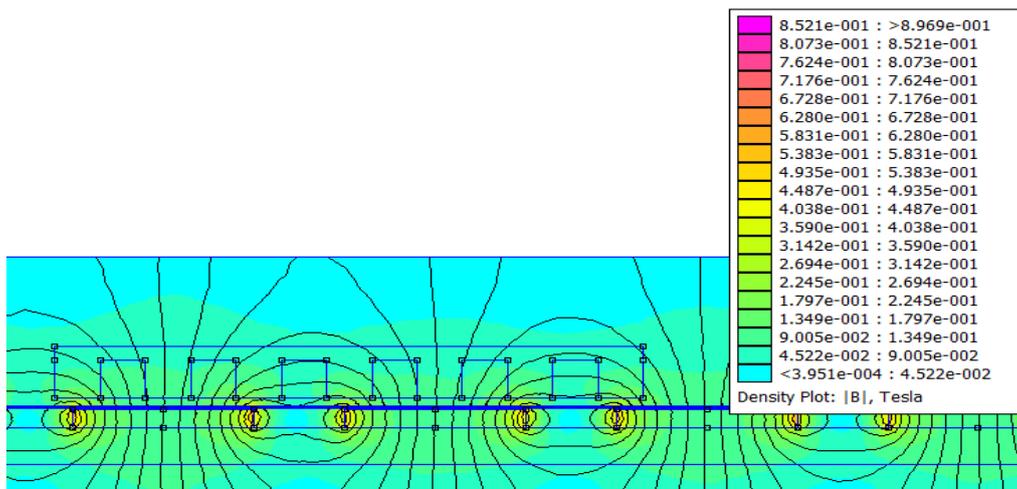
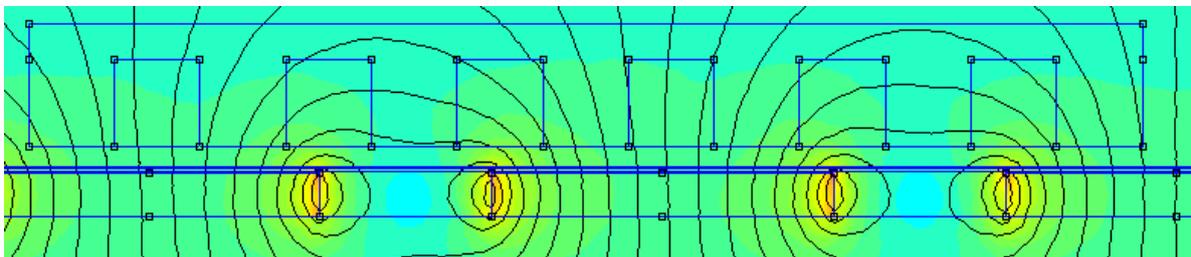


Figure 24. Champ magnétique de MSlinV3 sous FEMM

La vérification par éléments finis de l'état de saturation de la machine, la **Figure 24** montre que l'induction dans les différentes parties du moteur linéaire est inférieure à 0.7 Tesla.

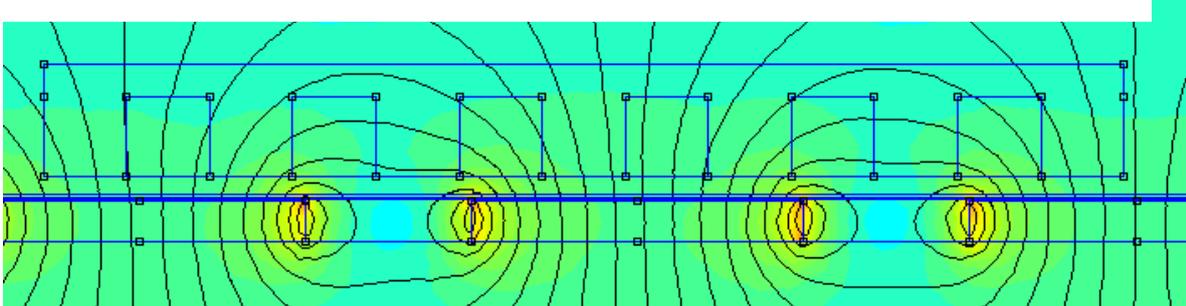
### 5. Distribution de l'induction magnétique dans la structure

Une fois l'induction magnétique calculée en tout point, le post-processing de FEMM permet de calculer des intégrales sur des contours ou sur des bocs. La méthode utilisée est celle de l'intégrale volumique du tenseur de Maxwell pondéré (Weighted Stress Tensor Volume Integral) [12]. Elle nous permet d'obtenir directement les forces tangentielle et normale que subit le mobile. La Figure 25 présente la distribution de l'induction magnétique dans la structure choisie et le calcul de la force en  $x$  et  $z$  par rapport à la position  $x = 2lx=20$  mm



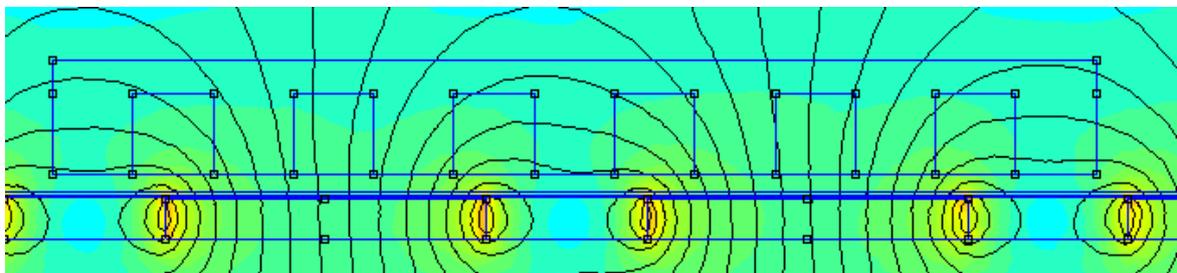
$$x = +2lx$$

$$F_x = 2.821 \text{ N} \quad F_y = -4.080 \text{ N}$$



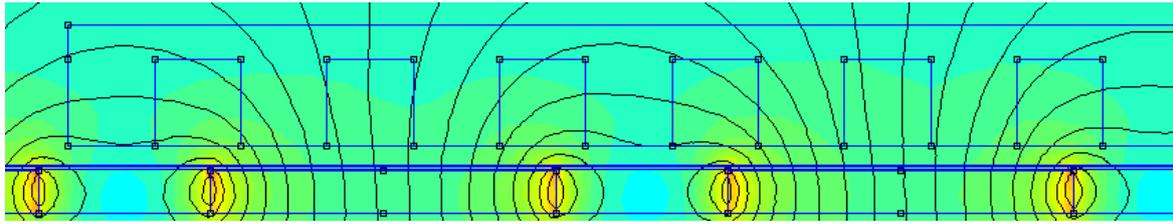
$$x = +5lx/2$$

$$F_x = 2.126 \text{ N} \quad F_y = -4.005 \text{ N}$$



$$x = -2lx$$

$$F_x = 1.686 \text{ N} \quad F_y = 1.477 \text{ N}$$



$$x = -5l_x/2$$

$$F_x = 2.428 \text{ N} \quad F_y = -1.138 \text{ N}$$

Figure 25. Calcul des forces sur les 4 positions du MSlinV3

## 6. Représentation des forces

Le calcul est réalisé à l'aide de la bibliothèque OctaveFemm sur Matlab. Les forces sont mesurées pour différentes valeurs de position suivant l'axe  $x$ . La Figure 26 et la Figure 27 représentent les forces en  $x$  et  $z$  respectivement, sur un déplacement de longueur  $x = 120\text{mm}$ . On remarque que la force tangentielle varie de  $1.58\text{N}$  à  $2.7\text{N}$  et que la force normale varie de  $-1.25\text{N}$  à  $1\text{N}$ . Les ondulations sont périodiques ( $2l_x$ ). Les forces sont très faibles du fait du matériau choisi (plexiglas, donc air).

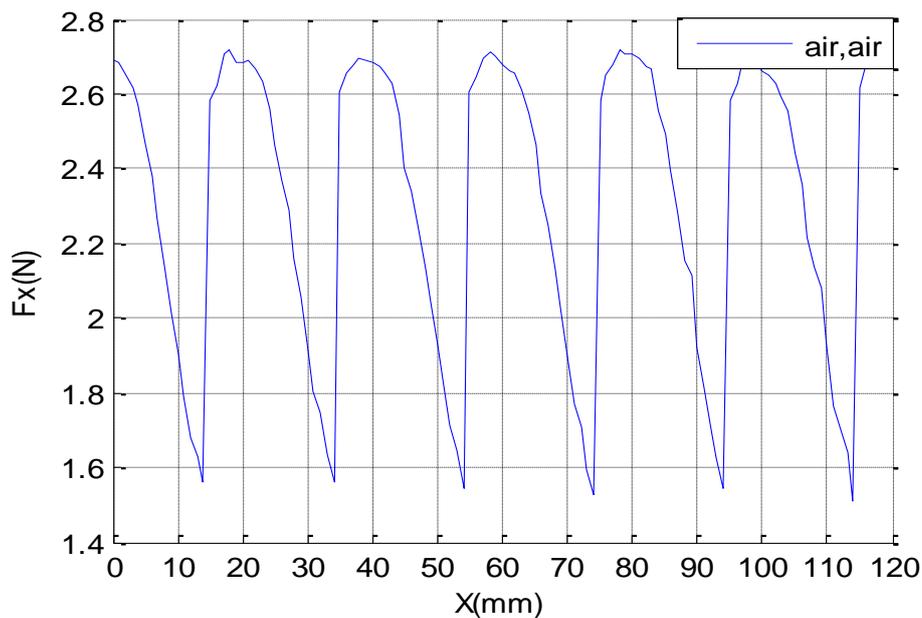


Figure 26. Force tangentielle en fonction de la position de MSlinV3

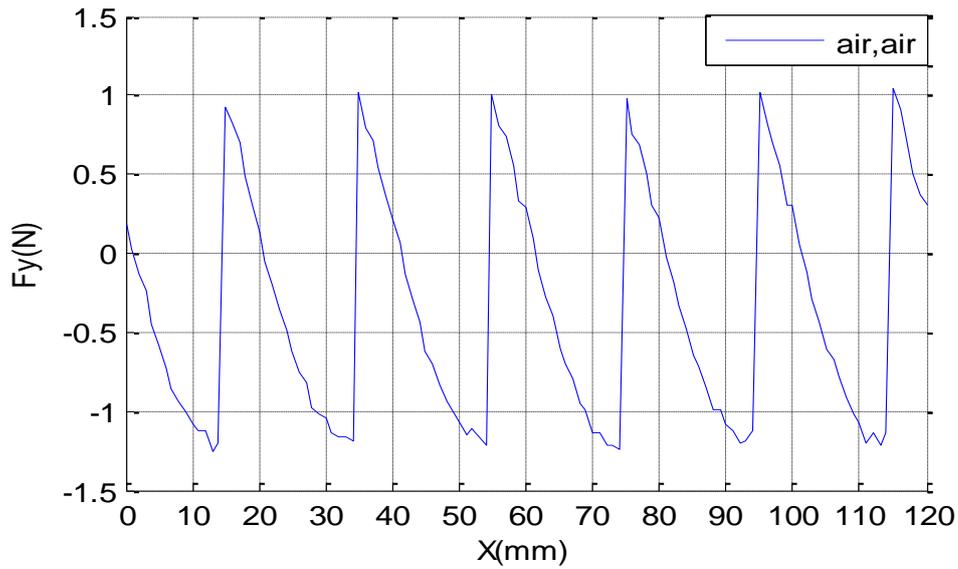


Figure 27. Force normale en fonction de la position de MSlinV3

### 6.1. Calcul de la force de détente

Il est possible de calculer la force de détente grâce au logiciel FEMM. Il suffit de ne pas alimenter les enroulements et de déplacer le mobile sur une longueur supérieure au double de son pas polaire. La Figure 28 représente l'évolution de la force de détente en fonction de la position sur un déplacement  $x = 120\text{mm}$ . Avec une structure en plexiglas, on remarque que la force de détente est nulle. On n'a que du bruit numérique.

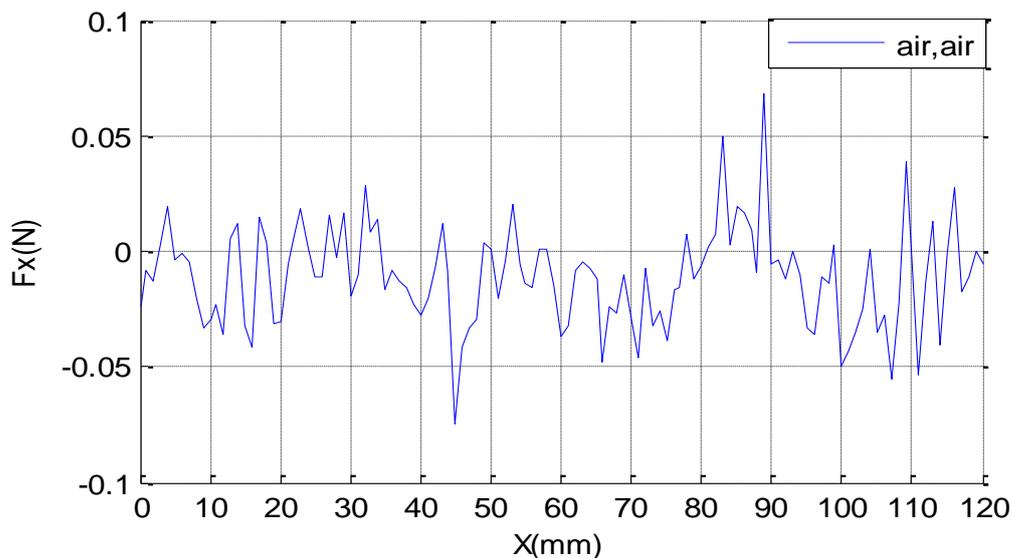


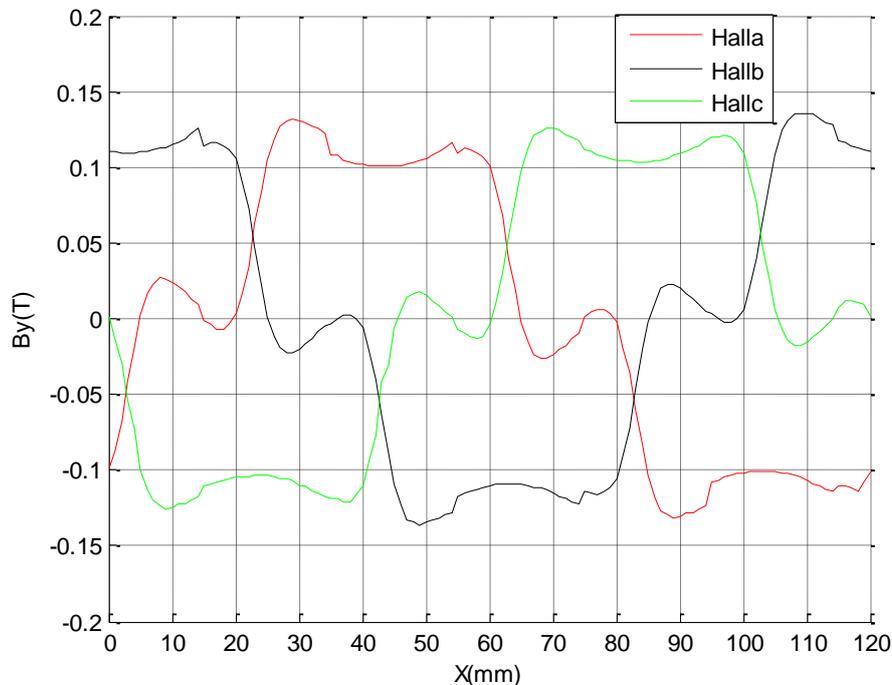
Figure 28. Force de détente en fonction de la position de MSlinV3

## 6.2. Calcul de l'induction magnétique

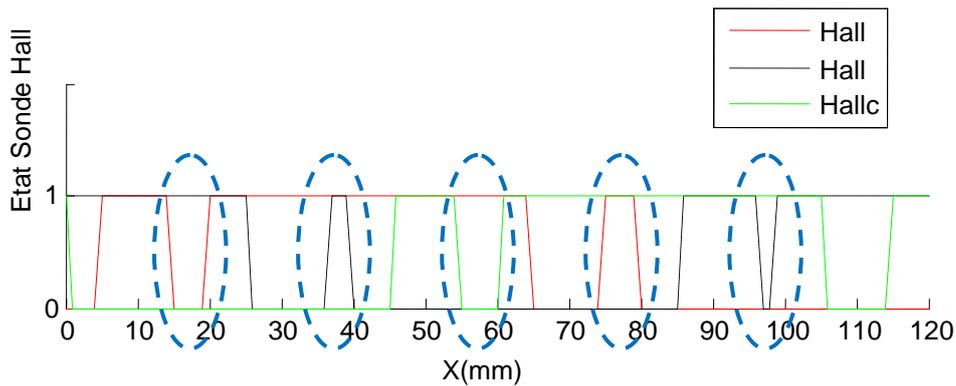
L'induction magnétique a deux composantes, l'une est principale ou normale notée  $B_y$  (l'axe y de FEMM se confond avec l'axe z de notre modélisation, l'axe z sous FEMM donc la profondeur, se confond avec l'axe y de notre modélisation).  $B_y$  crée la poussée et elle est dirigée suivant l'axe ( $OY$ ), et l'autre est tangentielle notée  $B_x$ , elle donne naissance à une force normale et elle est dirigée suivant l'axe ( $OX$ ).

La Figure 29 présente l'amplitude de l'induction magnétique suivant l'axe normal que verraient 3 sondes à effet Hall, placées comme indiqué dans le chapitre précédent. La valeur de l'induction magnétique varie de  $-0.12T$  à  $0.12T$ . On voit bien que l'induction magnétique est maximale lorsque les sondes se retrouvent au dessus d'un Nord et minimale lorsque se retrouve au dessus d'un Sud.

Les instants de commutation seront donc déterminés par le changement d'état des sorties des sondes. On obtient ainsi une information sur la position du mobile. Ces informations sont utilisées afin de déterminer l'instant de commutation des bobines.



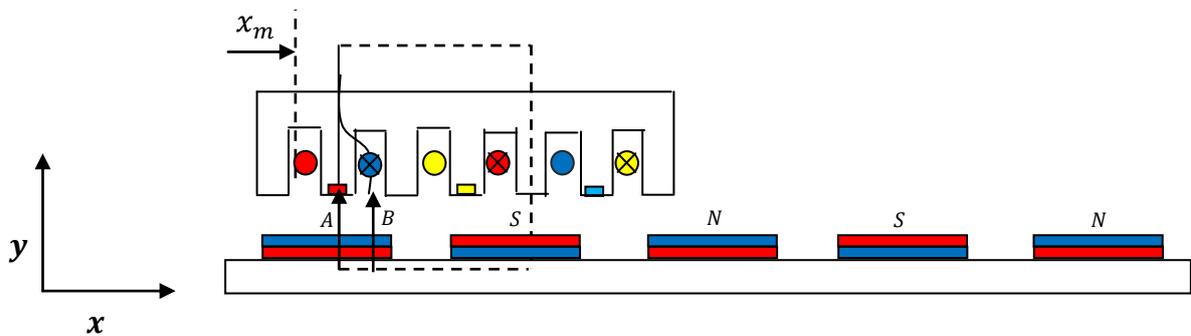
**Figure 29. Induction magnétique au niveau du trois sondes effet Hall a, b, c en fonction de la position de MSlinV3**



**Figure 30. Induction magnétique en fonction de la position sous FEMM**

En analysant les deux figures précédentes, on voit bien qu'il y a des passages par zéro parasites et qui donnent un basculement inattendu des sondes à effet Hall. Ceci provoque un changement de la séquence S et détériore la commande, allant jusqu'à bloquer le mobile dans certaines configurations. Ceci est en partie dû à l'utilisation du plexiglas au lieu d'un matériau ferromagnétique qui canaliserait mieux les lignes de champs.

La commande générée par le microcontrôleur doit se faire lorsqu'il y a un passage par zéro pour les capteurs qui dépend de la variable secteur du chapitre 2 pour exciter les enroulements. On voit bien que notre commande ne correspond pas à cette structure (voir les deux tableaux de déplacement chapitre 2). En fonction de ces résultats nous sommes convaincus qu'on ne peut pas commander notre mobile donc il faut utiliser d'autres matériaux pour pouvoir augmenter l'échange d'énergie entre les aimants et le bobinage du mobile (Figure 31).



**Figure 31. Parcours des lignes de champ**

D'après cet exemple, si la perméabilité magnétique du fer est 1000 fois supérieure à celle de l'air, cela signifie que les lignes de champ magnétique seront 1000 fois plus attirées par le fer que par l'air, c'est-à-dire 1000 fois plus attirées par le trajet A que le trajet B.

## 7. Variation de la force tangentielle et normale pour différents matériaux utilisés

Pour les différentes valeurs de la perméabilité magnétique relative du matériau de la partie mobile, les allures de la force et l'induction magnétique en fonction de la position sont illustrées par les figures ci-dessous. Les calculs ont été conduits sous FEMM, pour plusieurs positions du mobile par rapport au rail, sur deux pas polaire.

La Figure 32, Figure 33 et Figure 34 représentent la force tangentielle, de détente et normale pour cinq structures comme l'indique le Tableau 4 respectivement avec une longueur de 130mm, un pas polaire ( $\tau = 60mm$ ),  $l_x = 10mm$   $l_y = 30mm$  et un entrefer constant  $e = 3mm$ .

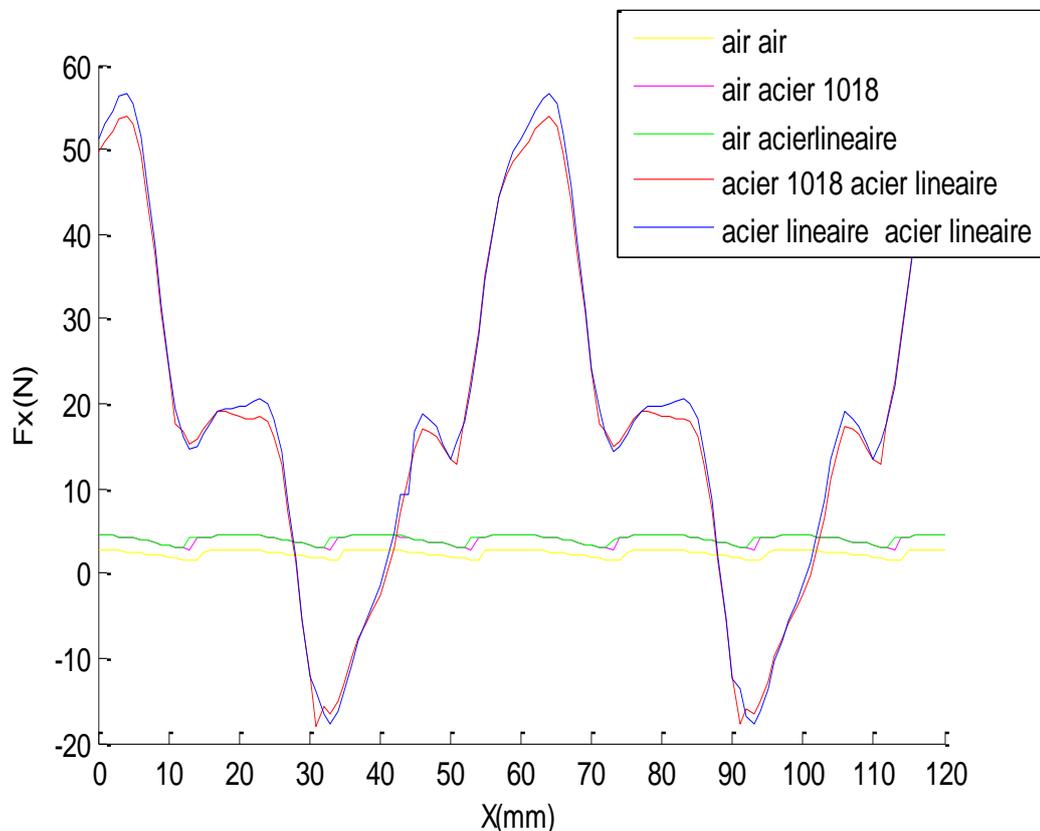
Le calcul de la force de détente se fait à courant de plateau nul, tandis que le calcul de la force tangentielle et normale se fait avec un courant de plateau  $I=2$  A.

**Tableau 4. Matériaux utilisés dans différentes structures**

Structure	1	2	3	4	5
Mobile	Air	Air	Air	Acier 1018	Acier linéaire
Rail	Air	Acier 1018	Acier linéaire	Acier linéaire	Acier linéaire

**Tableau 5. Perméabilités relatives pour chaque matériau**

Matériau utilisé	Air	Acier-inox ou acier 1018	Acier linéaire
Perméabilité relative	1	529	14872



**Figure 32. Force tangentielle en fonction de la position pour différentes configurations**

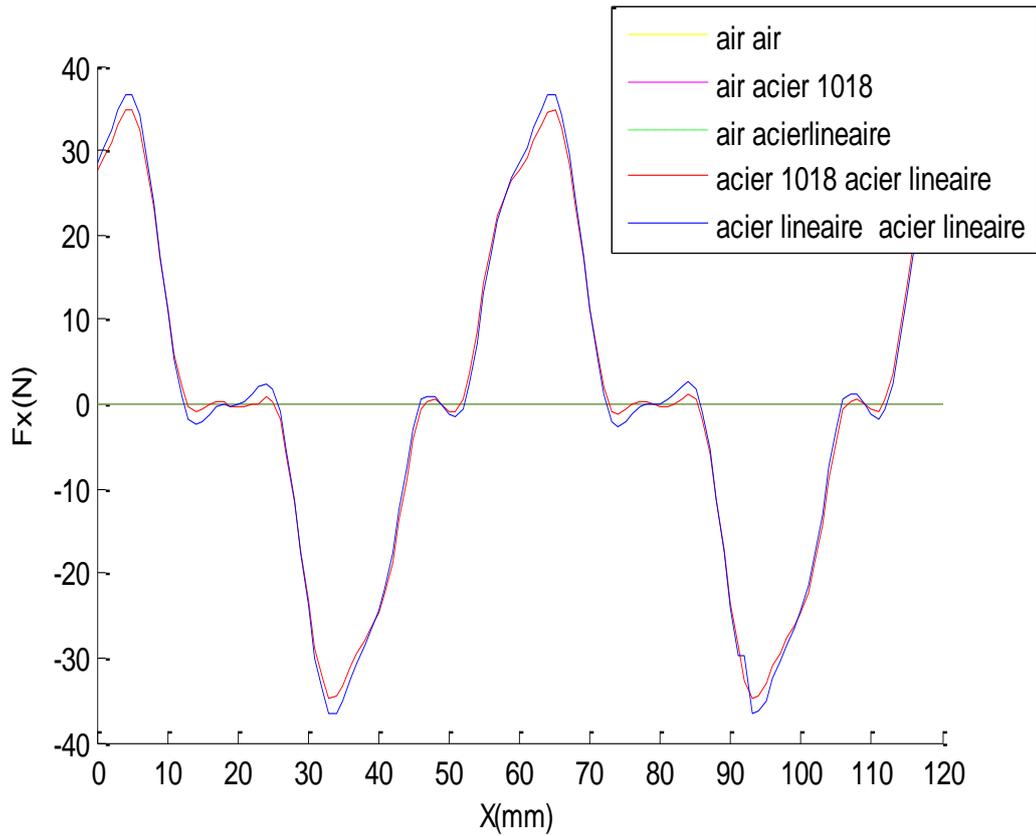


Figure 33. Force de détente en fonction de la position pour différentes configurations

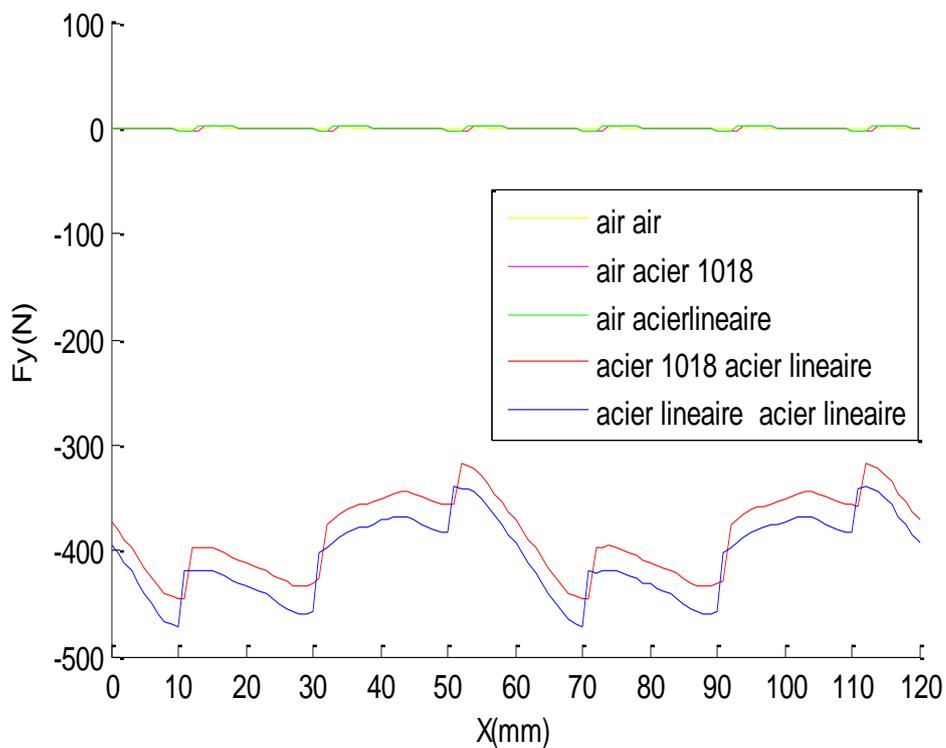
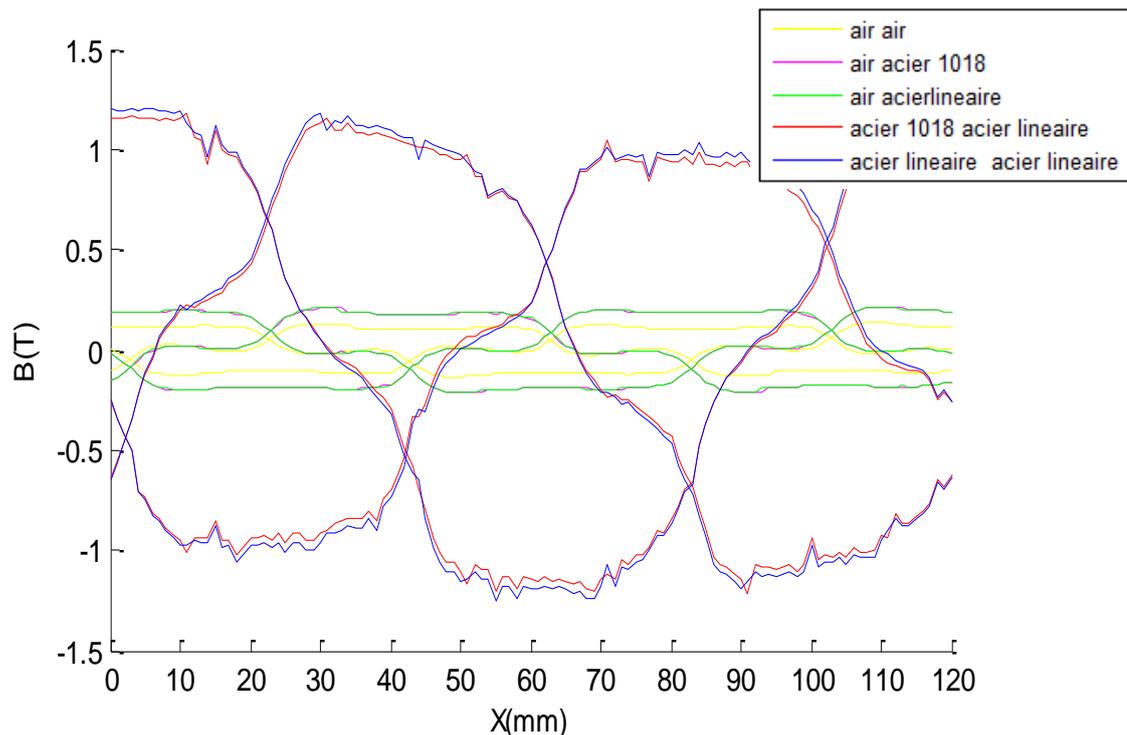


Figure 34. Force normale en fonction de la position pour différentes configurations



**Figure 35. Induction magnétique au niveau des trois sondes à effet Hall a, b, c pour différentes configurations**

Pour les structures ( 4 et 5 ) comportant deux matériaux ferromagnétiques, on constate une grosse composante alternative (force de détente) sur  $F_x$ . Donc, on peut juger que la différence entre ces deux courbes est négligeable, car les perméabilités magnétiques relatives considérées servent seulement à canaliser les lignes de champ magnétique et n'interviennent pas directement dans le calcul de la force qui est évaluée seulement dans la couche conductrice.

La force normale  $F_y$  est très grande et colle la machine sur le rail (400 N !). Les secteurs sont obtenus correctement en fonction des sondes à effets Hall.

Pour l'essai à vide (ie à  $i=0A$ ) , on n'a que la force de détente en  $F_x$ , on remarque que la force de détente est énorme ! 30 N en pointe. Elle est alternative car c'est une force de rappel par rappel aux dents. Vu sa valeur, cela veut dire qu'il faut beaucoup de courant pour dépasser les 30 N.

Même avec  $i=20A$  (ce qui dépasserait largement notre cahier des charges) le problème reste le même pour dépasser le maximum de la force de détente, afin de déplacer le mobile.

En conclusion et d'après les résultats obtenus, nous devons exclure les configurations où il n'y a que du matériau ferromagnétique, mais en même temps; il faut vérifier que les secteurs soient calculés correctement.

Parmi les solutions proposées:

- Des capteurs enterrés pour voir si ça élimine le double passage parasite par zéro;
- Des cales d'encoche pour vérifier si l'induction vu par les sondes à effet Hall est correcte et donc que le secteur est bien déterminé quand le mobile se déplace;
- Mixer l'utilisation du plexiglas et de l'acier ferromagnétique.

Avec toutes les solutions proposées ci-dessus cela ne suffisent pas à garantir l'élimination du problème du double passage par zéro. Pour cela il a été décidé de changer la structure du moteur linéaire en raccourcissant la largeur d'encoche. Cela engendre le changement de la partie mobile et de la partie inducteur (rail avec les aimants car la longueur active change. Nous passons de la version du MSlinV3 à la version du MSlinV4.

## 8. Présentation de la nouvelle structure du moteur linéaire employé dans notre étude (MSlinV4)

MSlinV3 est un mobile de longueur 130mm, un pas polaire de 60mm et une largeur d'encoche de 10mm.

MSlinV4 est un mobile de longueur 104mm, un pas polaire de 48mm et une largeur d'encoche de 8mm. Cette fois le mobile est en acier 1018 (acier inox) et le rail en plexiglas (voir l'annexe1).

On présente dans cette partie les résultats de calcul par FEMM dans les mêmes conditions de fonctionnement de la version précédente.

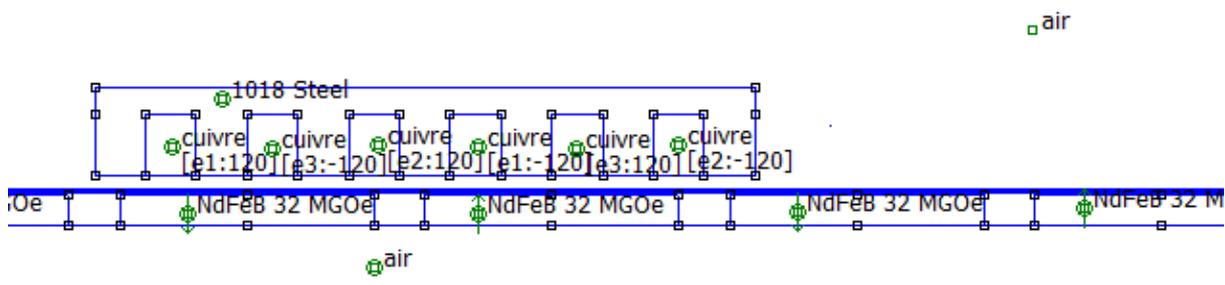
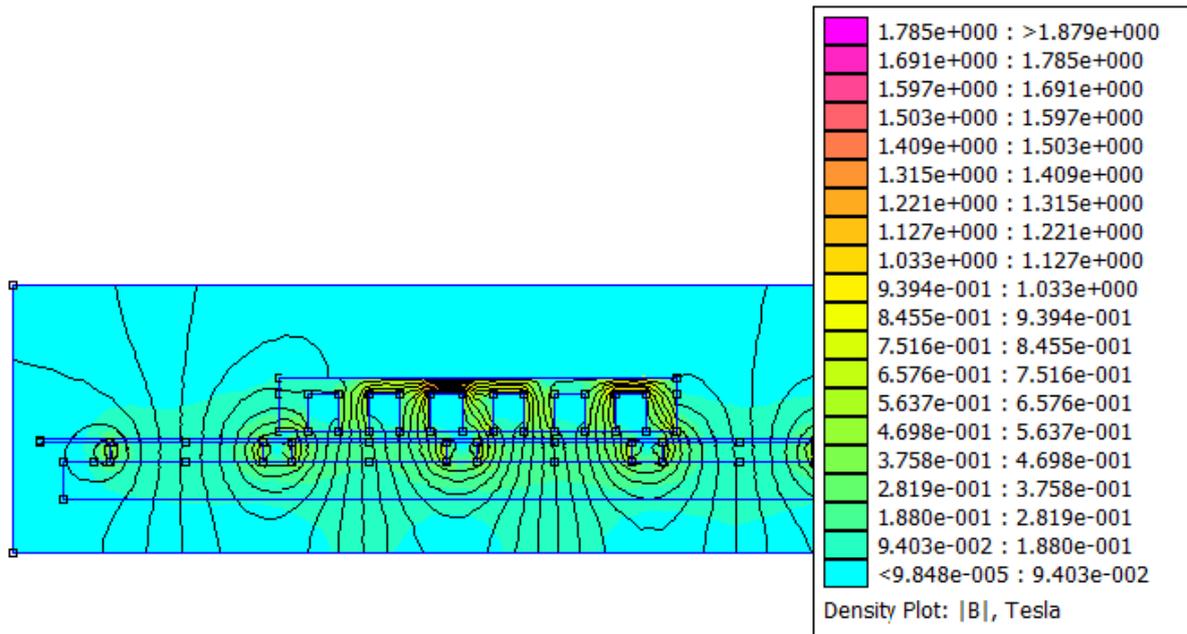


Figure 36. Structure du MSlinV4 définie sous FEMM



**Figure 37. Champ magnétique de MSlinV4 sous FEMM**

La Figure 37 montre que l'induction dans les différentes parties du moteur linéaire est inférieure à 1 Tesla. Nous remarquons toutefois des niveaux d'induction magnétiques forts (presque des saturations) localement au niveau des coins de la partie mobile.

Dans ce qui suit, on va représenter et comparer les résultats de simulation obtenus du moteur linéaire pour valider notre structure.

La Figure 38 et la Figure 39 représentent les efforts tangentiels et normaux respectivement sur un déplacement de deux pas polaires (96mm) et un entrefer constant. On remarque une augmentation importante de la force tangentielle et normale pour cette structure (mobile en acier 1018 peu ferromagnétique et rail en plexiglas), ce qui démontre l'influence du pas polaire et du matériel choisi.

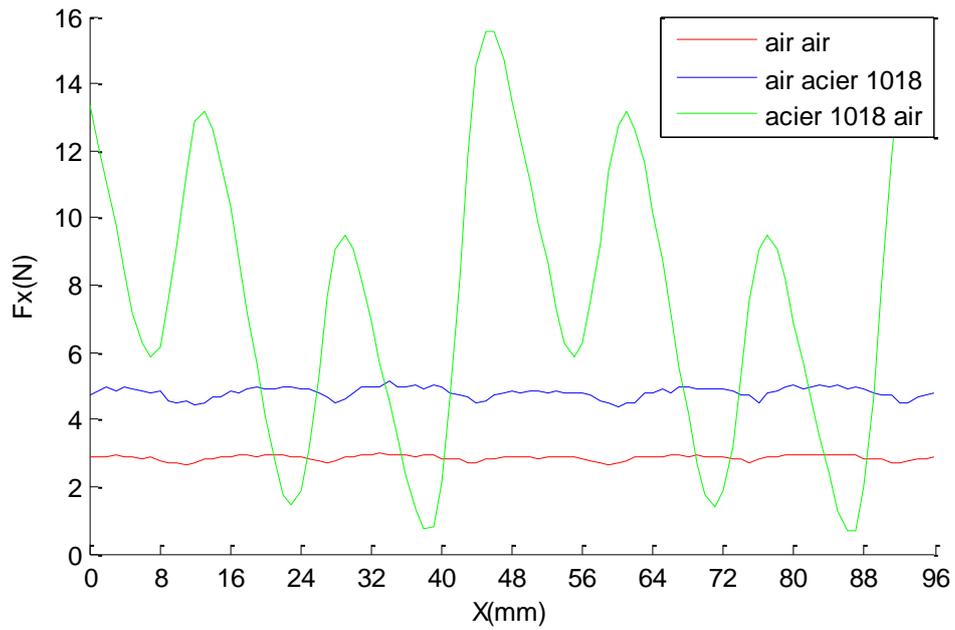


Figure 38. Force tangentielle en fonction de la position pour différentes configurations

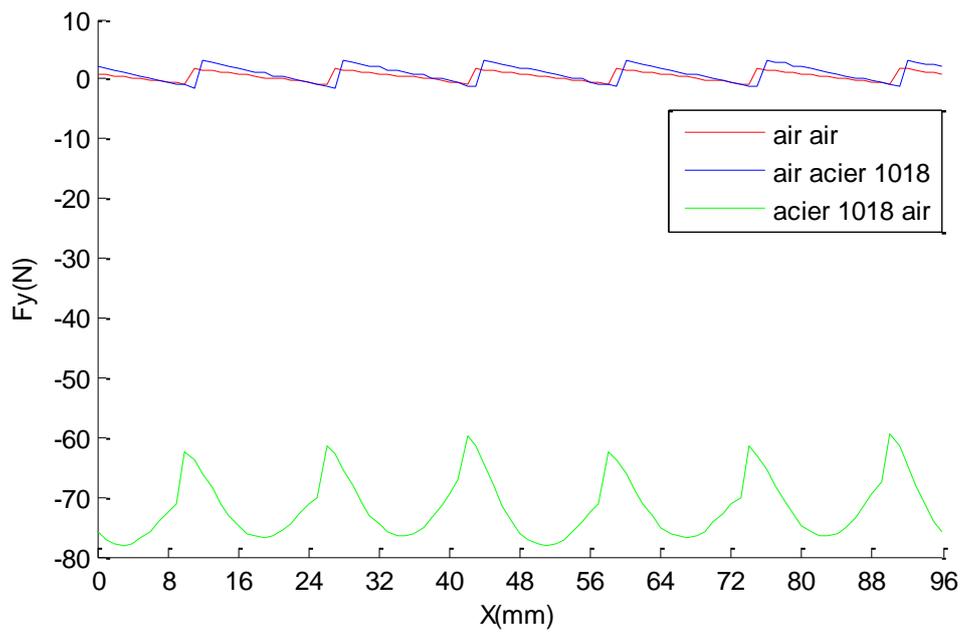
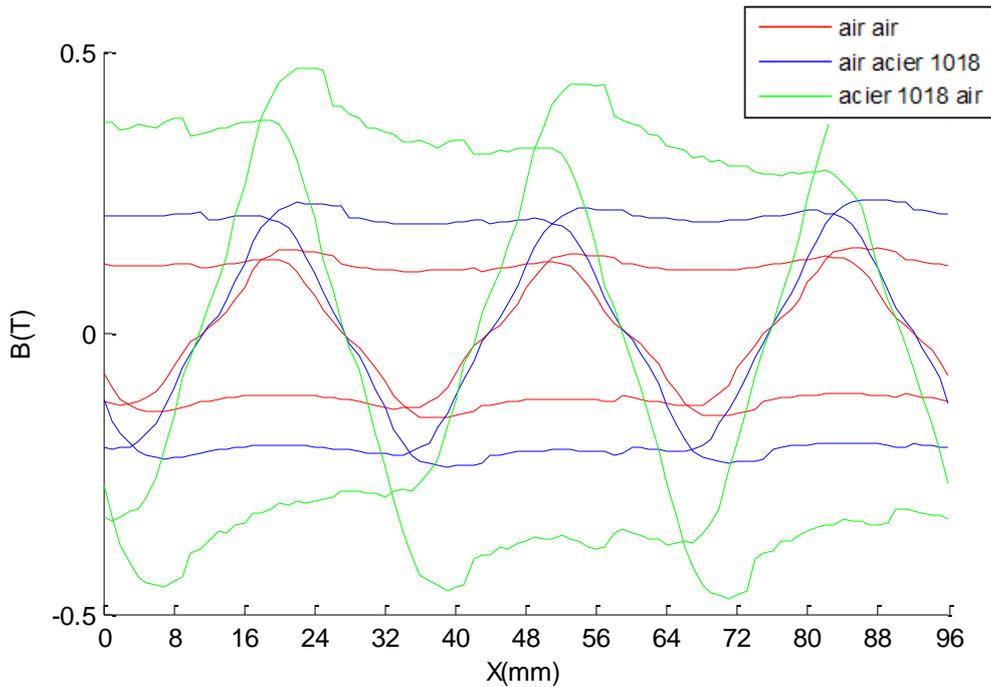
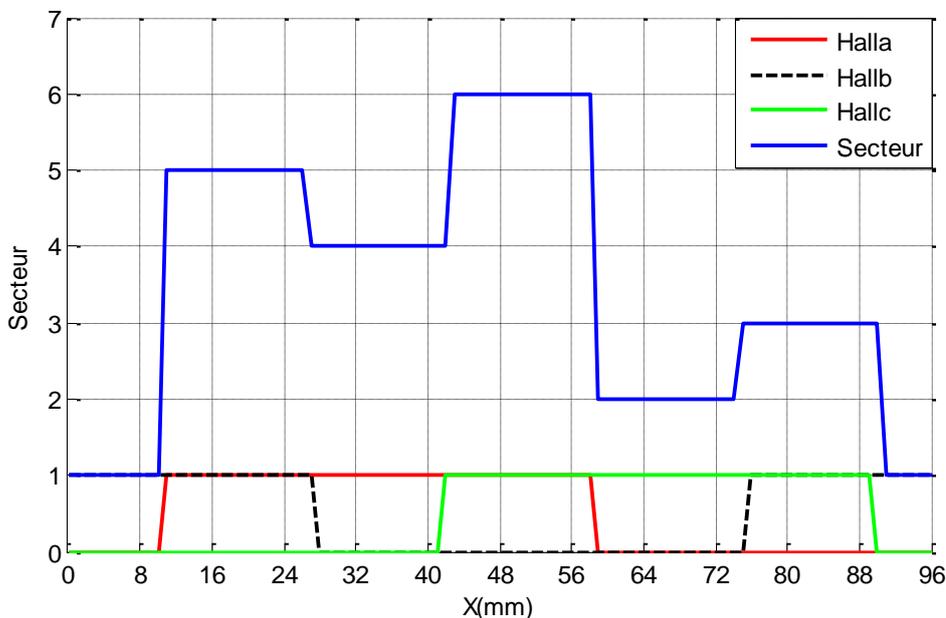


Figure 39. Force normale en fonction de la position pour différentes configurations



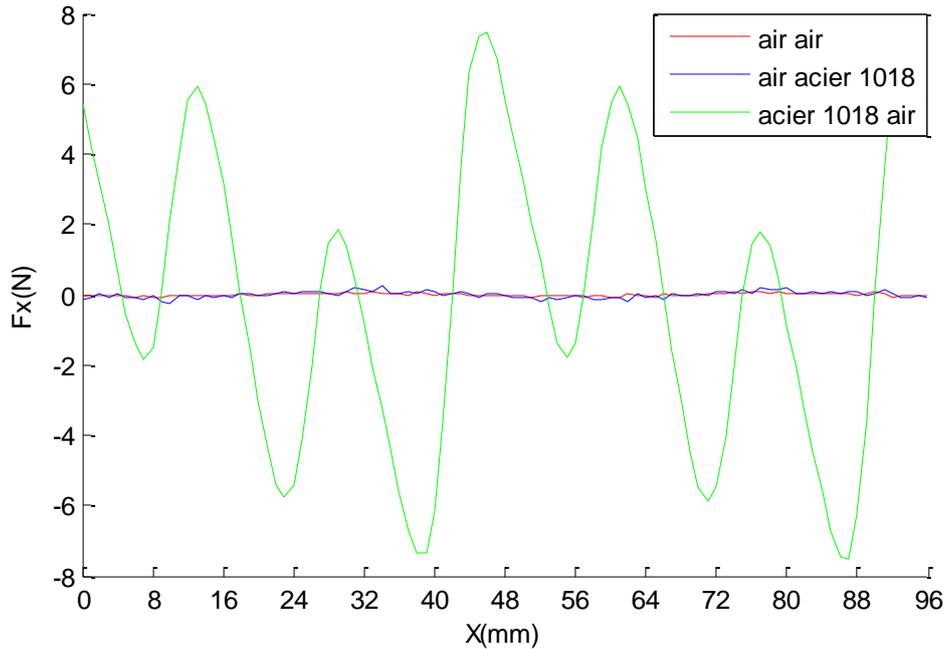
**Figure 40. Induction magnétique au niveau du trois sondes à effet Hall a, b, c pour différentes configurations**

La Figure 40 montre que l'induction magnétique  $B_y$  est correcte au moment où elle s'inverse contrairement au mobile de la version 3 (Figure 29 et Figure 35). Ce qui permet aux sondes à effet Hall de bien détecter les fronts d'inversion de polarité et ainsi de permettre un calcul correct du Secteur (Figure 41).

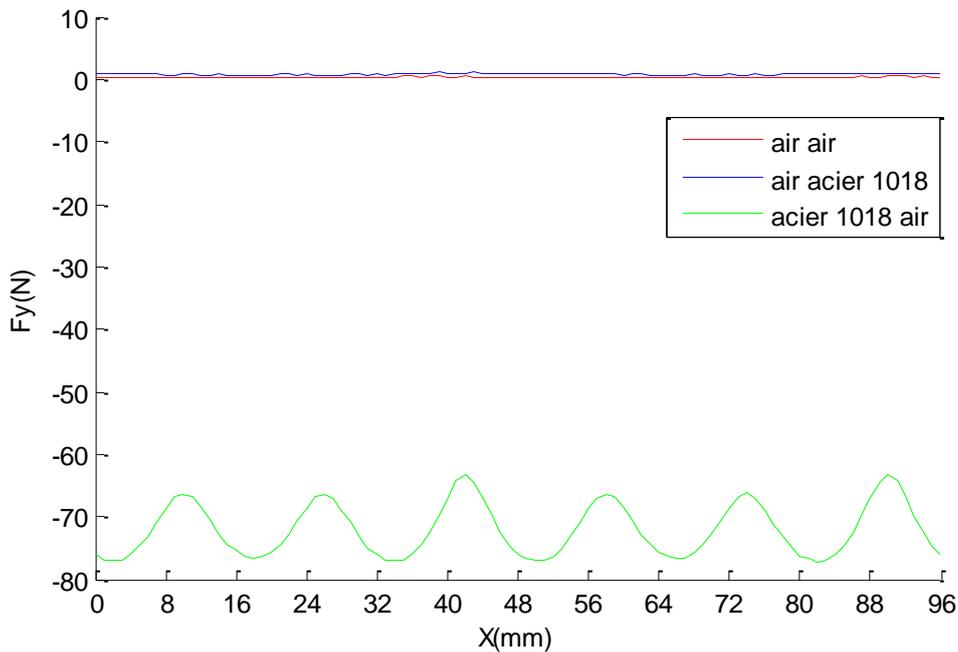


**Figure 41. Sortie des sondes à effet Hall et calcul du Secteur en fonction de la position**

Afin de permettre le calcul de la force de détente, nous refaisons la même étude sous FEMM mais en fonctionnement à vide (ie à  $= 0 A$  ). On a donc bien une force tangentielle de valeur moyenne nulle (Figure 42).



**Figure 42. Force de détente en fonction de la position pour différentes configurations, à vide**



**Figure 43. Force normale en fonction de la position pour différentes configurations, à vide**

On remarque également que l'utilisation de matériaux même faiblement ferromagnétiques ( $\mu_r = 500$ ) augmente sensiblement la force de détente ( 7 N max, Figure 42), pour une force tangentielle maximale de 16 N (Figure 38). Ainsi, la force de détente est souvent négligée dans les systèmes où le moteur va vite, à grande puissance et fort courant, en revanche, pour le fonctionnement à basse vitesse, voir en

positionnement, la force de détente peut devenir du même ordre de grandeur que la force en  $x$ , et donc rendre le contrôle plus difficile et moins précis.

## **9. Conclusion**

On a présenté dans ce chapitre le fonctionnement de la méthode des éléments finis et son application pour l'analyse des champs électromagnétiques, dans une section longitudinale d'un moteur linéaire synchrone à aimants.

Tout d'abord, la méthode des éléments finis en 2D est utilisée. Ce qui permet de mettre en évidence les effets de bords du mobile (asymétrie entre les phases) et des problèmes qui n'existent pas dans une machine ronde, comme la force de collage (force normale) qui est nettement supérieure à la force de traction.

Un choix adéquat des matériaux, du dimensionnement et du positionnement des capteurs à effet Hall est nécessaire pour un bon fonctionnement de telles machines.

Nous avons montré dans cette étude, à travers différentes configurations et études par éléments finis, que pour notre système, une combinaison acier 1018 – air et un pas dentaire de 8mm ainsi qu'un pas polaire de 48 mm permettaient d'avoir un bon compromis entre la force tangentielle/force de détente et l'allure de l'induction perçue par les sonde à effet Hall.

Ce résultat important a requis beaucoup de temps et a conduit à la fabrication d'un nouveau rail et d'un nouveau circuit magnétique du mobile, passant de la version 3 à la version 4.

C'est cette version qui sera utilisée par la suite pour l'estimation de la position et pour son contrôle.

## *Chapitre IV*

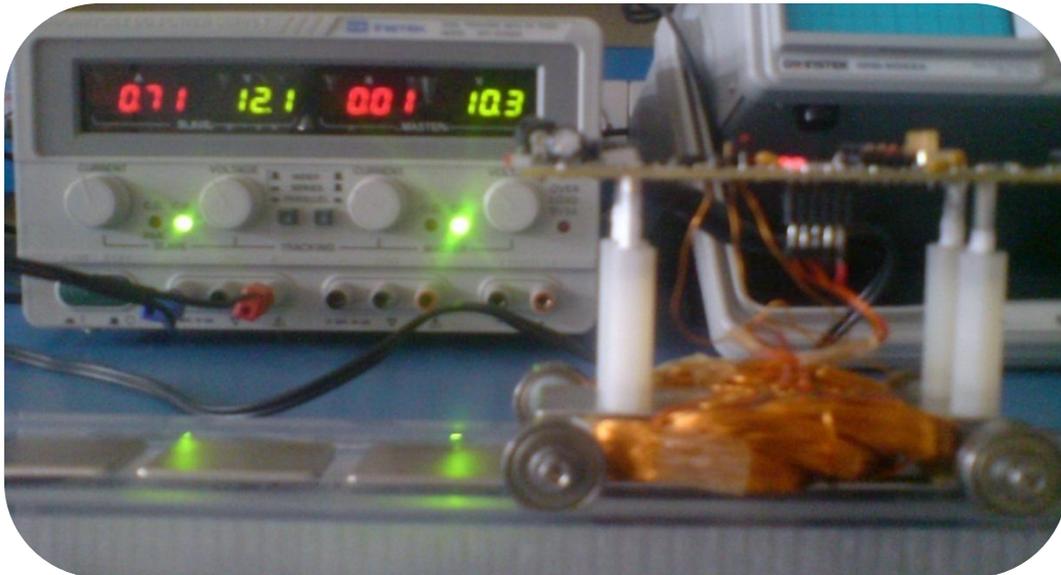
*Réalisation de la structure choisie  
(MSlinV4)*

## 1. Introduction

Après avoir présenté les différentes structures et le mode de la commande basée sur les capteurs effet Hall pour les deux types de moteur linéaire (MSlinV3 et MSlinV4), nous allons maintenant nous intéresser à l'étape de réalisation de l'actionneur. Un prototype permettra de mener l'étude de la validation expérimentale et de mettre en œuvre les algorithmes d'estimation de la position. Les technologies utilisés, les schémas et les programmes sont disponibles en annexe.

Le MSlinV4 comporte une carte électronique sur laquelle sont montés les différents composants et un bobinage triphasé monté sur la structure acier 1018 calculée précédemment.

Le MSlinV4 est muni de deux types de capteur: trois capteurs à effet Hall et un accéléromètre 3-axes de type MEMS. Il est également muni d'un module Bluetooth permettant de communiquer avec le PC, via une interface graphique, ce qui permet de rapatrier les données du MSlin en temps réel mais également de lui envoyer des ordres de pilotage à partir du PC (courant de référence, position de référence, changement des paramètres du régulateur...).



**Figure 44. Prototype MSlinV4 sur son rail**

La Figure 44 représente le moteur linéaire synchrone tel qu'il a été conçu dans le but de permettre de confirmer de manière expérimentale les résultats de l'étude du dimensionnement et surtout de commander le moteur en position. La commande repose sur la détermination correcte du secteur assurée par les sondes à effet Hall. La Figure 45 permet de vérifier cette variable.

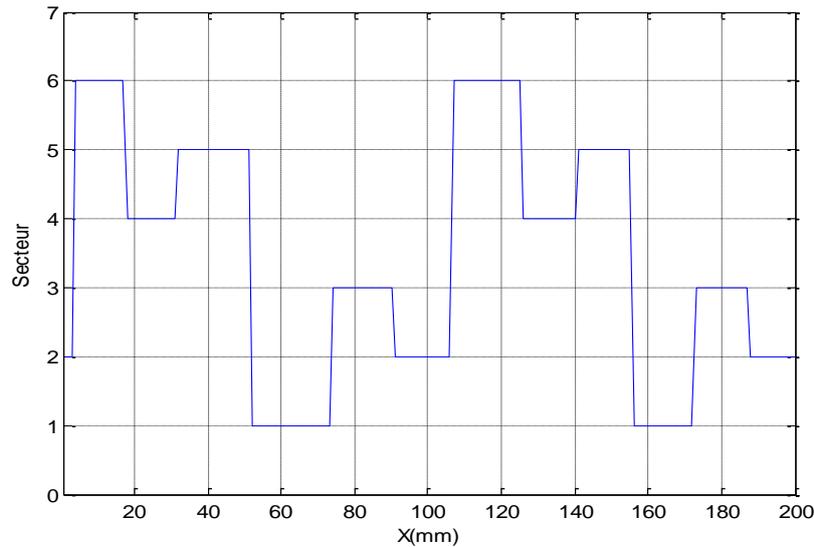


Figure 45. Secteur en fonction de la position à l'aide de l'interface graphique (relevé expérimentale)

$$\text{Secteur} = 2^0 \cdot \text{Hall } a + 2^1 \cdot \text{Hall } b + 2^2 \cdot \text{Hall } c$$

Cette variable prend donc bien les valeurs (3, 2, 6, 4, 5, 1) sans parasites.

## 2. Mode de pilotage du MSlin

Cette partie consiste à programmer des routines permettant de piloter notre mobile en mode automatique. Pour ce faire, nous avons à notre disposition un microcontrôleur de type DSC 16 bits, à savoir le dspic 33FJ128MC804.

Une grande partie de notre projet s'articule sur ce microcontrôleur car nous devons développer les différentes routines qui y seront implantées. Notre encadrant nous a fourni un programme de base qui permet de piloter MSlin (commande 6 secteurs à l'aide des sondes à effet Hall) et d'assurer la lecture de l'accéléromètre, la génération de la MLI et la communication BT.

Notre travail consiste en le développement de routines d'estimation de la position qui soit fiable à l'aide de l'accéléromètre MEMS et du secteur.

Nous allons au préalable décrire le fonctionnement du système.

### 2.1. Boucle de commande

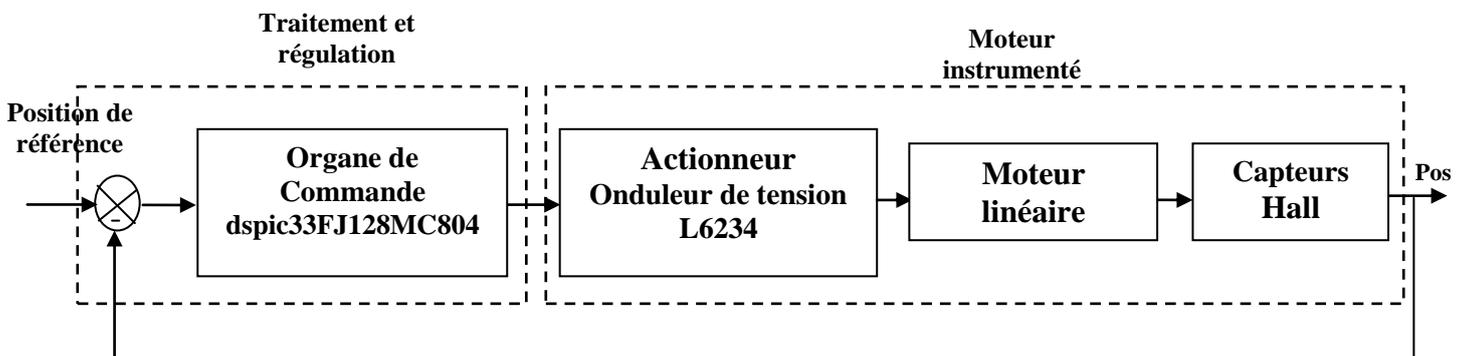
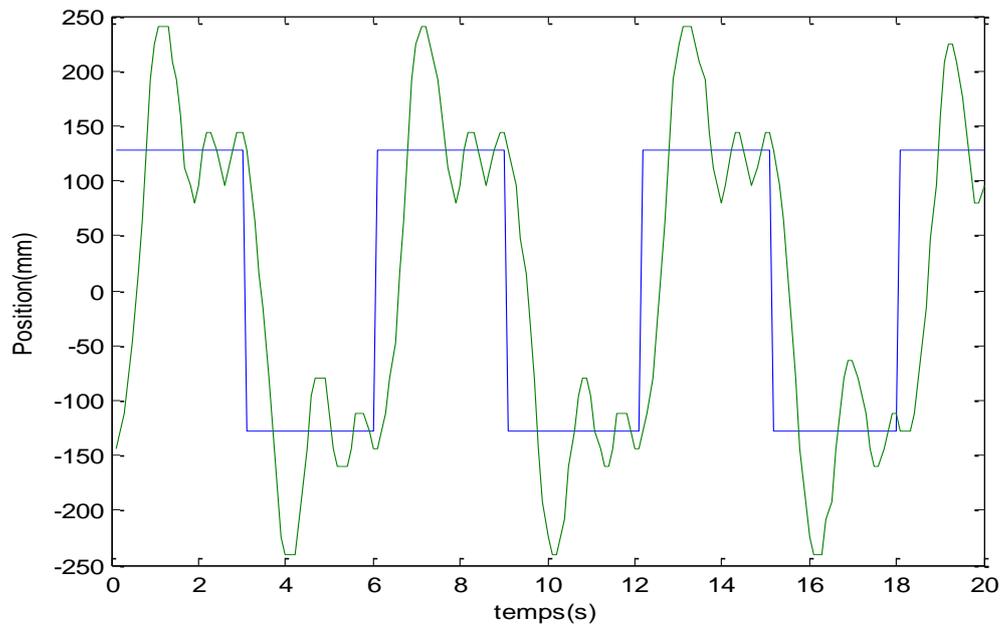


Figure 46. Schéma fonctionnel de la boucle de commande

Voici un exemple de régulation de position. Nous envoyons au microcontrôleur du MSlin, à partir du PC via la liaison Bluetooth, des échelons de position de référence. Il avance et recule alors en conséquent. La résolution dépend des capteurs à effet Hall. Nous avons appliqué le régulateur au système réel dans le programme en langage C. Nous avons procédé à de nombreuses séries de tests qui nous ont permis de définir les trois de paramètres régulateur (Figure 47).



**Figure 47. Relevé expérimental d'un essai en régulation de position, échelon de position de référence entre -130 et 130 mm**

Il est possible d'effectuer des tests en changeant les coefficients du PID sans avoir à reprogrammer le microcontrôleur (Figure 48).

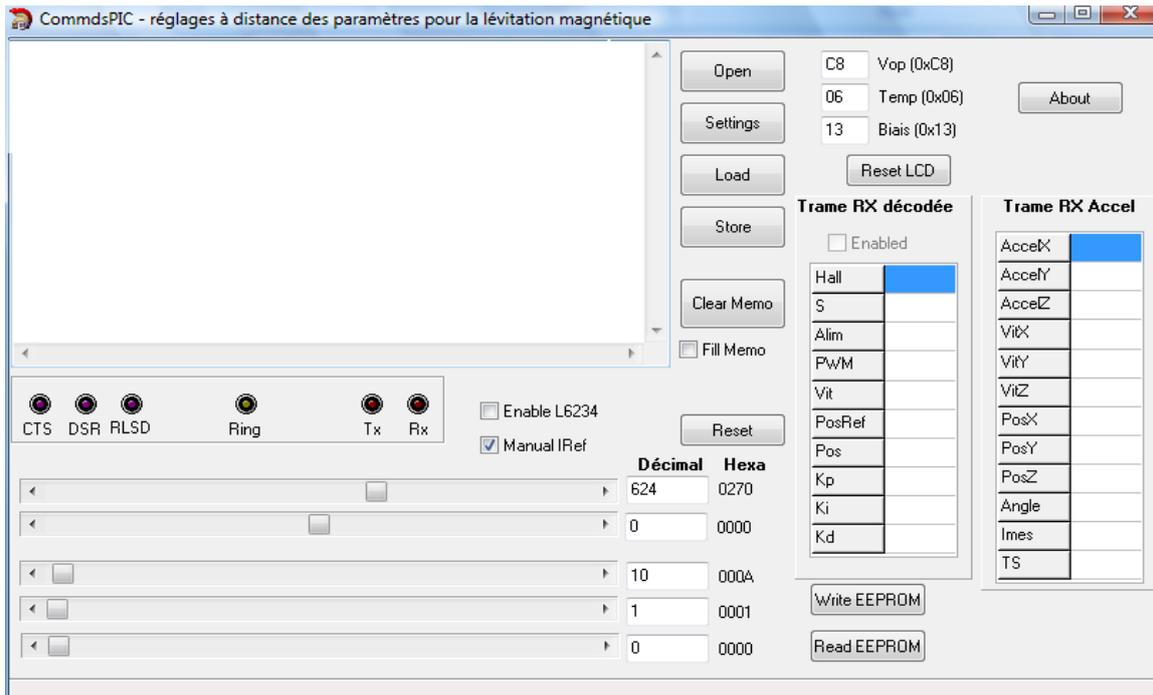


Figure 48. Interface graphique Commande dspic qui permet la communication avec le MSlin

### 3. Régulateur PID:

Lorsque l'on souhaite atteindre une certaine vitesse, position, angle..., il est donc très souvent nécessaire d'avoir recours à un contrôleur, c'est à dire un régulateur capable d'atteindre et de maintenir une consigne en utilisant une mesure directe ou une estimation, comme grandeur de retour.

Le régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID), est un contrôleur de système en boucle fermée. Il essaye de corriger l'erreur calculée entre une variable mesurée à la sortie du contrôleur et une consigne donnée en entrée, en calculant une action adaptée sensée ajuster la sortie du procédé. Ce régulateur a fait ses preuves, notamment en industrie où il est très utilisé [16].

Voici la formule donnant la valeur de sortie

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + K_d \cdot \left(\frac{de}{dt}\right)$$

Fonction de transfert en  $p$  :

$$PID(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right)$$

Ce régulateur sera discrétisé en vue de son implantation sur dspic.

## 4. Mesures de la position

La mesure est indirecte, elle s'effectue par la reconstitution de la position du mobile par la lecture des sondes à effet Hall et par l'intégration des signaux de l'accéléromètre MEMS embarqué sur le circuit imprimé du mobile. Dans un premier temps, on s'intéressera aux trois capteurs à effet Hall. Dans un second temps, nous déterminerons la position à l'aide d'un estimateur. On doit donc estimer les positions intermédiaire entre deux changements de secteurs (dans notre cas :16 mm). Enfin, on utilisera un accéléromètre pour récupérer l'accélération absolue et la traiter pour avoir la position.

### 4.1. Mesure de la position basée sur les sondes à effet Hall

Les 3 sondes à effet Hall permettent de calculer le secteur dans lequel on se trouve et ainsi connaître la position du mobile. A mesure que le mobile se déplace de secteur en secteur on augmente (ou on diminue s'il va en sens inverse) la variable Position de 16 mm. Certes, ce n'est pas un capteur très précis en comparaison à ce qui pourrait être utilisé pour estimer la position (erreur de position systématique importante)

L'allure de la position absolue en fonction de temps, à vitesse relativement constante, prend la forme de la Figure 49.

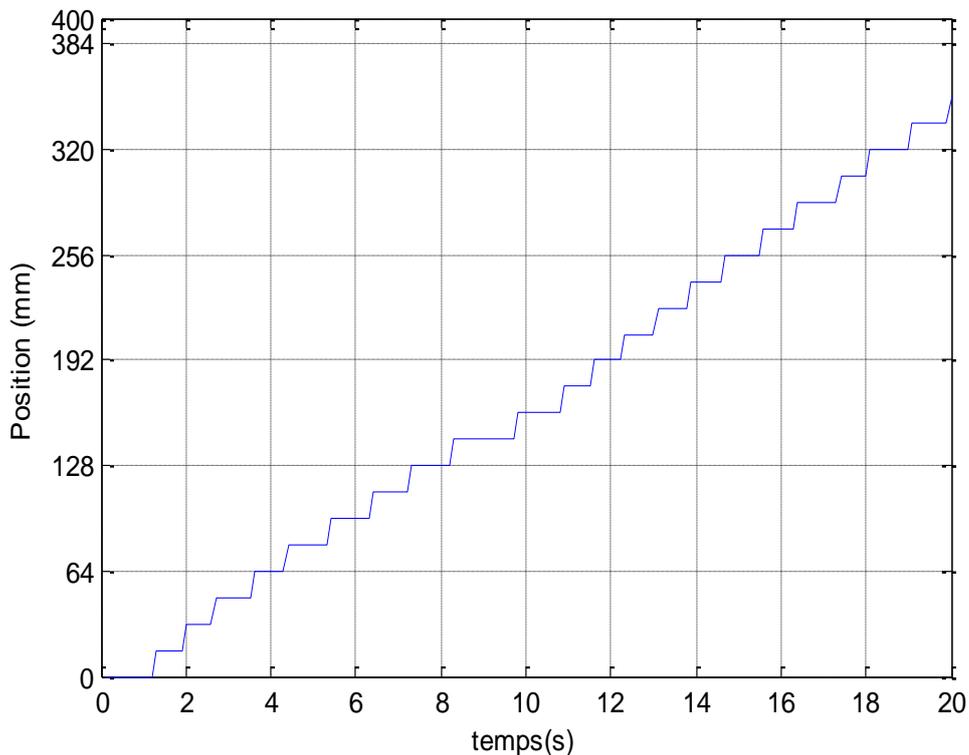


Figure 49. Caractéristique de la position issue du secteur en fonction du temps

Le traitement de la position se fait dans la routine Regul() qui s'exécute à chaque 10ms, or l'envoi par l'UART se fait à  $T_s=100ms$  à cause du nombre de données à

envoyer. Ce système peut être optimisé si le besoin se fait sentir en passant à une transmission propriétaire de type nRF24L01 à moins d'une 1ms [18].

#### 4.2. Estimateur de position

Pour estimer sa position, ce mobile dispose de deux types d'information :

- Une information sur sa position absolue qui provient par la variable secteur c'est-à-dire à chaque changement de secteur, on a un pas de déplacement de  $16mm$  sous forme d'un escalier (que nous appellerons  $Pos$ ).
- Une information sur sa position intermédiaire (que nous appellerons  $x_{obs}$ ), avec cette information, on utilise le calcul suivant :

Par définition, la vitesse est la dérivée de la position de l'objet par rapport au temps (que l'on notera  $t$ ). Donc c'est le rapport de la distance parcourue (la variation de deux positions consécutives) au temps écoulé.

$$Vitesse\ moyenne\ du\ parcours = \frac{distance\ parcourue}{temps\ de\ parcours}$$

$$v = \frac{dx}{dt} \leftrightarrow \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$v = \frac{Pos - OldPos}{\Delta t}$$

A partir de cette équation de la vitesse on définit la position observée " $x_{obs}$ " qui est la position intermédiaire entre deux changements de secteur. L'intégration numérique, à chaque pas de calcul  $\Delta t$ , s'écrit en programmation:

$$x_{obs} = x_{obs} + v * \Delta t \quad (1)$$

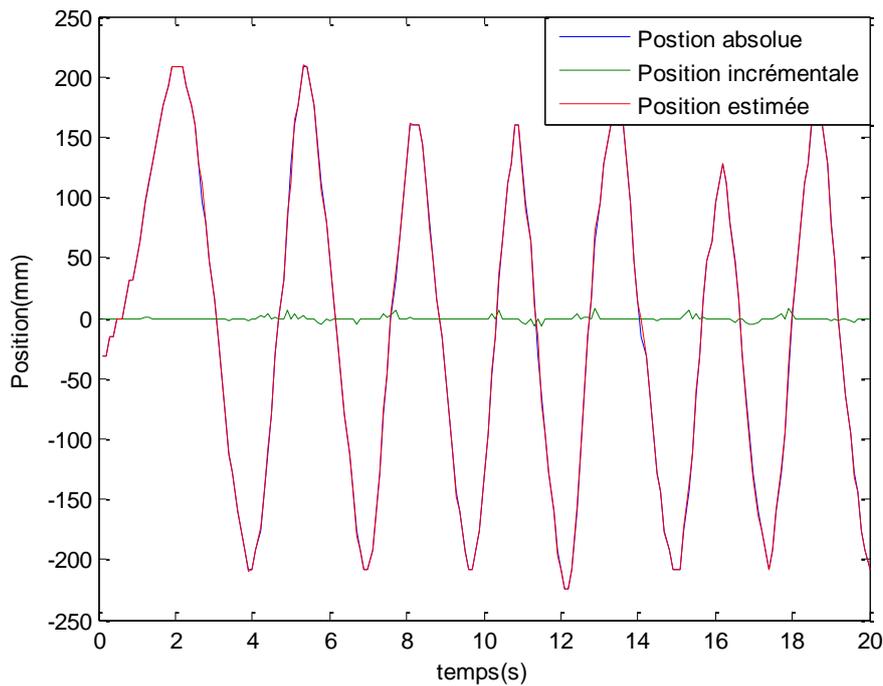
On peut ainsi calculer la position estimée. Cette position est définie par la somme de la position absolue et la position intermédiaire (entre deux changements de secteurs) du notre moteur linéaire.

$$Position\_estimée = Pos + x_{obs} \quad (2)$$

On remet à zéro la position observée " $x_{obs}$ " à chaque fois qu'on change de secteur (voir routines en Annexe 5). Cet estimateur est simple et devrait fonctionner correctement si la vitesse est suffisamment grande et ne varie pas de trop mais en fonctionnement en positionnement cela peut poser des problèmes comme nous le verrons par la suite.

La Figure 50 représentent les résultats obtenus après implémentation de la routine de l'estimation de la position.

Cet essai expérimental est effectué en bougeant à la main le mobile de +/- 200 mm autour de la position initiale.



**Figure 50. Position absolue, incrémentale et position estimée**

### 4.3. Mesure de la position à partir de l'accéléromètre

Un des objectifs du projet est de mettre en évidence la possibilité d'estimer la position à partir de l'accélération MEMS. Une présentation, même rapide, de cette technologie s'impose.

L'abréviation MEMS provient de l'anglais **M**icro **E**lectro **M**echanical **S**ystems. Les accéléromètres mesurent l'accélération, suivant leurs axes. Ces capteurs peuvent être mono, bi ou triaxial (dans notre cas 3 axes). On distingue plusieurs technologies pour mesurer l'accélération. Le principe de tous les accéléromètres est basé sur la loi fondamentale de la dynamique  $F = M \cdot a$  ( $F$ :force,  $M$ : masse,  $a$ : accélération aussi notée  $\gamma$ ). Bien que l'accélération soit définie en  $m/s^2$ . La majorité des documentations sur ces capteurs expriment l'accélération en "g".

#### 4.3.1. Principe de fonctionnement d'un accéléromètre MEMS

L'accéléromètre MEMS est composé de deux peignes complémentaires conducteurs électriques en Silicium. Le système de mesure repose sur des lamelles de silicium intercroisées, dont une partie est fixe et l'autre mobile suivant un axe défini, suspendu à une lamelle flexible et constitue une masse sensible à l'accélération. Le peigne mobile peut se déplacer d'une vingtaine de nanomètres par inertie lorsque l'accéléromètre change de vitesse (Figure 51).

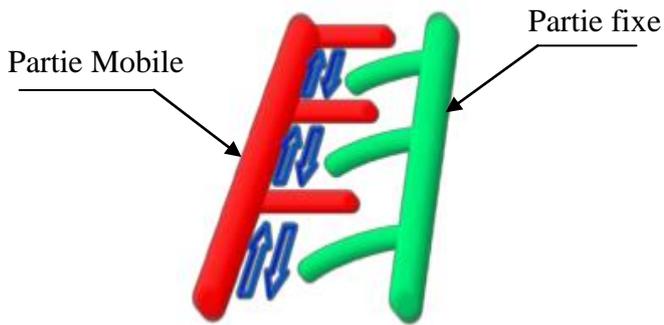


Figure 51. Accéléromètre MEMS [19]

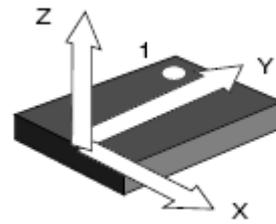


Figure 52. Accéléromètre 3 axes [7]

Notation :

*axe x* : est à l'horizontale, dans le cas d'un repère direct, il pointe vers la droite du mobile.

*axe y* : est à l'horizontale, il pointe vers l'arrière du mobile.

*axe z* : est à la verticale, il pointe vers le haut du mobile

Les applications de ce capteur sont très diverses :

- La mesure de vitesse (par intégration)
- La mesure de déplacement (par double intégration)
- Le diagnostic de machine (par analyse vibratoire)
- La détection de défaut dans les matériaux (en mesurant la propagation d'une vibration à travers les matériaux).
- La mesure de l'inclinaison

#### 4.3.2. **Les sources d'erreurs sur les mesures**

Les erreurs possibles se répartissent en : erreurs propres à l'appareil (exemple : bruit de sortie), relatives à la vitesse et à la position mesurée (exemple : du bruit obtenu quand la vitesse est faible ou constante), imprécision de montage, erreurs dues aux pentes, à la pesanteur, aux vibrations et aux chocs...

Il est à noter que l'accéléromètre donne l'accélération totale (accélération gravitationnelle). Donc, il faut être capable de soustraire la gravitation avant l'intégration pour trouver la vraie valeur de la vitesse et de la position du mobile.

### 4.3.3. Influence des pentes

L'accélération mesurée par l'accéléromètre est non seulement relative au repère de l'accéléromètre, mais contient également une accélération parasite liée à la pesanteur.

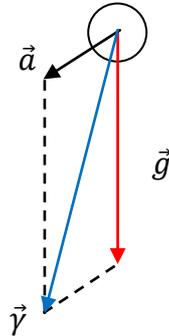


Figure 53. Accélérations perçue par le MEMS [19]

En effet, un mouvement linéaire peut être caractérisé par un vecteur (ici en noir, Figure 53), qu'il suffit de projeter sur le trièdre choisi (par exemple le repère mobile sur lequel on a fixé l'accéléromètre trois axes). Malheureusement il subsiste toujours une accélération due à la pesanteur (vecteur rouge), qui est stable suivant un repère fixe ( $9.81\text{m/s}^2$ ) et qui vient s'ajouter. L'accéléromètre mesure donc cette somme d'accélérations (vecteur bleu) suivant le repère mobile.

### 4.4. Mesure de l'accéléromètre

Comme on l'a vu précédemment, le but de cette partie est de définir l'estimation de la position à partir d'informations issues d'un accéléromètre MEMS. Pour cela on a besoin de récupérer l'accélération de l'actionneur à une fréquence d'échantillonnage de  $10\text{ms}$ ).

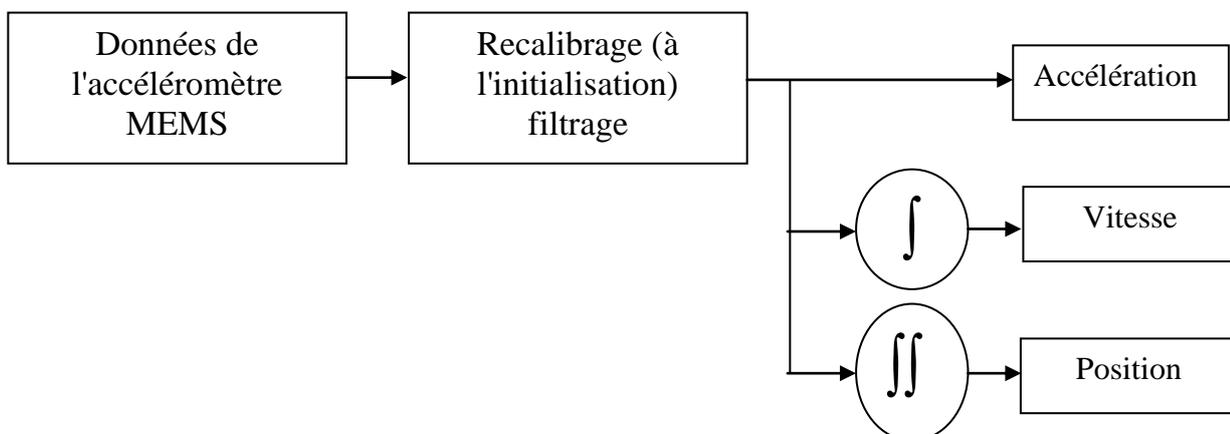


Figure 54. Schéma du principe de traitement des informations de l'accéléromètre pour calculer la position

Tout d'abord, nous effectuons un recalibrage pour que les valeurs obtenues à  $t = 0$  soient dans le même repère, c'est-à-dire à  $t = 0 \rightarrow a = 0$

La Figure 55 représente la mesure de l'accélération suivant l'axe du mouvement avant calibrage et après calibrage. Donc, l'utilisation de la routine « calibrate » au niveau du dspic fournit une meilleure mesure mais avec beaucoup de bruit. On note que l'accéléromètre est plus précis en basse fréquence qu'en haute fréquence (trop sensible aux vibrations).

Il nous faut par la suite filtrer ces mesures pour extraire l'information.

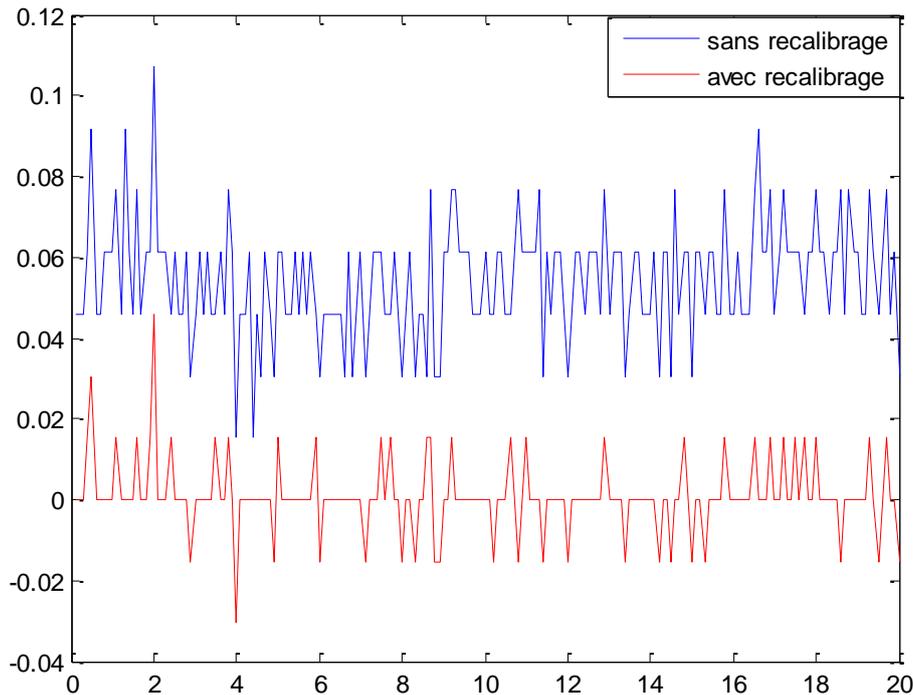


Figure 55. Mesure des accélérations avant et après calibrage au repos

## 5. Filtre passe-bas

Les accélérations mesurées ainsi que les vitesses et les positions calculées sont mesurées et calculées à chaque pas d'échantillonnage. Les perturbations et bruits sont propagés dans les calculs et nuisent à la qualité des informations obtenues. On fera donc appel à un filtre passe-bas pour obtenir de meilleures données, éliminant ainsi l'effet du bruit.

Le filtre passe-bas est un dispositif qui donne une réponse en fréquence relativement constante (gain fixe) aux basses fréquences et un gain décroissant aux fréquences supérieures à la fréquence de coupure. La décroissance plus ou moins rapide dépend de l'ordre du filtre. On utilise les filtres passe-bas pour réduire l'amplitude des composantes de fréquences supérieures à la celle de la coupure.

En pratique, il est impossible d'obtenir une caractéristique parfaite. En effet, on ne peut que se rapprocher de celle-ci en augmentant l'ordre du filtre.

Considérons le filtre passe-bas [20] suivant dont la transformée  $z$  a pour expression :

$$H(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} (1-a)a^n z^{-n} = \frac{1-a}{1-az^{-1}}$$

$H(z)$  est stable ssi  $|a| < 1$

On recherche une équation aux différences pour implanter numériquement le filtre. En utilisant la transformée en  $z$ , on obtient :

$$\begin{aligned} y(z) &= az^{-1}y(z) + (1-a)u(z) \\ y(n) &= ay(n-1) + (1-a)u(n) \end{aligned}$$

L'algorithme du filtre passe-bas [14] en discret est donc donné par :

$$Y[n+1] = (\text{Coef}[0]*Y[n]) + (\text{Coef}[1]*U[n])$$

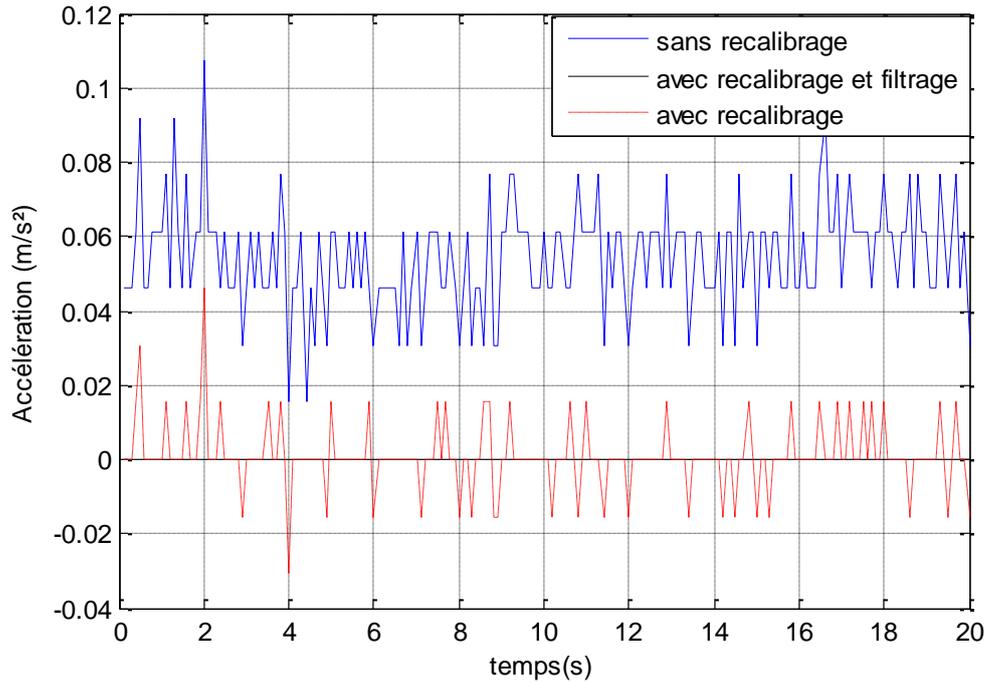
$$\text{Coef}[1] = 1 - \text{Coef}[0]$$

- $Y[n+1]$  : valeur de sortie du filtre.
- $Y[n]$  : valeur précédente de sortie du filtre.
- $U[n]$  : entrée du filtre

Les coefficients ( $\text{Coef}[0]$  et  $\text{Coef}[1]$ ) sont fonction du filtre que l'on veut implanter. La seule condition est que leurs valeurs soient toujours inférieures à 1.

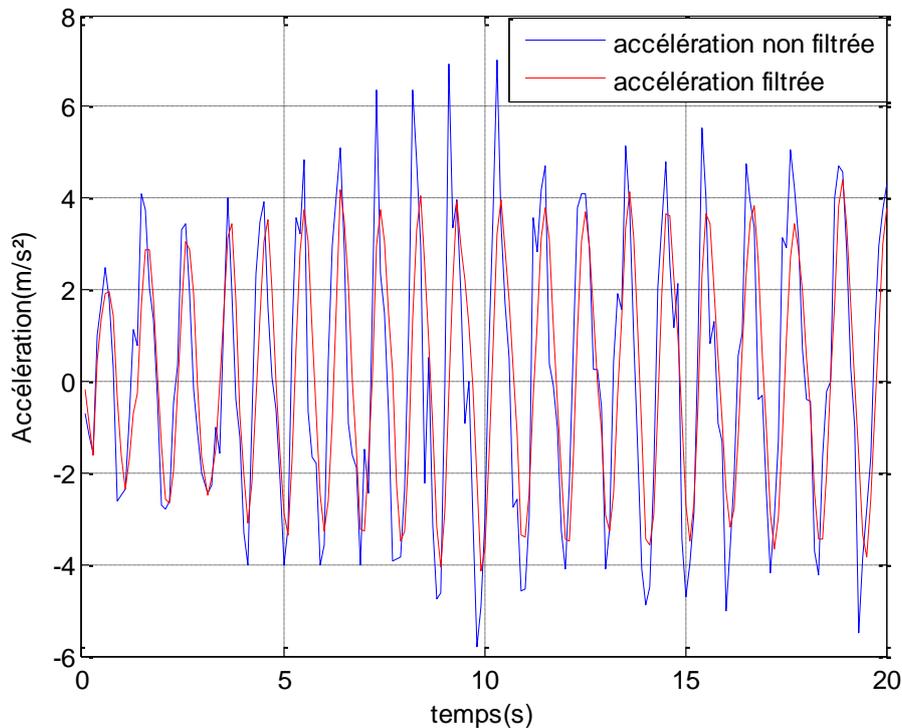
D'un point de vue théorique, rien ne fixe de limite supérieure à la fréquence d'échantillonnage, il est donc possible de la prendre aussi élevée qu'on le souhaite. Pour notre cas la fréquence de coupure  $f_c$  du filtre est de 4.83Hz, on va prendre fréquence d'échantillonnage  $f_e = 1kHz$ . On doit aussi respecter le théorème de Shannon. Donc la période d'échantillonnage est :  $T_e = 0.1ms$ .

La courbes ci-dessous montre en bleu les données brutes, en rouge les données recalibrées et en noir les données recalibrées et filtrées.



**Figure 56. Mesure des accélérations avant et après filtrage au repos**

Le filtre modifie la phase et l'amplitude de ces mesures. Donc, si on cherche à réaliser un filtre passe-bas pour traiter un signal issu d'un accéléromètre pour éliminer le bruit haute fréquence de ce signal, il faut que le déphasage soit presque nul pour que le signal soit exploitable sinon il contribue à fausser les calculs.



**Figure 57. Mesure de l'accélération suivant l'axe de mouvement**

### 5.1. Intégration des données de l'accéléromètre

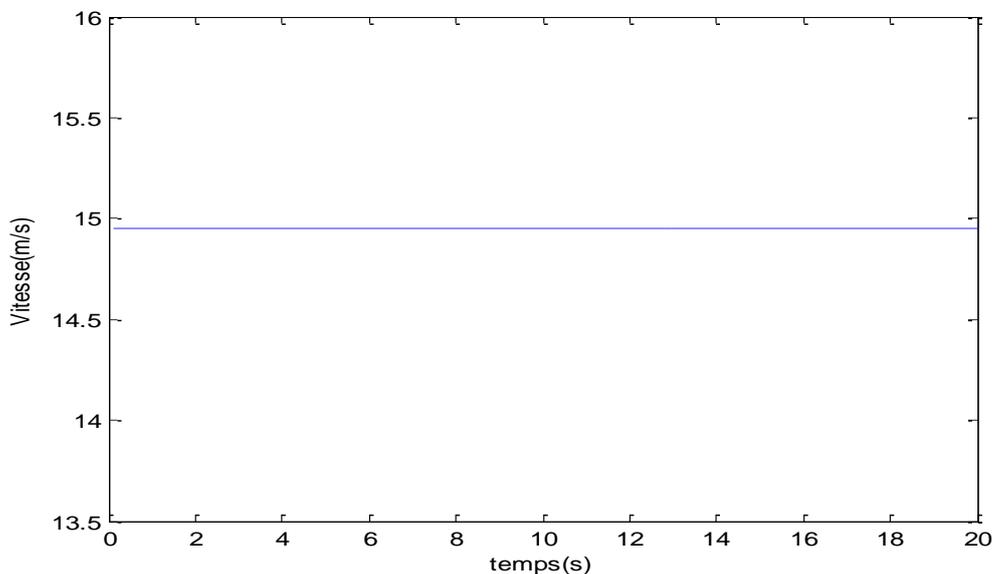
Après le recalibrage et le filtrage, nous nous intéressons à l'intégration des données afin de calculer la vitesse et la position. La formule qui permet de passer de l'accélération à la position passe par l'écriture de la vitesse instantanée.

$v = \int a. dt = a. t + v_0$  Où  $v_0$  est la vitesse initiale.

$$x = \int v. dt = \int (a. t + v_0). dt = \frac{1}{2} a. t^2 + v_0. t + x_0$$

Où  $x_0$  représente la position initiale.

La Figure 58 représente l'intégration de l'accélération (après recalibrage et filtrage) au repos suivant l'axe du mouvement



**Figure 58. La vitesse de mobile issue de l'accéléromètre au repos**

Comme évoqué dans la partie traitement de données accélérométriques, le filtre passe-bas va nous permettre de filtrer les bruits de notre signal afin de définir la vitesse et la position du notre mobile à chaque pas d'échantillonnage, mais les données de l'intégration sont totalement fausses. Même si, lors du recalibrage, le capteur était parfaitement fixe et horizontal (aucune vibration, aucun mouvement), à cause de l'inclinaison du rail sur la table, qui n'est pas constante, cela entraîne une dérive. Donc, le décalage inhérent à ce type de capteur ne permet pas d'obtenir, par intégration, une vitesse puis une position stable. Plusieurs solutions ont été envisagées pour résoudre ce problème :

### 5.1.1. *Solution 1*

Dans un premier temps, on a augmenté le temps d'acquisition des données accélérométriques à 100ms pour voir si la conversion se stabilise. Si la mesure est stable, on peut réduire le temps d'acquisition progressivement à 10ms afin d'avoir le temps le plus court possible.

### 5.1.2. *Solution 2*

On a utilisé un deuxième filtre passe-bas au niveau de la variable « Accel\_VitY » (c'est la vitesse calculée à l'aide de l'accéléromètre) donc c'est une intégration et un filtre.

### 5.1.3. *Solution 3*

L'idée est comment isoler l'accélération due à la pesanteur des accélérations du mobile par rapport à son repère terrestre. Pour cela, on calcule une estimée de la composante gravité sur l'axe de déplacement, et ce, en faisant la moyenne des mesures sur un intervalle en milli secondes. On aura donc estimé le vecteur d'accélération correspondant à la gravité, on le note:  $k = kx$ , où  $kx$  représente la valeur moyenne des mesures sur l'intervalle choisi pour l'axe du mouvement  $x$ . Soit  $a = ax$  le vecteur constitué par l'accélération du mobile dans l'intervalle de mesure. On pose  $d = (ax - kx)$  pour représenter la composante dynamique de  $a$ , qui est causée par le mouvement du mobile et non pas par la pesanteur.

Ensuite, on introduit un régulateur *PI* au niveau de la variable «  $d$  ».

$$A_{y_{\text{offset}}} = Kp_{Vf} * d + Xe_{Vf} \quad (3)$$

$$xe_{Vf} += Ki_{Vf} * d \quad (4)$$

Où  $Kp_{Vf}$  et  $Ki_{Vf}$  sont les paramètres du régulateur *PI*

A la fin, on peut calculer la composante horizontale de l'accélération comme suit:

$$\text{Accel\_PBout\_Etal} = \text{AccelY\_PBout} - A_{y_{\text{offset}}} \quad (5)$$

Où  $\text{AccelY\_PBout}$  c'est l'accélération filtrée par un filtre passe-bas (Annexe 4).

Cette partie a montrée qu'on ne peut pas estimer la position à partir de l'accéléromètre car les informations de la première et deuxième solution sont trop divergentes. Et même s'il n'y avait pas une telle divergence comme la troisième méthode qui nous donne une vitesse stable mais avec des informations totalement fausses. Donc, il serait plus efficace d'avoir une solution précise avec laquelle on pourrait faire une estimation de la position et comparer nos résultats puis effectuer une fusion de données pour fusionner deux informations pour une position plus précise.

## 6. Calcul de l'accélération sous Matlab

L'enjeu de cette partie est de mettre en évidence, par la simulation, ce phénomène parasite et essayer de l'enrayer. La fusion de données des deux capteurs (sonde à effet Hall et accéléromètre) et les filtres numériques ajoutés ont permis une stabilisation de l'estimation de la position en présence de signal bruité et d'autre part de valider le fonctionnement de notre algorithme sous MPLAB. Le bruit rajouté est additionnée directement aux signaux d'accélération dans le sens de déplacement, c'est-à-dire qu'il est rajouté là où il l'est en réalité. Dans ce test, le bruit rajouté est gaussien.

D'après la relation fondamentale de la dynamique, on a :

$$\sum F = ma \quad (6)$$

Où  $a$  est l'accélération du mobile de masse  $m$ . Si on appelle  $x$  son déplacement, l'équation (6) devient alors:

$$\sum F = m\ddot{x} \quad (7)$$

La somme des forces est décomposée en la somme des forces utiles, que nous appellerons  $F_x$ , avec la somme des forces perturbatrices au moteur. Dans notre cas, ces dernières sont les forces de frottement  $F_{fr}$ . A partir de l'équation (7), le bilan des forces suivant est ainsi obtenu :

$$F_x - F_{fr} = m\ddot{x} \quad (8)$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}(F_x - F_{fr}) \quad (9)$$

$$\dot{x} = v_x + \gamma_x dt \quad (10)$$

$$x = x + v_x dt \quad (11)$$

Où  $v_x$ ,  $x$  représentent la vitesse et la position du mobile calculée sous Matlab respectivement. Les paramètres sont donnés en Annexe 7.

### 6.1. Programmation des équations sous Matlab

Les différentes équations vue ci-dessus ont été programmées afin d'automatiser le calcul. Pour ce faire, on a utilisé le logiciel FEMM pour calculer la force tangentielle  $F_x$  du mobile suivant le sens de déplacement et le logiciel Matlab pur piloter le logiciel FEMM, intégrer la Relation Fondamentale de la Dynamique (RFD), appliquer les différentes méthodes de filtrage et d'estimation de la position et afficher les résultats.

Après calcul de l'accélération à l'aide de la loi fondamentale de la dynamique pour un mouvement linéaire suivant le sens de déplacement  $x$ , on transforme les valeurs sous Matlab en g (données gravitationnelles) pour avoir les mêmes que celle de l'accéléromètre MEMS embarqué sur le mobile MSlin. Ensuite, on rajoute l'offset et le bruit, afin de simuler les imperfections du capteur MEMS. On doit donc traiter le signal obtenu, par les algorithmes développés précédemment. Une première simulation sous Matlab, sans le recours à la résolution par FEMM, c'est-à-dire en imposant une force de traction constante de 7N, afin de gagner en temps de calcul, donne les résultats des figures suivantes :

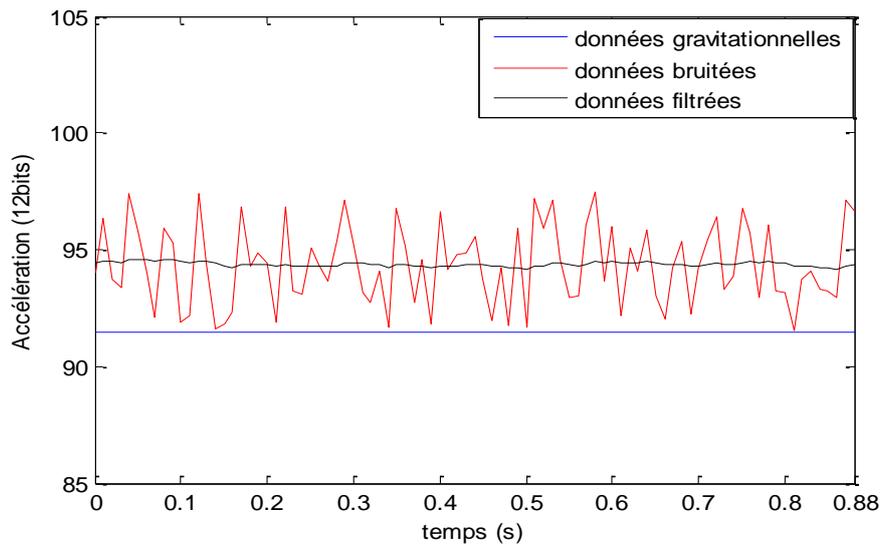


Figure 59. Évolution de l'accélération (données gravitationnelles, données bruitées avec un offset et données filtrées) sur l'axe de déplacement en fonction du temps sous Matlab

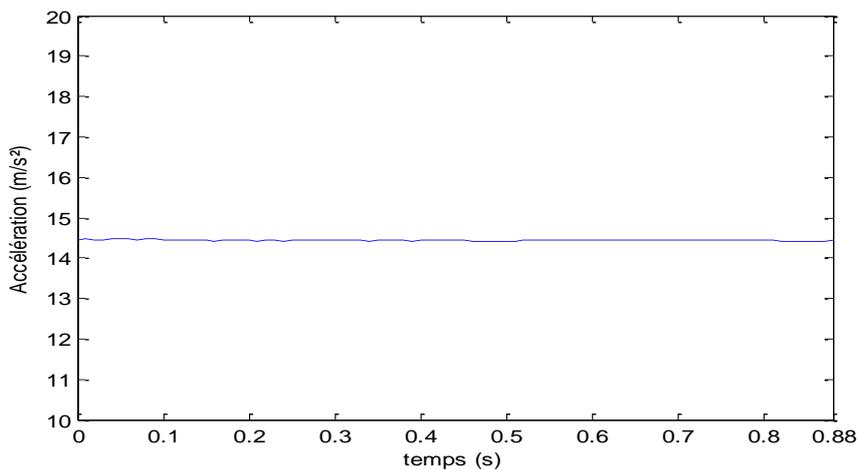
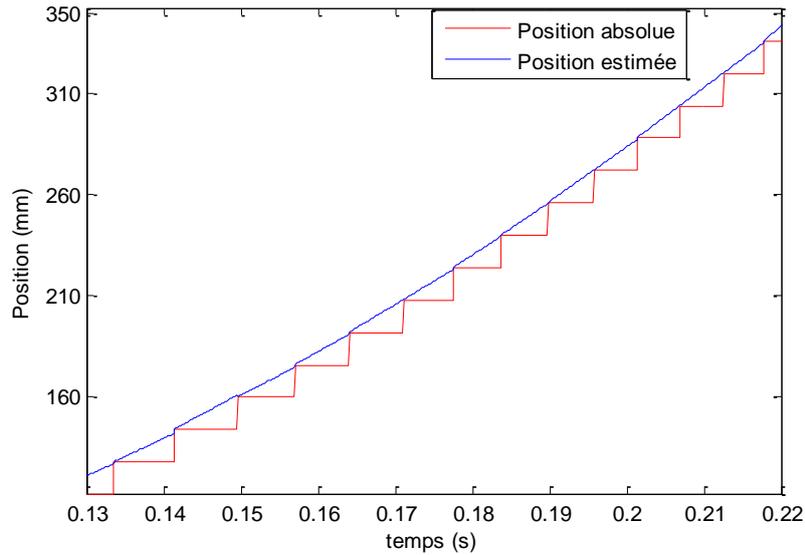
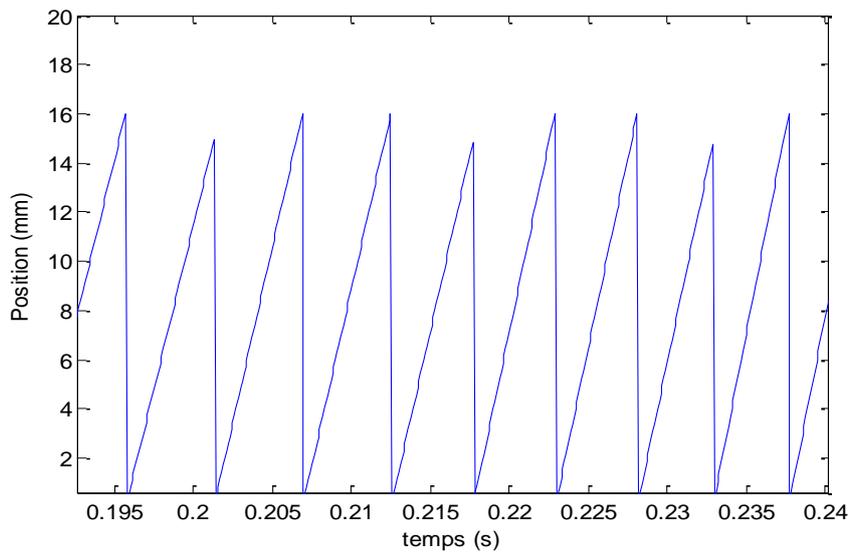


Figure 60. Accélération sous Matlab

Les allures de la position absolue, estimée et incrémentale en fonction du temps, devraient être comme suit :



**Figure 61. Position absolue et position estimée en fonction du déplacement du mobile sous Matlab (Zoom)**



**Figure 62. Estimation de la position intermédiaire (Zoom)**

Grâce au calcul instantané de la vitesse “VitSecteur“ issue de la variable secteur, on calcule la position intermédiaire par la variable “x\_obs“, cette dernière est affichée et tracée en fonction du temps sur la Figure 62. On voit bien que cette valeur se réinitialise à chaque séquence de commutation, c.à.d. à chaque changement du secteur et elle ne peut pas dépasser 16mm ; le pas de déplacement.

Sur la Figure 61 sont représentées la position absolue (en rouge) obtenue grâce à l’information fournie par les capteurs à effet Hall et la position estimée (en bleu) obtenue par la somme des deux informations; absolue et intermédiaire.

Le calcul de la position intermédiaire se fait en se basant sur la vitesse du mobile, calculée entre deux séquences (équation 1 et 2).

## 6.2. Régulation et fonction de transfert

À partir de l'équation fondamentale de la dynamique, le bilan des forces est donné par :

$$F_x - aF_{fr} \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$K \cdot I_{ref} = aF_{fr} s x(s) + m s^2 x(s)$$

$$K = 4 \cdot B_m \cdot N \cdot l_y$$

$$\frac{x(s)}{I_{ref}} = \frac{K}{m s^2 + a F_{fr} s}$$

$$G(s) = \frac{K}{m s^2 + a F_{fr} s}$$

Une fois les différents paramètres de la fonction de transfert identifiés, on peut simuler son comportement sous Matlab afin d'identifier les coefficients du régulateur de position.

Pour la boucle de régulation, nous avons adopté classiquement un régulateur proportionnel-dérivé (PD). Pour des fréquences élevées, la partie dérivée pose un problème majeur de stabilité. Il est donc judicieux d'ajouter un pôle afin de limiter l'effet dérivateur à des fréquences inférieures à la fréquence de pulsation [21]. Le but de ce correcteur est de diminuer le dépassement obtenu en boucle fermée sans diminuer le temps de réponse. Il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité et une action dérivée permette d'anticiper et d'accélérer la régulation.

La fonction de transfert de ce type de régulateur est donnée par la relation:

$$C(p) = \frac{1+TP}{1+aTP} \quad \text{avec } a < 1$$

D'où

$$\begin{cases} a = 0.0463 \\ T = 5.4 \\ K = 0.0726 \end{cases}$$

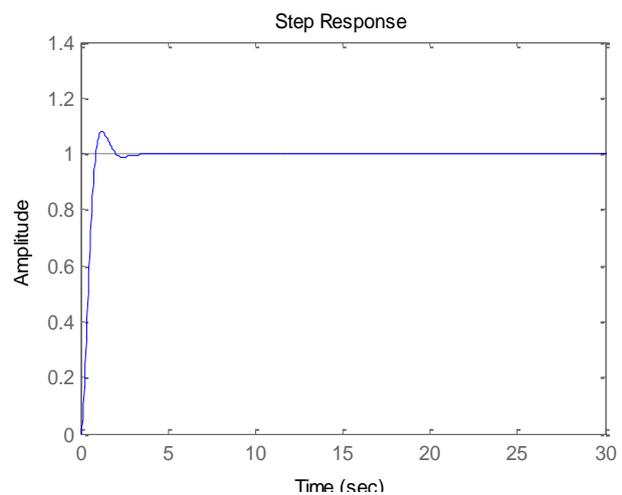


Figure 63. Réponse de G(s) à un échelon (système continu)

### 6.3. Méthode de discrétisation

Un correcteur en temps continu est représenté par une fonction de transfert  $C(p)$ . On cherche alors la représentation discrète de ce correcteur, afin de l'implanter sur notre dspic.

En se basant sur la discrétisation par l'équivalence à la dérivation  $p \leftrightarrow \frac{1-z^{-1}}{Te}$ , avec  $Te = 0.1 \text{ ms}$ , on aboutit à son équivalent discret donné par :

$$y(z) \left[ 1 + aT \left( \frac{1-z^{-1}}{Te} \right) \right] = Kx(z) + K \left( \frac{1-z^{-1}}{Te} \right) x(z)$$

et l'équation récurrente est donnée par :

$$y[k] = \frac{1}{1 + \frac{aT}{Te}} \left( \frac{aT}{Te} y[k-1] + Kx[k] + K \frac{T}{Te} (x[k] - x[k-1]) \right)$$

Algorithme :

$$y[k] = Iref$$

$$y[k-1] = Old\_Iref$$

$$x[k] = e\_xpos$$

$$x[k-1] = old\_e\_xpos$$

$$K_{p\_xpos} = K_p$$

$$K_{d\_xpos} = K_p \frac{T}{Te}$$

$$T_{xpos} = a \frac{T}{Te}$$

ce qui correspond à l'équation de récurrence :

$$Iref = \frac{1}{1 + T_{xpos}} \left( T_{xpos} * Old\_Iref + K_p * e\_xpos + K_d\_xpos(e\_xpos - old\_e\_xpos) \right)$$

Avec :

$Iref$  : courant de référence

$e\_xpos$  : erreur de position

## 7. Méthode proposée pour la régulation de la position

Dans cette partie, on va effectuer des simulations numériques à l'aide du logiciel Matlab et FEMM pour réguler la position du MSlin. On verra deux cas : Dans le premier cas on va tester le régulateur avec l'estimateur de position qui est basé uniquement sur les capteurs à effet Hall pour une position de référence donnée tandis que dans le deuxième cas on va utiliser la technique de la fusion de données qui traite de la combinaison d'informations issues de différents capteurs.

Le régulateur de position du système est sollicité toutes les 1ms alors que le pas de calcul est de  $100\mu s$ . La RFD appliquée au mobile simulé sous Matlab et couplé avec FEMM. Pour chacun des deux cas d'estimateurs, on testera avec une force calculée avec la formule de la force de Laplace ( $F = 4B_m I N l_y$ ) puis avec le calcul issu de la résolution par éléments finis FEMM (ce qui demande infiniment plus de temps de calcul mais prend en compte les fortes non-linéarités de la force en fonction de la position par rapports aux aimants).

### 7.1. L'évolution de la position et du courant en boucle fermée

Dans cette partie, on va utiliser directement la forme de la force électromagnétique qui s'exprime sous la forme  $F = 4B_m I N l_y$ . La valeur maximale du courant est fixée à  $I = 2A$  et la valeur de l'induction magnétique  $B_m = 0.25T$  ce qui conduit à une force maximale  $F_{max} = 7.2 N$ .

Les paramètres initiaux du régulateur de position sont ceux déterminés dans le chapitre précédent.

Cependant, le meilleur moyen d'ajuster pour trouver les coefficients optimaux du régulateur est d'utiliser la simulation sous Matlab, en s'appuyant sur le modèle développé.

On étudie l'évolution de la position et du courant lors d'un échelon de position de petite (100 mm) et grande valeur (500 mm), avec la structure de la Figure 64.

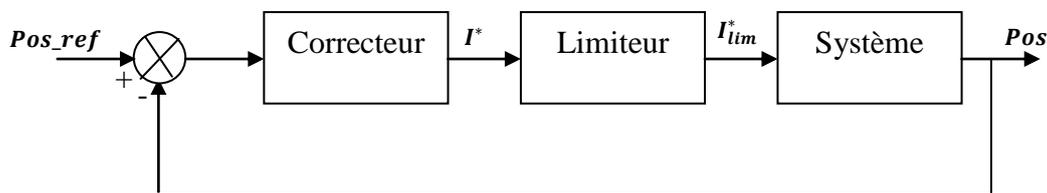


Figure 64. Boucle de régulation de la position  $Pos$

La structure de la régulation de position n'est réalisable de façon fiable que si une limitation de courant délivrée par le dispositif de puissance existe. Il convient donc de contrôler le courant du moteur d'abord pour des raisons de sécurité pendant le régime transitoire ou de surcharge.

Le limiteur réalise

$$(I_{ref} = -I_{max} \text{ si } I_{ref} < -I_{max}) \text{ et } (I_{ref} = I_{max} \text{ si } I_{ref} > I_{max})$$

Puis à l'instant où on applique l'échelon on a :  $\varepsilon = Pos_{ref} - Pos$  grande, alors  $I_{ref}$  est très élevé est donc le limiteur intervient. On va asservir le courant à la valeur maximale admissible pour obtenir l'accélération la plus grande possible. La force tangentielle du mobile croît. Pendant cette phase, le courant est constant.

La vitesse augmente ainsi que la position, puis la commande diminue  $I_{ref}$  jusqu'à désaturer le limiteur et va devenir plus faible que  $I_{max}$ , alors le limiteur cesse d'agir on a la régulation de la position avec un courant de référence inférieur à  $I_{max}$ . La non linéarité du processus conduit à des dépassements plus ou moins importants en fonction de l'importance de l'échelon.

### 7.2. Réglage et choix du régulateur:

Notre fonction de transfert n'étant pas fidèle à la réalité, nous avons dû déterminer les paramètres du régulateur PD par la méthode essai-erreur. Pour ce faire, nous avons procédé de la manière suivante. Nous avons obtenu un premier couple PD (0.03, 5)

permettant une stabilisation du moteur bien que de petites oscillations persistaient. En effectuant davantage de tests, nous avons constaté qu'il n'existait pas un, mais plusieurs coefficients PD dépendant de l'importance de l'échelon. Ces couples de paramètres s'expriment sous la forme approximative  $(0.k, k)$ . Nous avons alors cherché le plus petit coefficient (facteur  $k$ ) permettant une stabilisation effective et robuste et n'entraînant aucune oscillation.

### 7.2.1. Simulation (1) : évolution de la position basée sur l'estimateur

Nous présentons les courbes de simulation de l'évolution de la position suite à un échelon sur sa référence. La simulation (1) ci-dessous a été effectuée avec un estimateur de position basé uniquement sur les sondes à effet Hall.

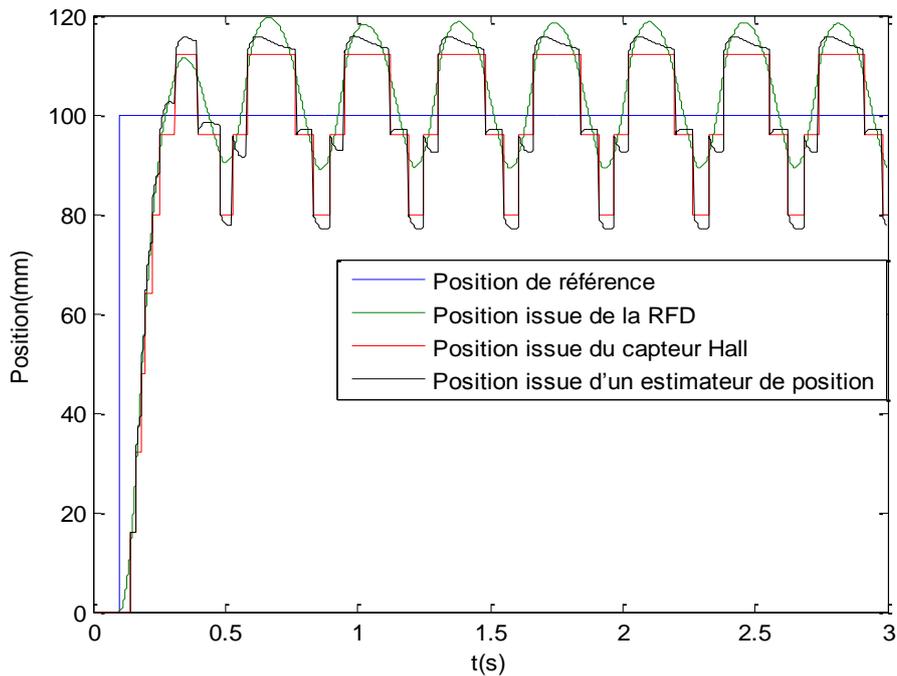


Figure 65. Evolution de la position, échelon de position de référence de 100mm

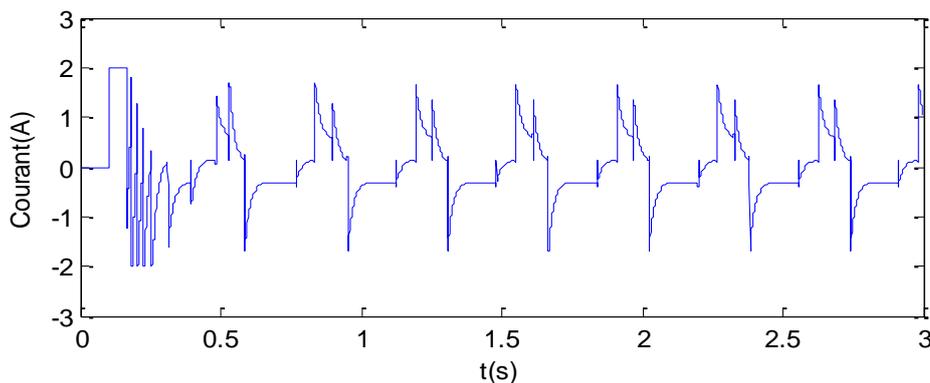


Figure 66. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 100mm

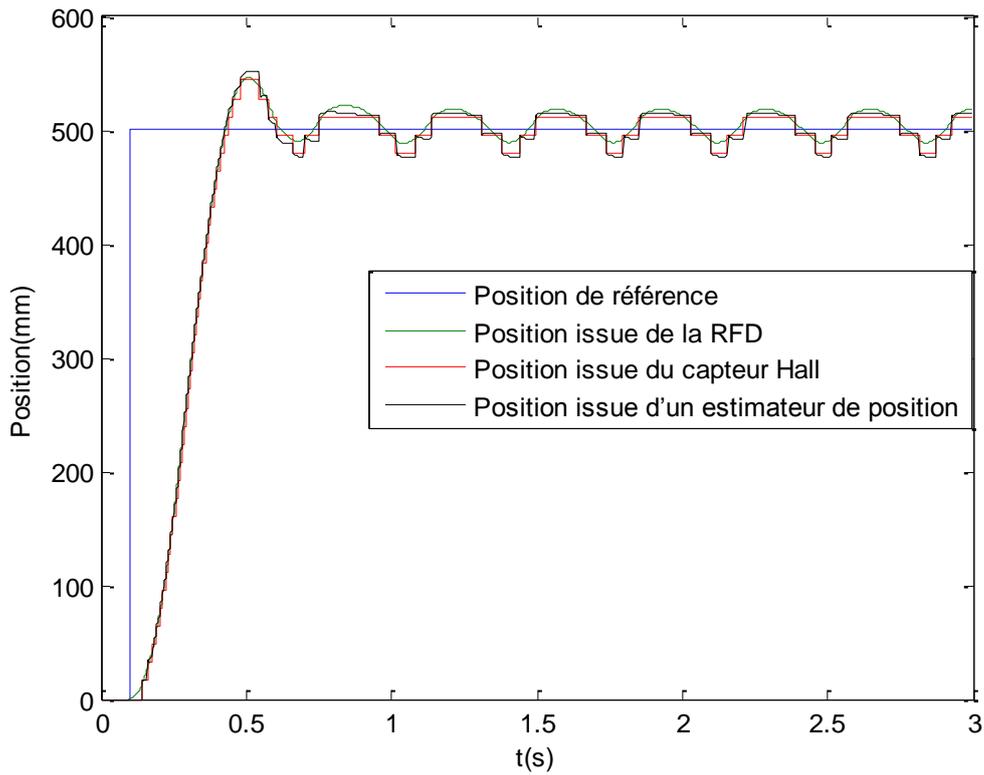


Figure 67. Evolution de la position, échelon de position de référence de 500mm

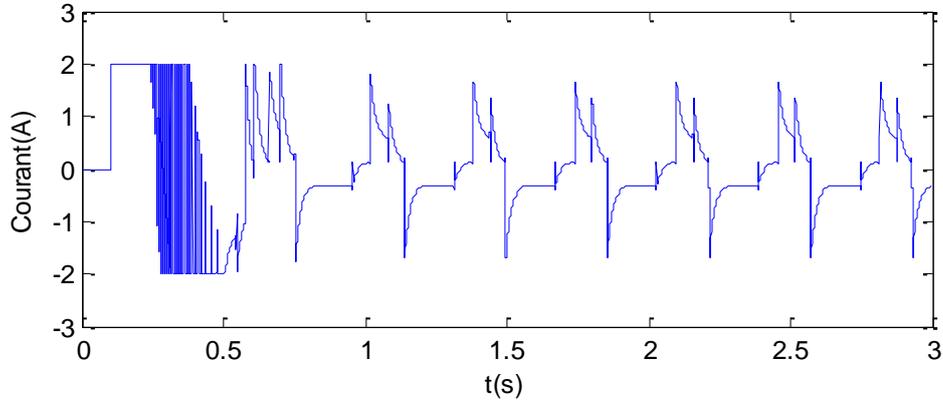
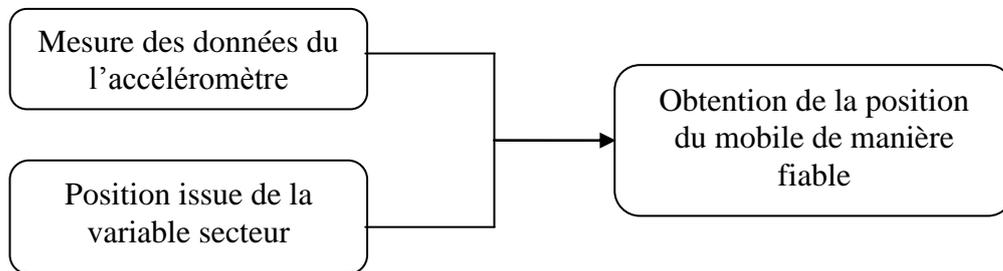


Figure 68. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 500mm

L'analyse des résultats montre que les capteurs Hall avec lesquels on avait mené nos tests pour estimer la position avoir une grossière résolution de  $3 * lx = 48\text{mm}$  sur la distance totale parcourue.

### 7.2.2. Simulation (2) : évolution de la position basée sur la fusion de données

La fusion de données consiste essentiellement à confronter et intégrer des informations multiples dans le but de réduire l'incertitude sur l'information résultante.



Les techniques usuelles de filtrage, de régulation, et d'estimation de l'application précédente font maintenant partie de la technique utilisée pour notre méthode de calcul. Nous devons mettre en évidence les capacités de l'accéléromètre MEMS pour ce type d'application. L'objectif final est de fusionner les données accélérométriques avec des données du capteur Hall.

La Figure 69 et la Figure 71 représentent l'évolution de la position suite à un échelon de référence (100mm et 500mm). On voit bien que sa valeur se stabilise autour de la valeur de référence. On note également une meilleure résolution que dans le cas du premier estimateur à base des sondes à effet Hall uniquement.

On peut également remarquer que l'actionneur est moins sollicité, si on compare les Figure 70 et Figure 72 aux Figure 66 et Figure 68.

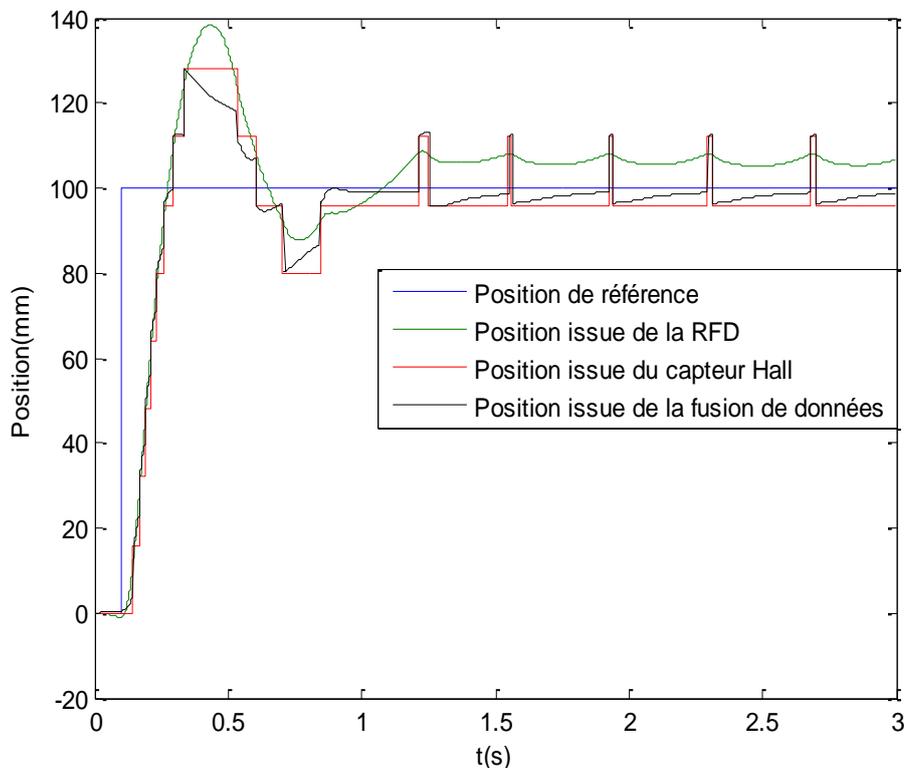


Figure 69. Evolution de la position, échelon de position de référence de 100mm

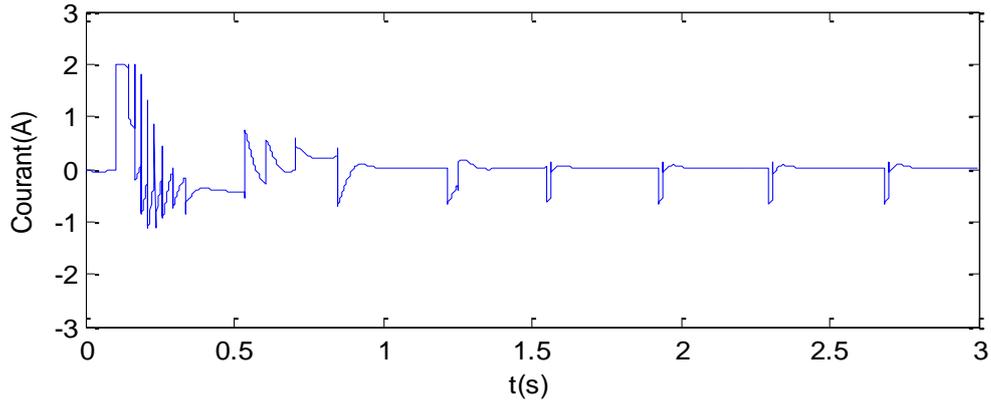


Figure 70. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 100mm

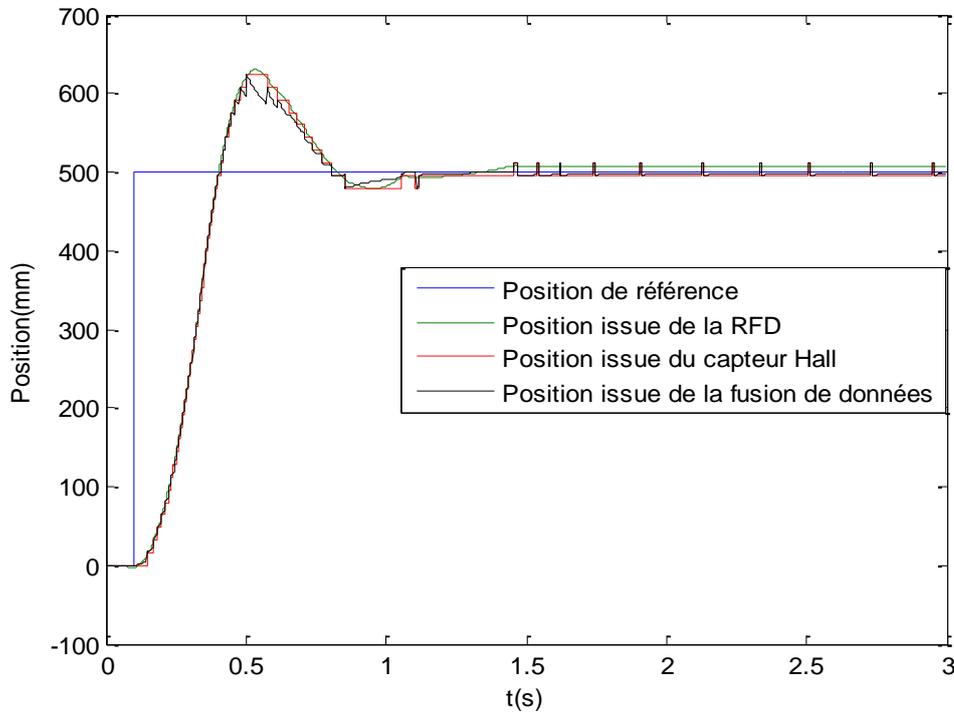


Figure 71. Evolution de la position, échelon de position de référence de 500mm

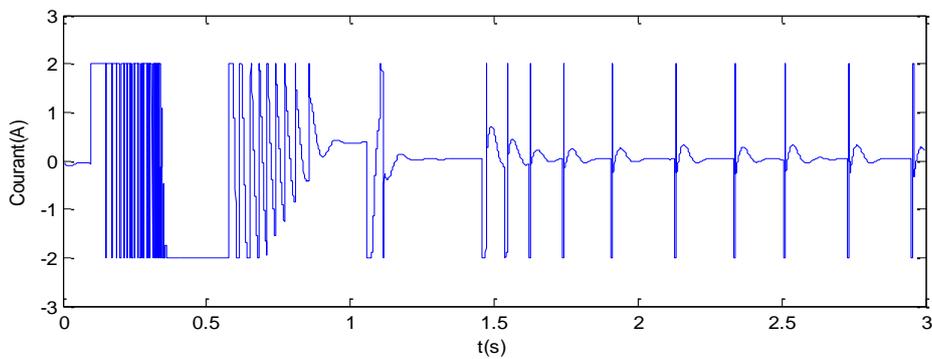


Figure 72. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 500mm

Le dépassement est plus grand que prévu, mais le temps de montée est plus court que pour celui du premier estimateur.

On constate une légère oscillation sur le régime permanent, ce phénomène qui est intégré dans la nature du système est difficile à éliminer par ce type de régulateur. On souligne aussi l'importance du filtrage passe-bas qui est indispensable pour obtenir les performances désirées.

### 7.3. L'évolution de la position en boucle fermée calculée par FEMM

Dans cette partie, on présente les résultats de simulation en régulation de position, avec les 2 estimateurs précédents, sauf que pour le calcul de la force, on utilisera FEMM piloté par Matlab. Ceci permet de tenir compte des non linéarités de la force (Figure 42) et donc d'avoir une force et un mouvement qui se rapprochent le plus du cas réel. Cependant, le temps de calcul requis pour une simulation est beaucoup plus important que dans le cas de la force linéaire de Laplace.

#### 7.3.1. Simulation (1) : évolution de la position basée sur l'estimateur

Pour un échelon de référence de position de 500 mm, nous obtenons :

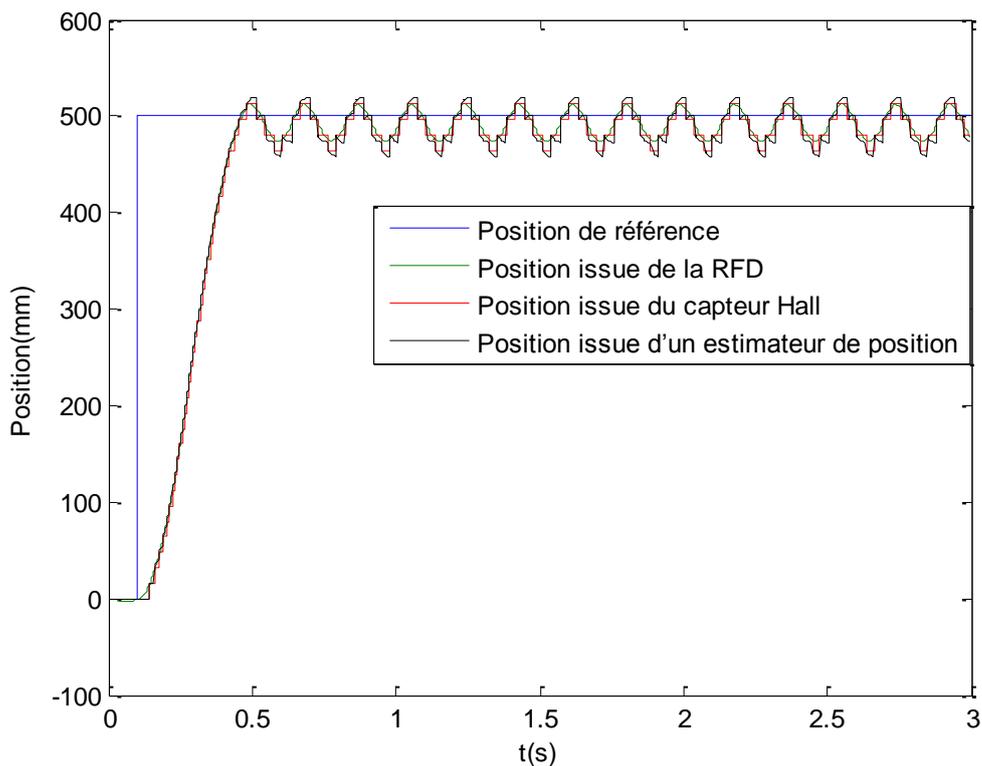
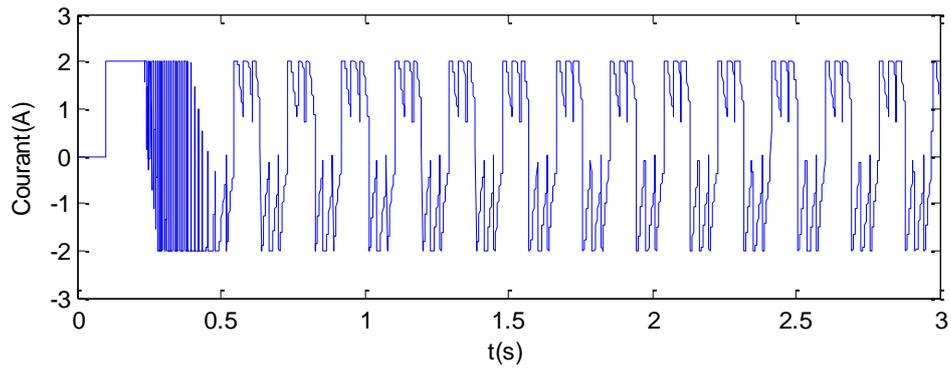
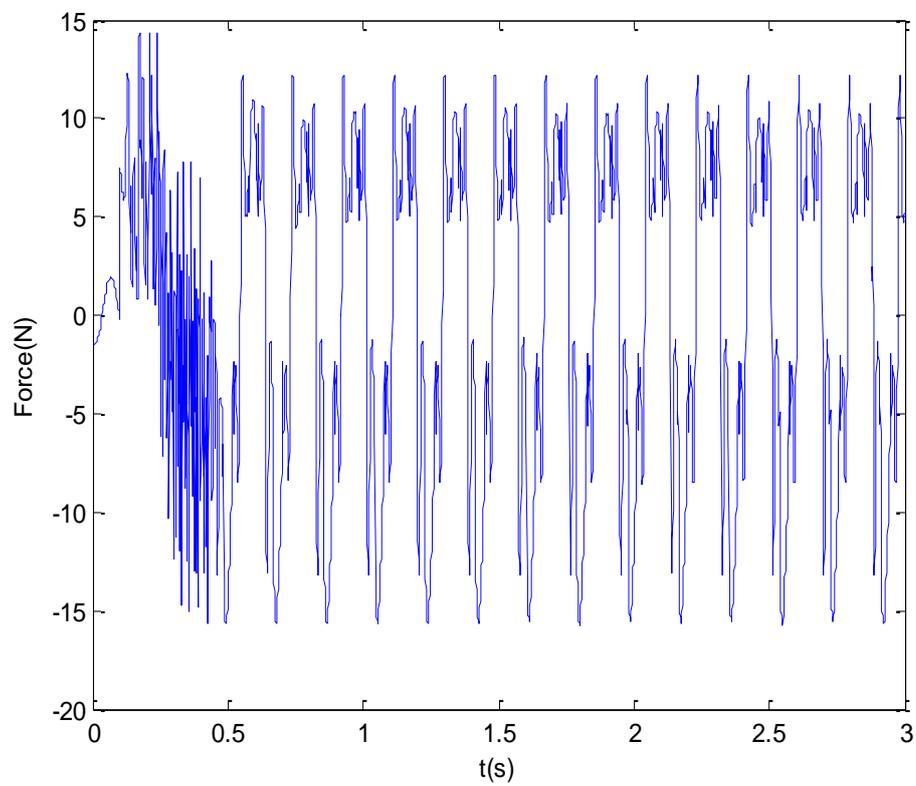


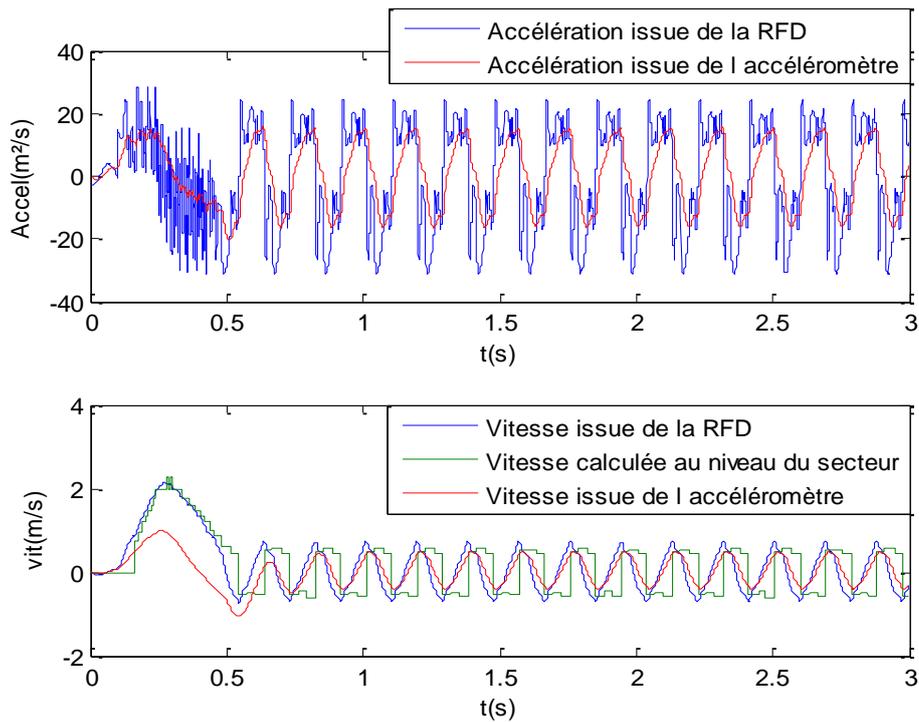
Figure 73. Evolution de la position, échelon de position de référence de 500mm



**Figure 74. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 500mm**



**Figure 75. Evolution de la force, échelon de position de référence de 500mm**



**Figure 76. Evolution de la l'accélération et de la vitesse, échelon de position de référence de 500mm**

On remarque qu'il y a plus d'oscillations (Figure 73) à cause de la présence de la force de détente (Figure 75). L'accélération est convenablement filtrée (Figure 76) et contribue à stabiliser le système. Rappelons que dans cette simulation, les données de l'accéléromètre ou de la RFD ne sont pas pour faire la régulation. Seules celles provenant du Secteur, le sont.

### 7.3.2. Simulation (2) : évolution de la position basée sur la fusion de données

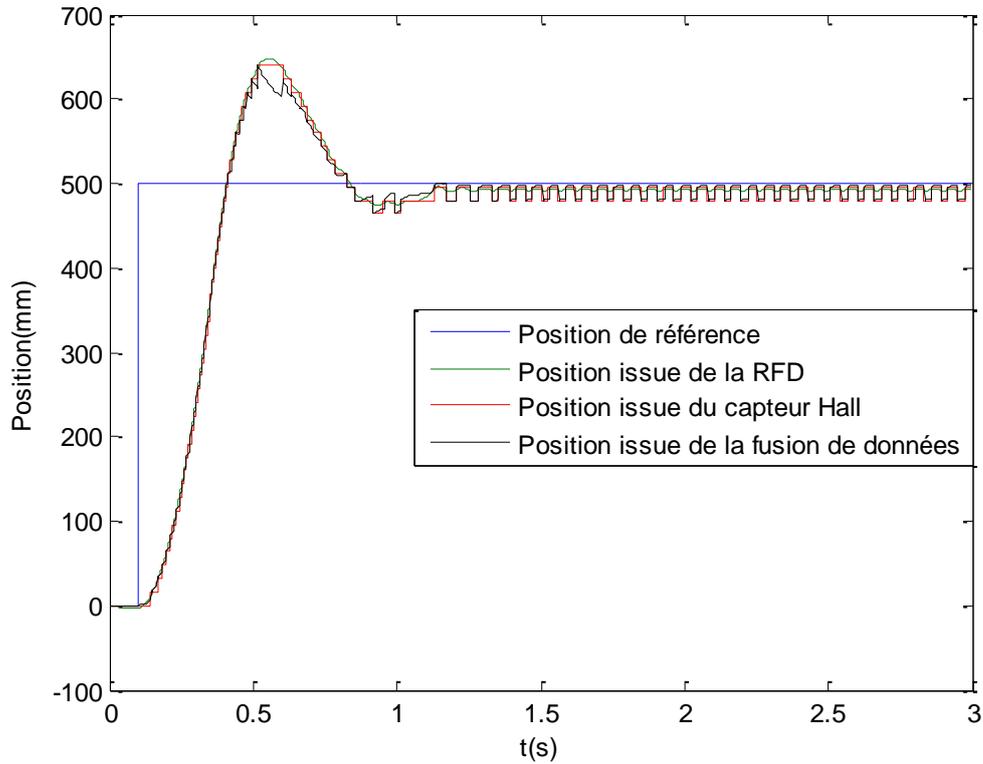


Figure 77. Evolution de la position, échelon de position de référence de 500mm

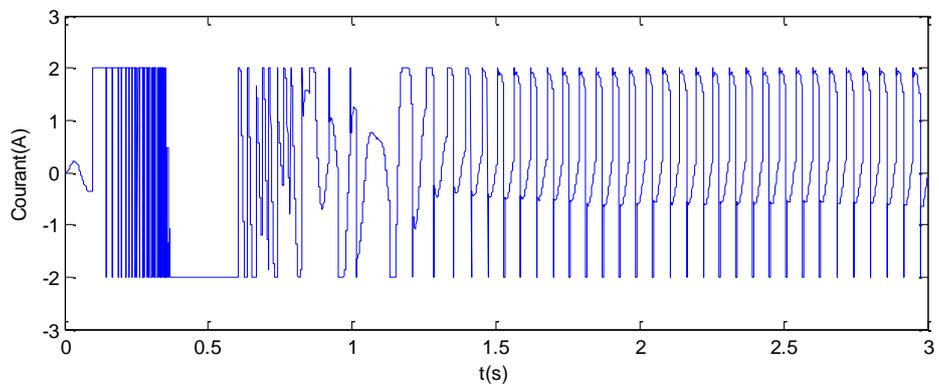


Figure 78. Sortie du Régulateur PD de courant, échelon de position de référence de 500mm

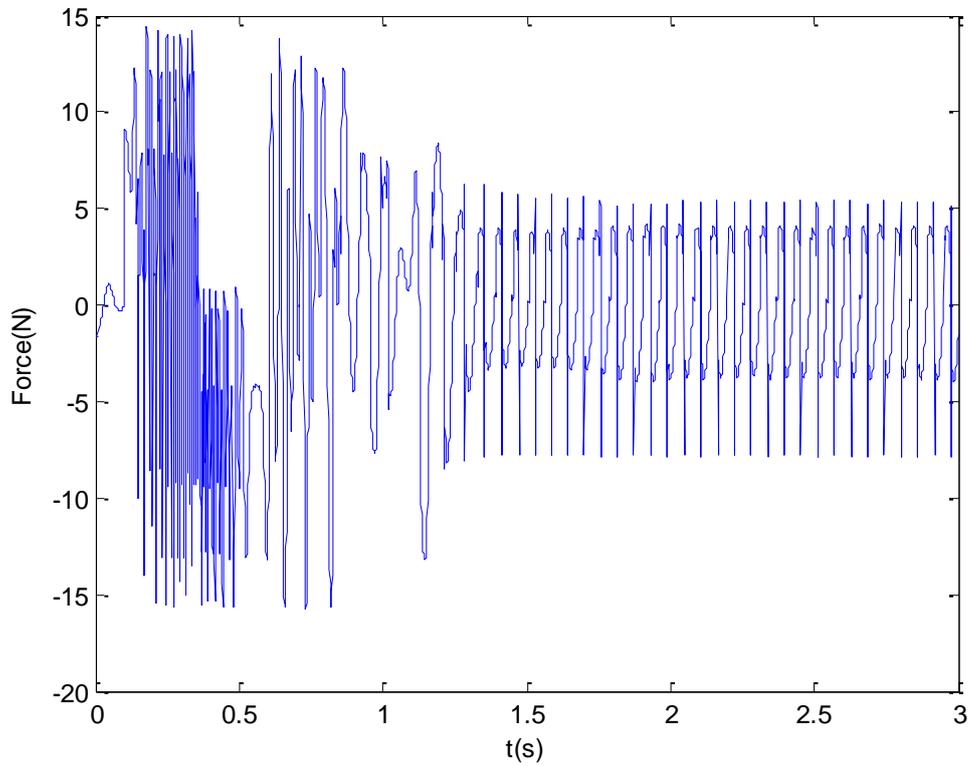


Figure 79. Evolution de la force, échelon de position de référence de 500mm

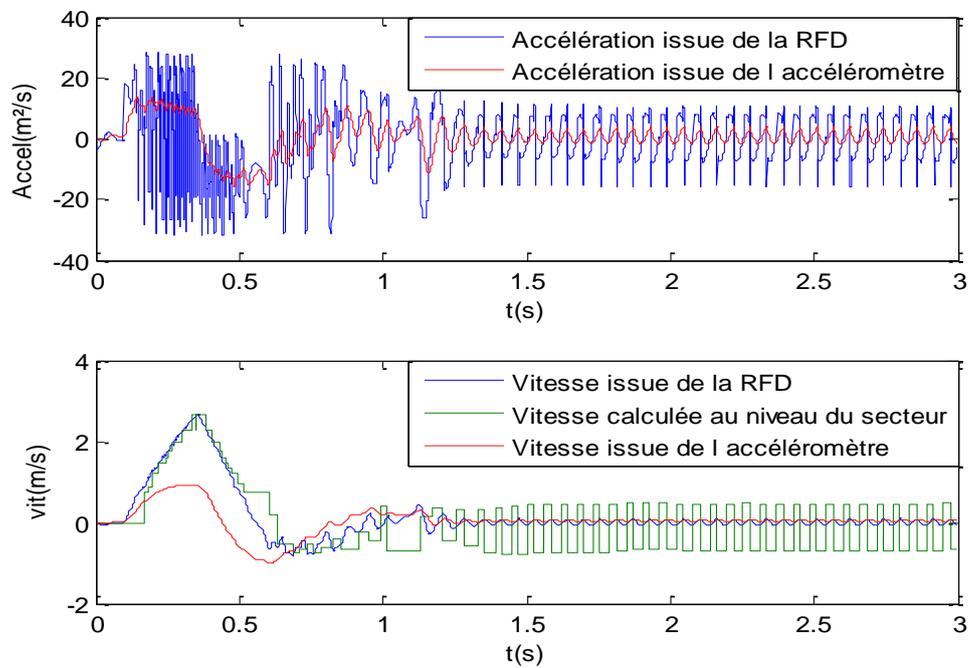


Figure 80. Evolution de l'accélération et de la vitesse, échelon de position de référence de 500mm

Durant cette simulation qui utilise la fusion de données pour calculer la position du mobile, on remarque une nette diminution de l'amplitude des oscillations de la position (Figure 77).

Ceci démontre la supériorité de cet estimateur par rapport à celui basé sur les secteurs uniquement.

Concernant le régulateur et les dépassements qu'on a au début, on peut se questionner sur le choix du régulateur. Le régulateur PD n'est peut-être pas le contrôleur optimal pour notre système. C'est un aspect que nous n'avons pas eu le temps d'explorer faute de temps, mais il pourrait sembler intéressant d'étudier une régulation de la position plus moderne du moteur linéaire avec d'autre type de régulateurs comme un correcteur RST.

### 8. Application expérimentale

L'application de la régulation de la position du mobile, par la lecture des sondes à effet Hall et par la fusion de données des deux capteurs (sonde à effet Hall et accéléromètre) a été porté sur le prototype (MSlinV4). Nous avons traduit le code en C et implémenté à l'aide de MPLAB.

L'essai de successions d'échelons de position de référence donne le résultat suivant.

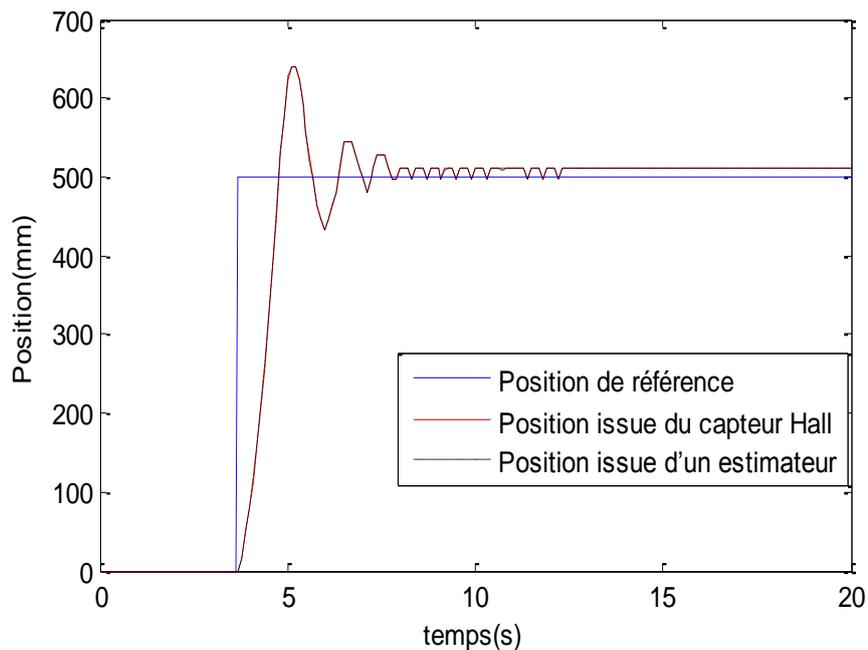
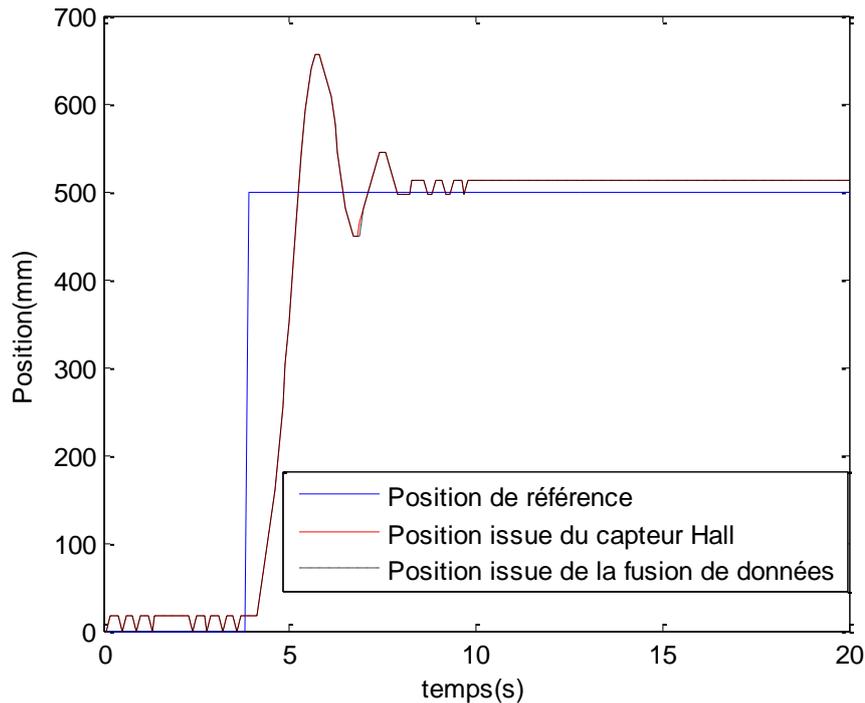


Figure 81. Relevé expérimental d'un essai en régulation de position basé sur un estimateur, échelon de position de référence 500 mm



**Figure 82. Relevé expérimental d'un essai en régulation de position basé sur une fusion de données, échelon de position de référence 500 mm**

Par rapport à la simulation, on remarque une différence quand au dépassement, au nombre d'oscillations et au temps de réponse. Ceci est du à la différence par rapport à l'implantation expérimentale. En effet, on n'impose pas directement un courant, mais une tension à l'aide de l'électronique de puissance et de la MLI. Comme il n'y a pas de régulation de courant, on n'a pas un courant de référence à la sortie du régulateur de position et donc une force du type  $F = 4B_m I N l_y$  comme en simulation mais plutôt une tension qui servira à appliquer le courant. L'idéal, en perspective à cette étude, serait d'implanter une boucle interne de courant, qui imposera également, une limitation de courant qui sera le fait de la boucle de régulation et non pas des limites du système (alimentation, impédance totale des bobines).

On pourrait alors comparer rigoureusement le système réel au modèle simulé.

## **9. Conclusion**

Nous avons pu en toute fin de projet faire piloter et contrôler notre moteur linéaire, avec un contrôle PD certes non robuste mais fonctionnel. Ce résultat est la preuve du bon fonctionnement de ce que nous avons utilisé et programmé : une électronique fiable, un programme embarqué structuré, une interface permettant de visualiser les signaux voulus et de changer en ligne certains paramètres et variables du dspic.

Nous avons présenté des méthodes d'estimation de la position du mobile, par la lecture des sondes à effet Hall et par l'intégration des signaux de l'accéléromètre MEMS embarqué sur le mobile. Il n'a pas été possible de valider expérimentalement toutes les méthodes et d'en faire un comparatif rigoureux.

Nous avons en même temps fait une étude approfondie du matériel fourni pour mieux cerner son utilisation. Cette étape a fait apparaître des éléments non désirables tels que l'apparition de bruit sur les données de l'accéléromètre mais aussi un décalage à l'état statique (au repos). Ces derniers nécessitaient forcément une correction, ce qui nous a amené à réaliser un filtre passe-bas pour corriger le bruit mais aussi un recalibrage afin de corriger la sortie du capteur.

La fusion de données des deux capteurs (sonde à effet Hall et accéléromètre) et les filtres numériques ajoutés ont permis une stabilisation de l'estimation de la position. Des simulations de fonctionnement ont permis de calculer le nouveau régulateur de position du système, puis de passer à la phase expérimentale.

*Conclusion générale et perspectives*

Les problématiques abordées dans ce mémoire nous ont permis d'étudier le mode de fonctionnement du moteur synchrone linéaire à aimants ainsi que la réalisation d'un prototype expérimental.

Dans ce projet, nous avons travaillé sur la partie théorique, mais aussi sur le côté expérimental. Sur la partie théorique, nous avons analysé notre modèle par la méthode des éléments finis. Cela a permis de calculer l'induction magnétique en tout point, la force normale, la force de traction et la force de détente et ainsi mettre en évidence les phénomènes perturbateurs. Nous avons passé énormément de temps sur Matlab et FEMM pour faire des simulations de plusieurs configurations de matériaux et de dimensions des dents de la partie mobile et des aimants de la partie fixe pour dimensionner le nouveau moteur (MSlinV4). Ceci a abouti à des critères fondamentaux de dimensionnement et nous avons acquis une expérience concernant ce domaine.

Dans la partie pratique, nous avons voulu améliorer l'estimation de la position par les sondes à effet Hall, qui ne permettent de connaître la position qu'à 16 mm près. Ceci a été fait par l'utilisation d'un accéléromètre MEMS. Nous avons mis en évidence les difficultés inhérentes à ce genre de capteur, dans cette application. Nous avons proposé plusieurs solutions pour contrecarrer ces problèmes.

Nous avons ainsi pu définir et mettre en œuvre une méthode permettant de corriger les données d'un capteur d'accélération MEMS afin d'améliorer la position de la partie mobile. Plusieurs tâches ont été accomplies et chacune d'entre elles était liée aux autres, il a fallu utiliser une interface graphique pour pouvoir faire l'extraction et le traitement de données, étudier les caractéristiques des capteurs Hall et de l'accéléromètre pour exploiter au mieux ces données...etc.

La partie expérimentale nous a pris beaucoup de temps et ne nous a pas permis d'atteindre tous les objectifs de notre sujet notamment en ce qui concerne la reconstitution de la position issue de l'accéléromètre MEMS. Ceci est dû, en partie, à l'inclinaison du rail sur la table et l'offset inhérent à ce type de capteur ne permettent pas d'obtenir, par intégration, une vitesse puis une position stable. Cette difficulté nous a obligé à revenir à la simulation pour mettre en évidence ce phénomène parasite et essayer de l'enrayer.

A l'issue de la partie expérimentale on ne peut pas comparer nos valeurs de la position issue de l'accéléromètre aux valeurs issue de la méthode qui basée sur les capteurs Hall car les informations de ce premier capteur sont trop divergentes.

La technique de la fusion de données des deux capteurs (sonde à effet Hall et accéléromètre) et les filtres numériques ajoutés ont permis une stabilisation de l'estimation de la position. Il aurait été préférable d'utiliser le filtre de Kalman afin d'avoir une position plus précise.

Les modèles élaborés pour l'étude électromagnétique sont paramétrés et peuvent être appliqués pour la conception d'une gamme d'actionneurs linéaires synchrones. Les essais réalisés sur le prototype (MSlinV4) ont validé la démarche de dimensionnement.

L'autre intérêt de ce projet, c'est d'avoir pu réaliser un projet qui nous a plongé dans le monde des systèmes embarqués et qui touche à plusieurs thématiques connexes : automatique, électrotechnique, électromagnétisme, programmation, etc.,

Face à ces observations et au regard des résultats obtenus, des perspectives intéressantes, pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du moteur synchrone linéaire, se dégagent :

- Réguler le courant de plateau injecté dans les bobines;
- Disposer d'une batterie et rendre ainsi notre moteur MSlinV4 totalement autonome ;
- Améliorer le système de mesure en utilisant de nouveaux composants, très compacts comme une centrale inertielle (IMU) et trouver une méthode pour bien calibrer les capteurs et les positionner correctement;
- Ajout d'autres capteurs comme un détecteur de fin de course.

Pour compléter la partie modélisation, il faut étudier d'autres phénomènes, tels que les courants de Foucault dans les aimants, induisant des pertes qui augmentent localement la température des aimants, les forces de détente sont soumises aux champs magnétiques issus des courants, qui saturent les dents du mobile et ainsi mettre en évidence d'autres phénomènes perturbateurs.

## *Références Bibliographiques*

- [1] “Moteurs électriques à mouvement linéaire et composé” (Février 2004), Internet : <http://www.techniques-ingenieur.fr/moteurs-electriques-a-mouvement-lineaire.html>
- [2] S. Thiery, “Modélisation et Compensation de Frottements dans un Moteur Linéaire”, INPG-ESISAR 2005.
- [3] dsPIC33FJ32MC302/304, dsPIC33FJ64MCX02/X04, and dsPIC33FJ128MCX02/X04 Data Sheet - High-Performance, 16-bit Digital Signal Controllers – MICROCHIP. Internet : <http://www.microchip.com>
- [4] L6234 THREE PHASE MOTOR DRIVER – Data Sheet, Disponible : <http://www.baghli.com/dspic.php>
- [5] SS40A/SS50AT, Magnetic Position Sensors, Data Sheet Disponible : <http://www.honeywell.com/sensing>
- [6] D. C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.0.1 (03Dec2006): <http://femm.foster-miller.net>
- [7] LIS3LV02DL, MEMS inertial sensor, 3-axis  $\pm 2g/\pm 6g$  digital output low voltage linear accelerometer. Internet : [www.alldatasheet.com/datasheet-/LIS3LV02DL.html](http://www.alldatasheet.com/datasheet-/LIS3LV02DL.html)
- [8] B. Multon, J. Bonal, “ les entraînements électromécaniques direct : diversités, contraintes et solutions”. CEMD’99, ENS de Cachan SEE, France.
- [9] S. Chevailler, “Comparative Study and Selection Criteria of Linear Motors”, thèse de doctorat, EPFL, 2006.
- [10] G. Remy, “commande optimisée d’un actionneur linéaire synchrone pour un axe de positionnement rapide”, thèse de doctorat ENSAM, CER de Lille, 2007.
- [11] R. Hellinger, P. Mnich, “Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook”. Novembre. 2009
- [12] <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>, page 44
- [13] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Force\\_de\\_Lorentz](http://fr.wikipedia.org/wiki/Force_de_Lorentz)
- [14] L. Baghli, A. Rezzoug, "Actionneurs linéaires : MRVlin et MSlin, un projet pédagogique", J3eA, Vol. 7 No. HORS SÉRIE 1 (février 2008), Special Edition: CETSIS 2007. ISSN (version électronique) : 1638-1963.
- [15] <http://www.femm.info>
- [16] Y. Granjon, “Systèmes linéaires, non linéaires, à temps continu, à temps discret, représentation d’état”, 2e Edition Dunod, Paris, 2001.
- [17] K. J. Astrom et B. Wittenmark, “Computer Controlled Systems: Theory and Design », édition Prentice Hall, Upper Saddle river, new Jersey, 1997.
- [18] L. Baghli, J.F. Pautex, S. Mezani, “Wireless Instantaneous Torque Measurement, Application to Induction Motors”. International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010, Rome, 6-8 September, 2010
- [19] S. Revault, A. Diop, J. Nasseh. “ Etude et mise en œuvre d’accéléromètres pour des systèmes embarqués de signalisation ferroviaire”, Projet GE2-GE3 2008
- [20] Y. Mori “Filtrage Numérique et Traitement du Signal” édition Lavoisier, Paris, 2007.
- [21] M. Correvon, “Systèmes électroniques, les régulateurs standards”, internet: [www.chireux.fr/mp/cours/electronique/Chap7.pdf](http://www.chireux.fr/mp/cours/electronique/Chap7.pdf)
- [22] H.B. Hamed, M. Antunes, P.E. Cavarec, J. Lucidarme, B. Multon, L. Prévond, and B. Salamand. “Généralités sur les actionneurs linéaires”. Satie ENS Cachan, 2002.
- [23] L. El Amraoui, "Conception électromécanique d’une gamme d’actionneurs linéaires tubulaires à réluctance variable", thèse de doctorat, École centrale de Lille, 2002.

- [24] D. Grenier, F. Labrique, H. Buyse, E. Mantagne, "Electromécanique Convertisseurs d'énergie et Actionneurs ", édition Dunod, Paris, 2001.
- [25] P. E Caravec, "calcul et minimisation des efforts normaux parasites les actionneurs synchrones à aimant Permanents", JCGE Nancy nov, 2001.
- [26] J. Gaumont, "Modélisation, identification et commande expérimentale d'un moteur synchrone linéaire à aimant permanent", Master recherche, École nationale des arts et métiers Lille.
- [27] L.Baghli , "Projets autour du dsPIC ", disponible: <http://www.baghli.com/dspic.php>
- [28] L.Baghli, "MSlin, le projet ", disponible : <http://www.baghli.com/dspic.php#MSlin>
- [29] Z. Milivojević, Djordje Šaponjić, "Programming dsPIC (Digital Signal Controllers) in C ". Disponible : [http://www.ebooks/ProgrammingdsPIC\\_DigitalSignalControllersinC.pdf](http://www.ebooks/ProgrammingdsPIC_DigitalSignalControllersinC.pdf)
- [30] H. Djemai, "Contribution à L'amélioration des Performances d'un Moteur Linéaire ", thèse de doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique de Batna, 2007
- [31] "Le moteur linéaire, sans rival en vitesse et précision" (Avril 2005), Internet: [www.mesures.com/Automatisme](http://www.mesures.com/Automatisme)
- [32] "Principes et applications des moteurs linéaires" (Avril 2000), Internet: [www.mesures.com/Automatisme](http://www.mesures.com/Automatisme)
- [33] "Modulation de largeur d'impulsion", (juin 2012), disponible : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation\\_de\\_largeur\\_d'impulsion](http://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_de_largeur_d'impulsion)
- [34] Theodore Wildi, Electrotechnique 4 e édition université de Quebec, 2005.

# *Annexes*

## 1. Annexe 1 : Paramètres du MSlinV3

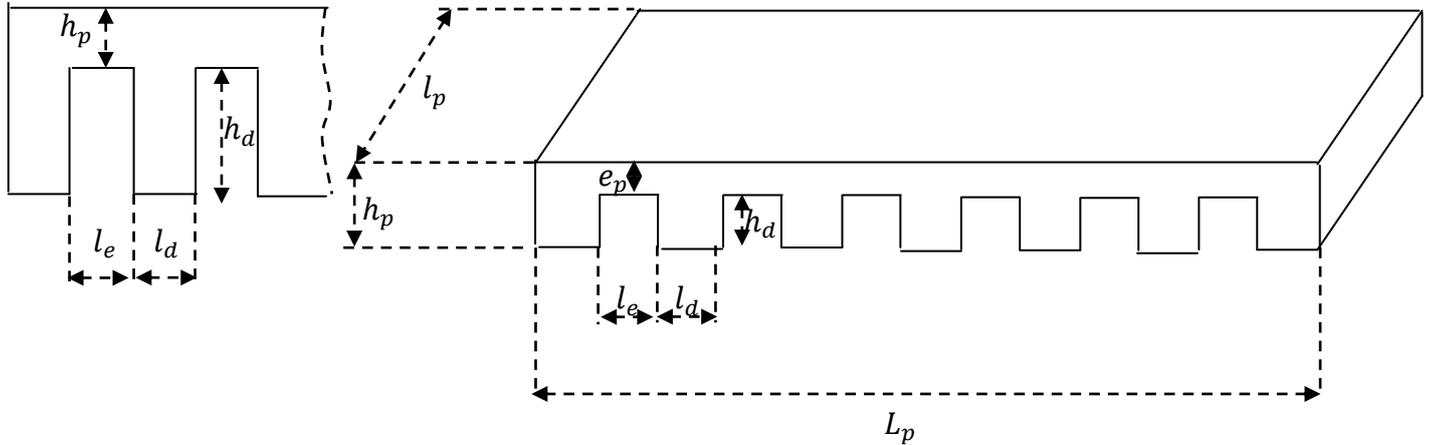


Figure 83. Les paramètres de dimension du mobile

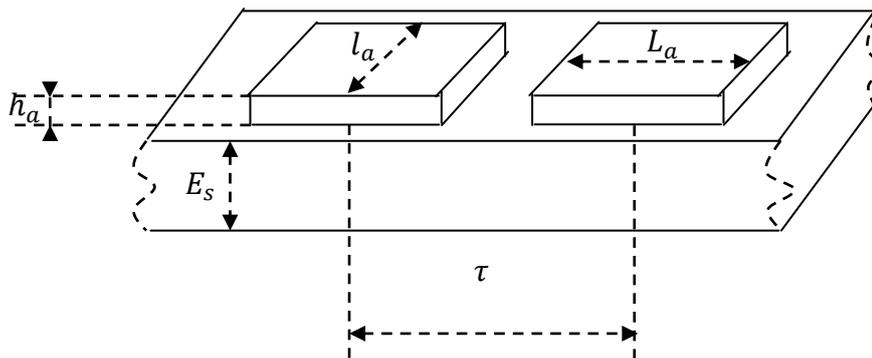


Figure 84. Les paramètres de dimension du rail

### MSlin v3

Moteur synchrone linéaire de  $\tau=60\text{mm}$ ,  $2\tau = 120\text{mm}$

Matériaux partie mobile : **plexiglas** (air).

Partie fixe (le rail) : **Plexiglas** (air).

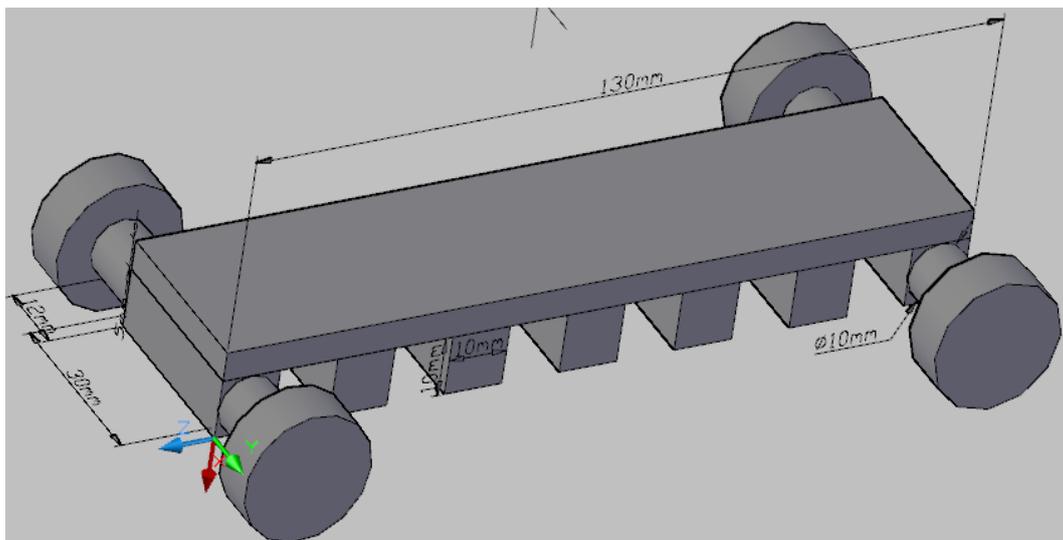
### Dimensions :

Largeur=30 mm, Longueur=130 mm, dents carrées : 10 mm, hauteur 15 mm ou plus

Le tableau ci-dessous présente une liste des principales grandeurs géométriques du MslinV3:

<b>Tableau 1: paramètres géométriques du moteur linéaire synchrone (MSlinV3)</b>				
	<b>Liste de paramètre</b>	<b>Symbole</b>	<b>Valeur</b>	
<b>Mobile (induit)</b>	Longueur du circuit	$L_p$	130mm	
	Largeur du circuit	$l_y$	30mm	
	Nombre de phases	$q$	3	
	Nombre de paires de pôles	$p$	1	
	Nombre de spires par phase	$n_s$	120	
	Nombre d'encoches	$n_e$	6	
	Largeur d'une dent	$l_d$	10mm	
	Largeur d'encoche	$n_e$	9.2mm	
	Nombre de dents	$n_d$	7	
	Pas d'encoche	$\tau_e$	20mm	
	Hauteur d'une dent	$h_d$	10mm	
	Épaisseur de la culasse	$e_p$	6mm	
	<b>Rail (inducteur)</b>	Pas polaire	$\tau$	60mm
		Épaisseur de la culasse	$E_s$	10mm
Longueur des aimants		$l_a$	40mm	
Largeur des aimants		$L_a$	30mm	
Hauteur des aimants		$h_a$	3mm	
<b>Entrefer</b>	Épaisseur de l'entrefer (réglable)	$e$	3mm	

La Figure présente les dimensions en mm du moteur linéaire (partie mobile)



**Figure 85. Partie mobile (MSlinV3)**

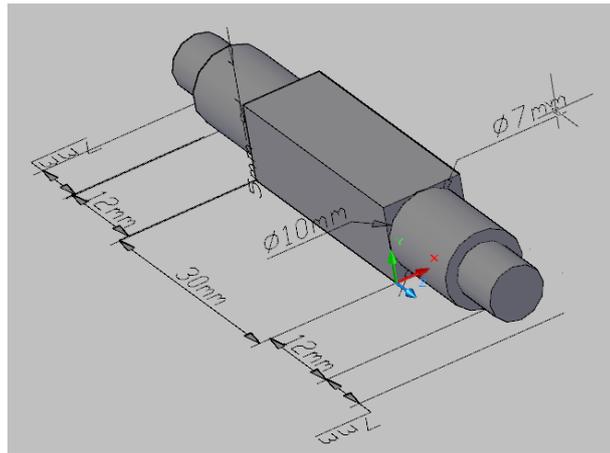


Figure 86. Essieu porte roulement

## 2. Annexe2 : Paramètres du MSlinV4

Moteur synchrone linéaire de  $\tau=48\text{mm}$ ,  $2\tau = 96\text{mm}$

Matériaux Partie mobile : **Acier Inox** (acier 1018), faiblement ferromagnétique.  
Partie fixe(le rail) : **Plexiglas** (air)

Dimensions :

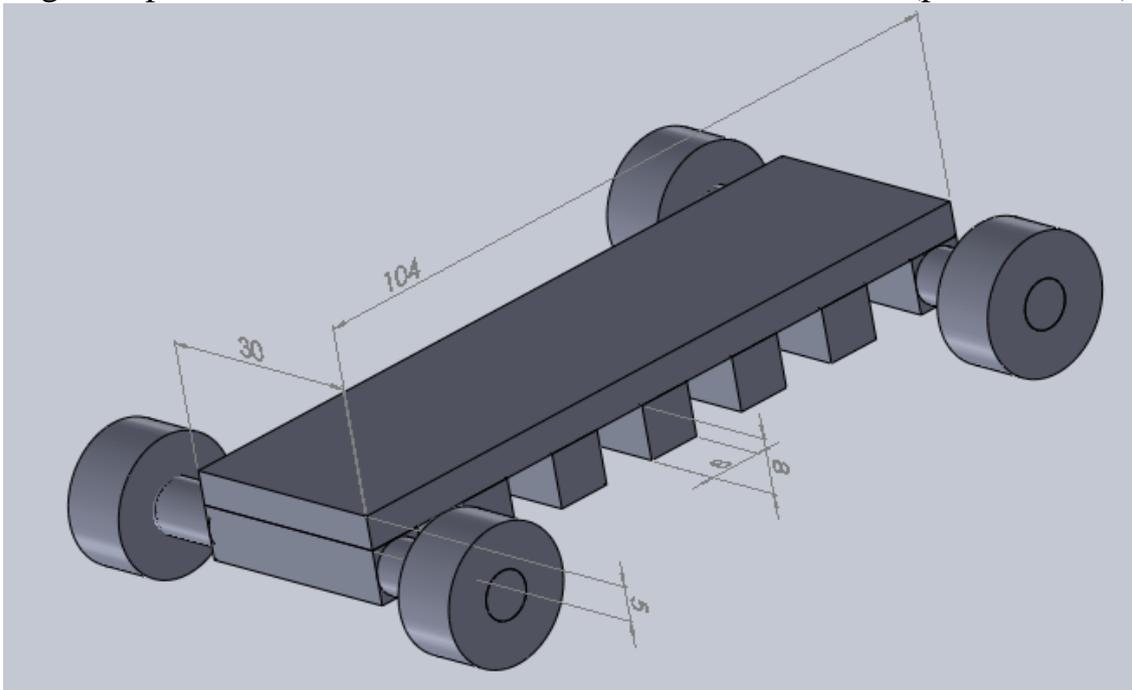
Largeur=30 mm, Longueur=104 mm, dents carrées : 8 mm, hauteur 13 mm ou plus

Les paramètres géométriques du moteur linéaire synchrone (MSlinV4) sont listés dans le **Tableau 2**.

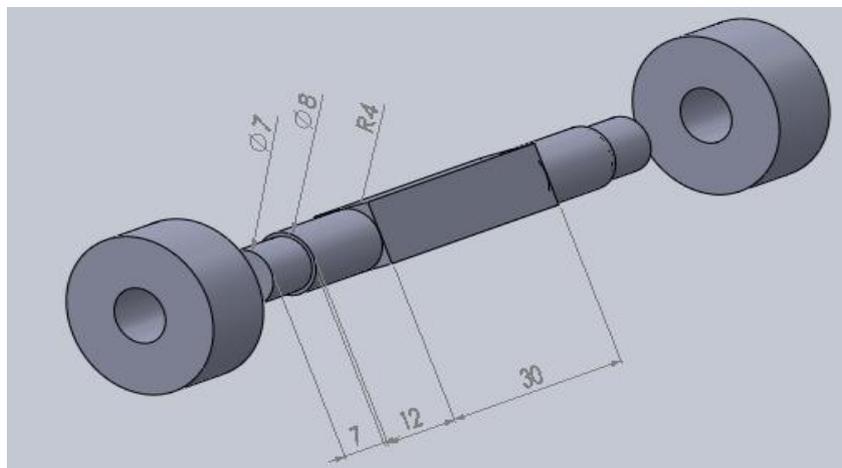
Tableau 2: paramètres géométriques du moteur linéaire synchrone (MSlinV4)			
	Liste de paramètre	Symbole	Valeur
<b>Mobile (induit)</b>	Longueur du primaire	$L_p$	104mm
	Largeur du primaire	$l_y$	30mm
	Nombre de phases	$q$	3
	Nombre de paires de pôles	$p$	1
	Nombre de spires par phase	$n_s$	120
	Nombre d'encoches	$n_e$	6
	Largeur d'une dent	$l_d$	8mm
	Largeur d'encoche	$n_e$	8mm
	Nombre de dents	$n_d$	7
	Pas d'encoche	$\tau_e$	16mm
	Hauteur d'une dent	$h_d$	8mm
	Épaisseur de la culasse	$e_p$	4mm
	<b>Rail (inducteur)</b>	Pas polaire	$\tau$
Épaisseur de la culasse		$E_s$	10mm
Longueur des aimants		$l_a$	40mm
Largeur des aimants		$L_a$	30mm
Hauteur des aimants		$h_a$	3mm
<b>Entrefer</b>	Épaisseur de l'entrefer (réglable)	$e$	3mm

**MSlin v4**

La Figure 2 présente les dimensions en mm du moteur linéaire (partie mobile)



**Figure 87. Partie mobile (MSlinv3)**



**Figure 88. Essieu porte roulement**

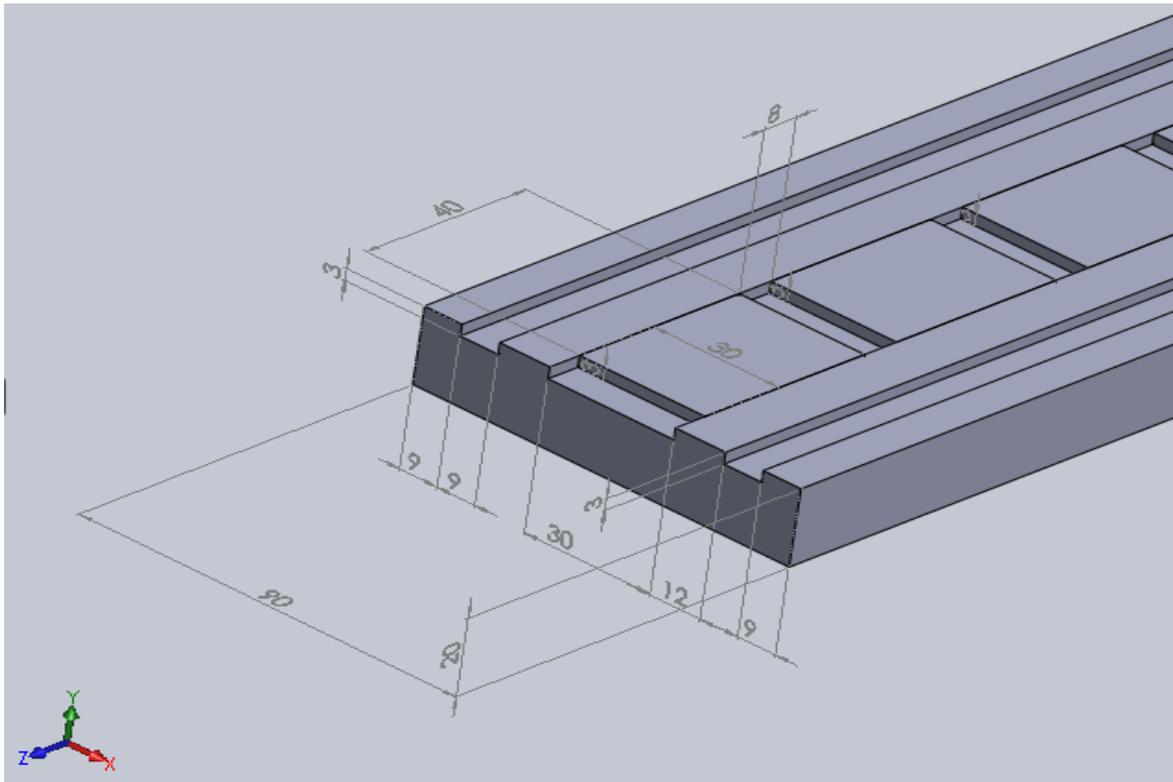


Figure 89. Rail (inducteur)

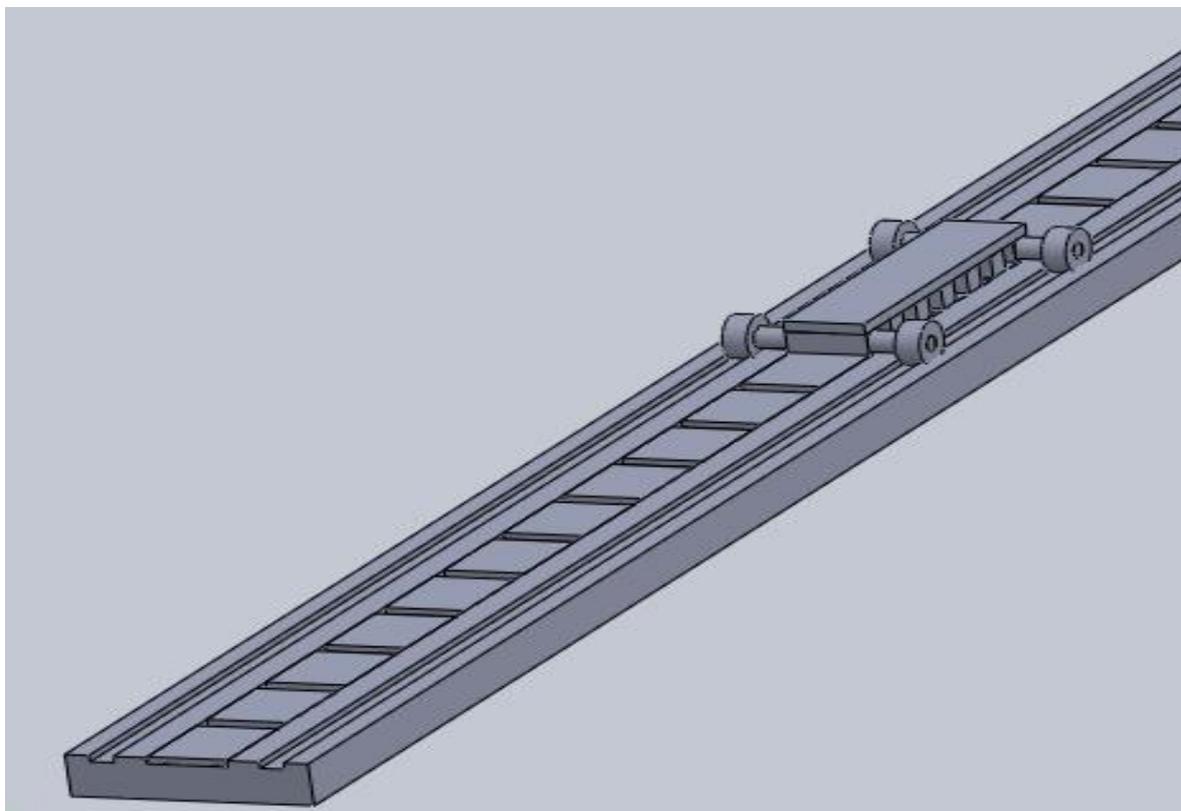


Figure 90. Vue générale du MSlinv4

### 3. Annexe3

#### Caractéristiques du LIS3LV02DL

- Nombre d'axes:3
- Type d'interface:I2C, SPI
- Sensibilité par axe:1024LSB / g
- Type de boîtier de capteur CI:LGA
- Nombre de broches:16
- Gamme de tension d'alimentation:2.16V à 3.6V
- Température de fonctionnement:-40°C à +85°C
- MSL:MSL 3 - 168 heures
- Courant, alimentation:0.65mA



LIS3LV02DL

#### Caractéristiques du L6234

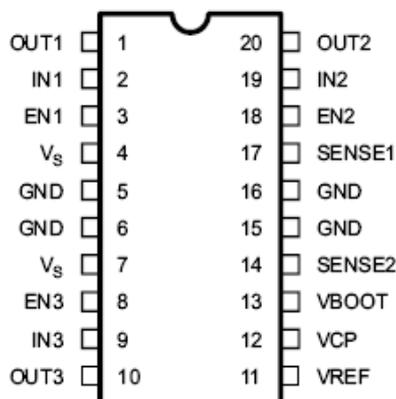
- **Type de moteur:** Triphasé DC sans balai
- **Nombre de canaux de sortie:** 3
- **Tension, sortie:** 52V
- **Gamme de tension d'alimentation:** 7V à 42V
- **Type de boîtier CI Driver:** DIP
- **Nombre de broches:** 20
- **Température de fonctionnement:** 0°C à +150°C
- **Courant, sortie max.:** 5A
- **Input Type:** CMOS / TTL / Microprocesseur



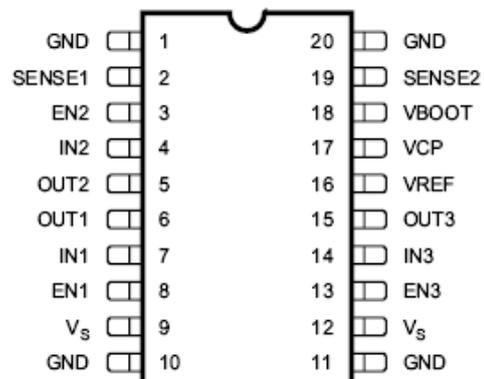
POWER DIP (16+2+2)



PowerSO20



POWER DIP (16+2+2)



PowerSO20

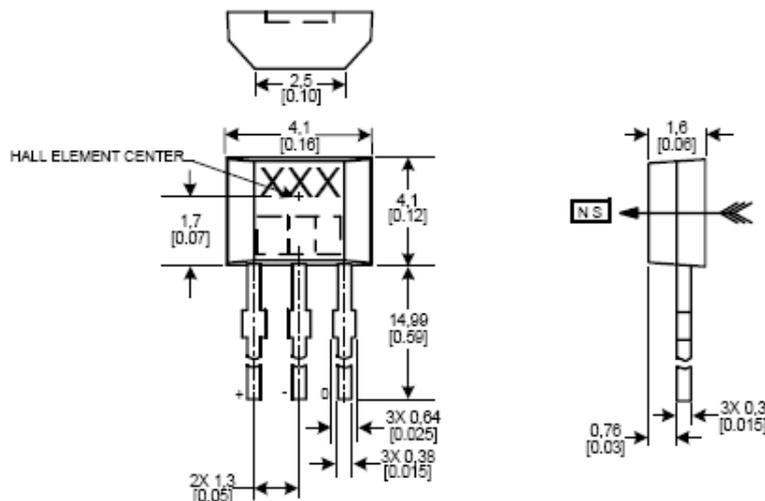
## Caractéristiques du dsPIC33FJ128MC804

- **DSC, 16BIT, 128K FLASH, 40MIPS.**
- **Série:** dsPIC33F
- **Fréquence du coeur:** 40MHz
- **Type d'interface embarquée:** ECAN, I2C, SPI, UART
- **Nombre d'E/S:** 35
- **Taille mémoire, FLASH:** 128KB
- **Gamme de tension d'alimentation:** 3V à 3.6V
- **Température de fonctionnement:** -40°C à +85°C
- **Nombre de broches:** 44
- **SVHC:** No SVHC (18-Jun-2012)
- **Fréquence du coeur:** 40MHz
- **Interface:** ECAN, I2C, SPI, UART
- **Interface Type:** CAN, I2C, SPI, UART
- **Numéro de la fonction logique:** 33FJ128MC804
- **Racine de la référence:** 33
- **Taille mémoire, RAM:** 16KB
- **Tension, alimentation max.:** 3.6V
- **Tension, alimentation min.:** 3V
- **Type de DSP:** Point fixe / flottant



## Caractéristiques du capteur magnétique à effet Hall SS40A

- **Tension, sortie min.:** 400mV
- **Gamme de tension d'alimentation DC:** 4.5V à 24V
- **Output Configuration:** Collecteur
- **Boîtier de capteur:** Rectangulaire
- **Vitesse, commutation:** 1.5µs



#### 4. Annexe 4 : Description du dispositif expérimental



Figure 91. Le Programmeur USB du dspic : Pickit2

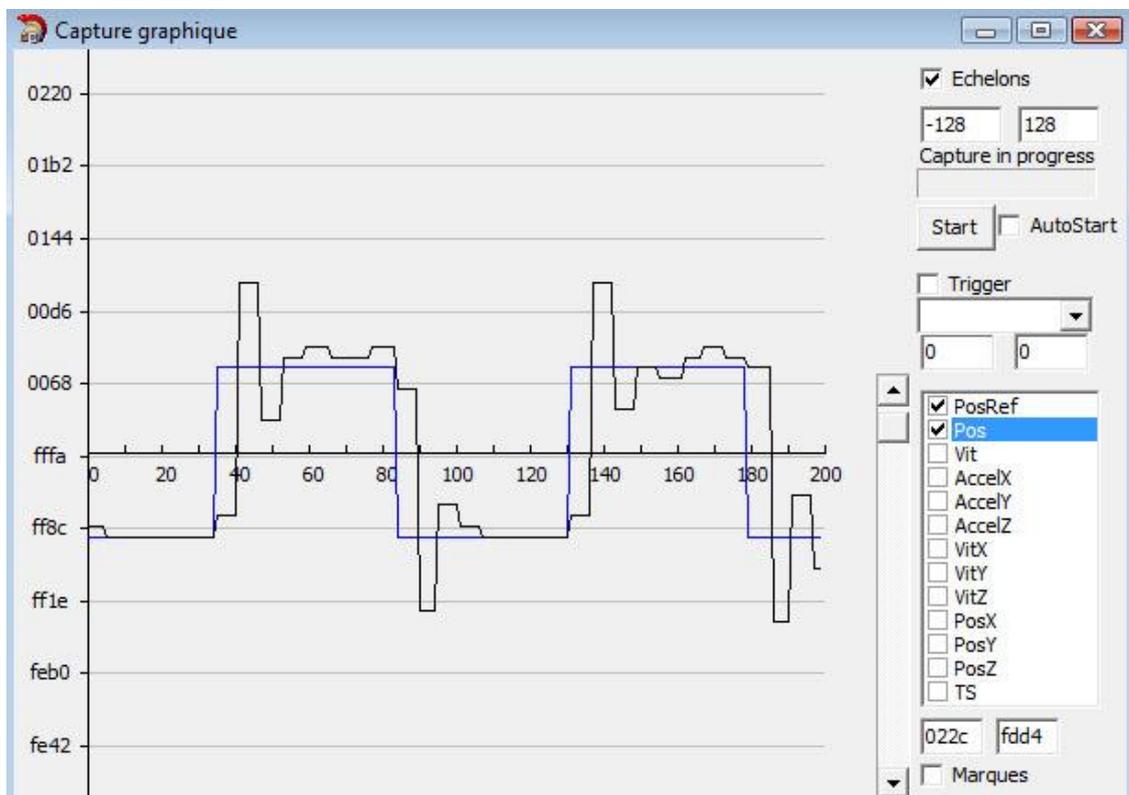


Figure 92. Inteface graphiquee

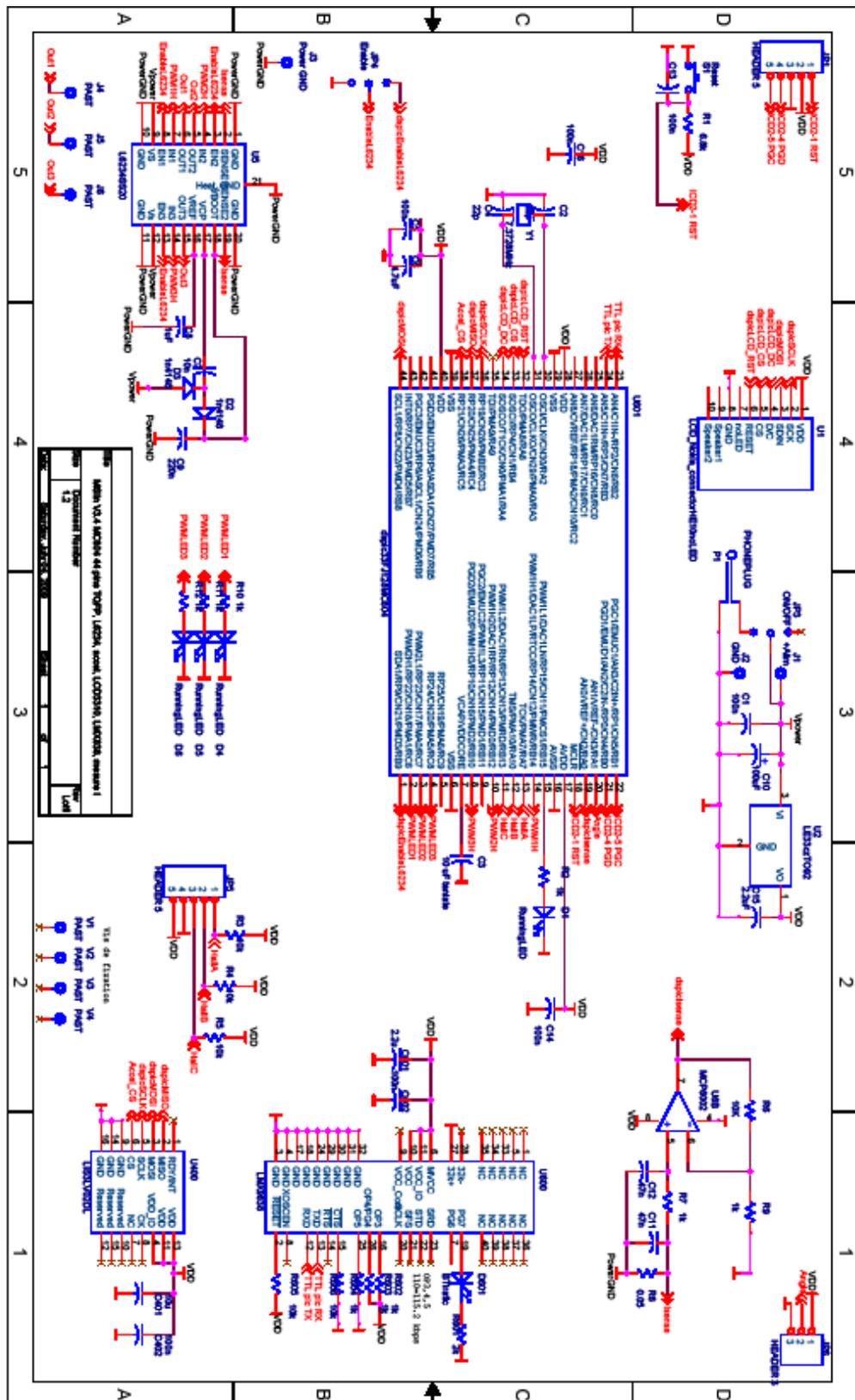


Figure 93. Schéma électronique de la carte de MSlin

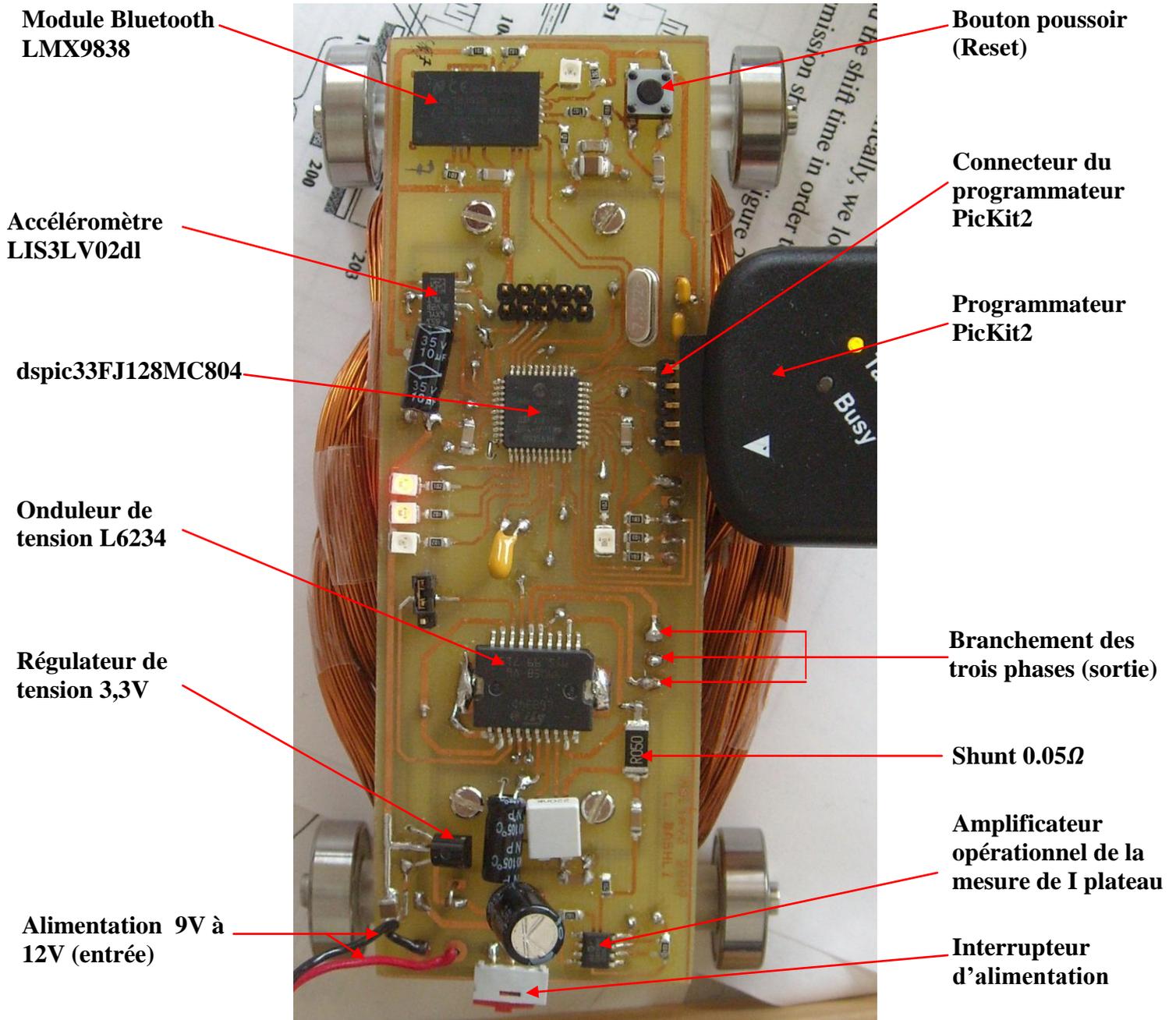


Figure 94. MSlin V4 : Détails de la carte électronique de commande et de puissance

## 5. Annexe 5 :

### 5.1. Routine de l'estimation de la position

Voici la routine qu'on a programmée pour avoir une position estimée du notre mobile basée sur les sondes à effet Hall.

```
//=====
// calcule la nouvelle position
  if (OldSecteur != Secteur)
    {
    if (TimeStamp!=0)  Vitesse=((double)(Pos-OldPos))/TimeStamp;
      TimeStamp=0;//réinitialisation du temps
      x_obs=0;//initialisation de la position intermédiaire
      OldPos=Pos;
      if (TabSecteur[0][OldSecteur-1]==Secteur)
        Pos+=dx60;
      else if (TabSecteur[1][OldSecteur-1]==Secteur)  Pos-=dx60;
        else ErreurPos++;
      OldSecteur = Secteur;
    }

TimeStamp++;//temps entre deux pas
x_obs=x_obs+Vitesse;//calcul de la position estimée à partir de la position
absolue
Pos_Estimee=Pos+x_obs;//calcul de la nouvelle position
//=====
```

### 5.2. Routine de l'étalonnage d'accéléromètres MEMS

Voici la routine qu'on a programmée pour étalonner notre capteur.

#### *Etalonnage d'accéléromètres MEMS*

```
//=====
if ( ++countVF==500 )
{
countVF=0;
delta_Vy= Accel_VitY-OldAccel_VitY;
OldAccel_VitY=Accel_VitY;
Ay_offset=Kp_Vf*delta_Vy+xe_Vf;
xe_Vf +=Ki_Vf*delta_Vy;
} AccelY_PBout_Etal=(AccelY_PBout-Ay_offset);
//=====
```

### 5.3. Paramètres du modèle de MSlin simulé sous Matlab

Paramètre	Symbole	Valeur
Masse du mobile	$m$	0.5kg
Coefficient de frottement	$aF_{fr}$	0.1
Nombre de spires par phase	$N$	120
Longueur active du circuit magnétique	$ly$	30mm
Induction magnétique maximale sous le pôle	$B_m$	0.25T

## Résumé :

L'objectif de ce projet est l'étude et la commande d'un Moteur Synchrone Linéaire à Aimants.

La modélisation du moteur est réalisée par la méthode des d'éléments finis. Cela permet de calculer l'induction magnétique en tout point ainsi que les forces normale, de traction et de détente.

La méthode de commande imposée par ce type de moteur à f.e.m. trapézoïdale, doit également reconstituer la position du mobile, par l'utilisation des sondes à effet Hall et par l'intégration des signaux de l'accéléromètre. Afin d'améliorer la résolution des capteurs pris individuellement, nous proposer de fusionner leurs données afin d'obtenir la position du mobile.

**Mots clés :** Moteur synchrone linéaire, commande, accéléromètre MEMS, capteurs à effet Hall, FEMM, dsPIC, microcontrôleur, onduleur.

## Abstract:

The purpose of this project is to study and control a permanent magnet synchronous linear motor.

The modeling of the motor is done by a finite element method analysis using a freeware (FEMM). It allows to calculate the magnetic induction at all points as well as the normal, traction and cogging forces.

The control method of this type of motor (trapezoidal e.m.f.), must estimate the position of the mobile, by using Hall-effect sensors and the integration of accelerometer signals. In order to improve the resolution of the sensors taken individually, we propose to combine their data to obtain the position of the mobile.

## Keywords:

Linear synchronous motor, control, MEMS accelerometer, Hall effect sensors, FEMM, dsPIC, microcontroller, inverter.

## ملخص

الغرض من هذا العمل هو الدراسة و التحكم في محرك متزامن خطي ذو مغناطيس. تتم نمذجة المحرك باستخدام طريقة العناصر المتناهية باستعمال برنامج حاسوب خاص (FEMM)، هذا ما يسمح بحساب المجال المغناطيسي في جميع النقاط الخاصة بتنقل المحرك بما فذلك القوة المعادية، قوة الجر و القوة الساكنة.

الطريقة المطبقة للتحكم في هذا المحرك ( f.e.m ) تسمح لنا بتحديد وضعية الجزء المتحرك بالنسبة للجزء الساكن عن طريق أجهزة الاستشعار (Hall) و عن طريق تكامل مؤشرات جهاز قياس التسارع.

من اجل تحسين حدة الملتقطات الفردية نقترح دمج البيانات الخاصة بهم من اجل الحصول على وضعية الجزء المتحرك بالنسبة للجزء الساكن

الكلمات المحورية : محرك متزامن خطي، التحكم، جهاز قياس التسارع (MEMS)، أجهزة الاستشعار (Hall)، برنامج العناصر المتناهية (FEMM)، متحكم (dsPIC).