

# Réalisation d'un Logiciel de Prototypage sous Matlab pour la Conception d'un Moteur Linéaire

Mimi Belatel

*Laboratoire d'Electrotechnique, Faculté des Sciences de la Technologie  
Université des frères Mentouri, Constantine, Algérie*

belatelmimi2002@yahoo.fr

**Résumé**— Cet article présente un logiciel de prototypage LEC\_RBR pour la conception d'un moteur linéaire sous environnement Matlab réalisé au Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine. Ce logiciel se dispose d'une interface graphique qui permette à n'importe quel utilisateur des simulations simples et conviviales de ce genre d'actionneur électromécanique. Un moteur linéaire est essentiellement un moteur électrique qui a été déroulé de sorte qu'au lieu de produire un couple ou une rotation, il produit une force linéaire sur sa longueur en installant un champ électromagnétique de déplacement. Le principe de fonctionnement de base d'un moteur linéaire est le même que pour un moteur rotatif, les principaux éléments, bobines et/ou aimants, sont simplement arrangés différemment pour produire une force et non pas un couple. La simulation numérique de ce genre de machine désigne le procédé selon lequel on exécute ce logiciel en vue de représenter un phénomène physique ou électromagnétique. En général, son utilisation permet l'étude du fonctionnement et les propriétés de ce système et a prédire son évolution.

**Mots-clés**— Logiciel LEC\_RBR, Moteur Linéaire, Matlab.

## I. INTRODUCTION

La conception des machines électriques est en pleine évolution. En effet, l'intensification de la concurrence économique force les entreprises à accélérer le renouvellement de leurs produits et la mise en œuvre des technologies innovantes. Les ingénieurs et les chercheurs se trouvent confrontés à ce nouveau défi qui consiste à faire face à une complexité croissante dans des délais d'études toujours plus courts. Dans le domaine des machines électriques, les progrès ont été considérables et se traduisent par une qualité et une quantité de services rendus importantes dans un encombrement réduit. Les machines électriques ont encore une marge considérable d'amélioration du fait des nouveaux matériaux, de l'utilisation croissante de l'électronique de puissance, et de la montée en puissance de la commande en temps réel. Ces innovations ont été possibles grâce aux progrès réalisés dans la connaissance des machines et de leurs commandes mais aussi grâce aux progrès réalisés dans la démarche de conception. La maîtrise des savoirs et savoir-faire par les ingénieurs en est la clé de voute. L'instrumentation scientifique de la démarche de conception est une activité de recherche importante. Son objectif principal est de permettre l'exploration systématique de l'espace des solutions envisageables par l'emploi d'outils et de méthodologies adaptés. L'augmentation de la puissance de

calcul des ordinateurs a modifié profondément le travail des ingénieurs et les scientifiques. De nouveaux outils dits de conception assistée par ordinateur (CAO) ont fait leur apparition et n'ont cessé de s'améliorer depuis. La compréhension des phénomènes physiques présents au sein des machines électriques s'est donc accrue mais le changement le plus profitable est la capacité d'anticipation des ingénieurs. Ainsi, la construction des prototypes a été réduite tout comme le temps d'étude. L'objectif que nous nous sommes fixé, dans ce travail, est de dresser un panorama aussi étendu que possible des convertisseurs électromécaniques de types linéaires dont les principes sont fondés sur l'électromagnétisme [1-8]. Donc dans ce contexte, nous allons présenter dans cet article les capacités du logiciel LEC\_RBR pour faire une étude électromagnétique du moteur linéaire à induction.

## II. PRESENTATION DU MOTEUR LINEAIRE A INDUCTION

La généralisation des systèmes industriels automatisés et dans une moindre mesure des transports terrestres, a entraîné la résurrection du moteur linéaire qui est passé du stade de recherche entre 1965 et 1975, à la fabrication de série à partir de 1980. Les premières applications des moteurs linéaires sont dues incontestablement aux ingénieurs russes qui ont publiés des travaux remarquables en particulier G.I.Shturman en 1945 et A.I.Voldock en 1968. L'événement de la robotique et les remplacements des entraînements mécaniques complexes par des axes électroniques conduisent actuellement aux moteurs combinant des mouvements de rotation et de translation (moteur tournants linéaires) et plus généralement aux moteurs capables d'effectuer des mouvements multidirectionnels (moteur à mouvement composé). Dans plusieurs pays industrialisés, un effort considérable est soutenu depuis quelques années pour le développement de nouvelles techniques de transport terrestre à grande vitesse. Celles-ci font largement appel au moteur linéaire. Au-delà de 300 km/h, la suppression des roues rend le moteur linéaire indispensable pour la propulsion électrique de ces véhicules. La croissance très rapide de la puissance avec la vitesse exige la prédétermination des caractéristiques des moteurs linéaires. Parallèlement à ces développements très spectaculaires, un bon nombre d'applications du moteur linéaire se commercialisent à l'heure actuelle. La simplicité, le coût, le service rendu et la fiabilité sont les caractéristiques essentielles des systèmes de manutention entraînés par le

moteur linéaire. Dans le domaine de la traction, il faut encore citer les chemins de fer de montagne et les transports urbains, où des propulsions par moteur linéaire d'appoint s'avèrent économiquement très compétitives. La longueur limitée du moteur linéaire électrique est sans conteste sa particularité dominante [7-8].

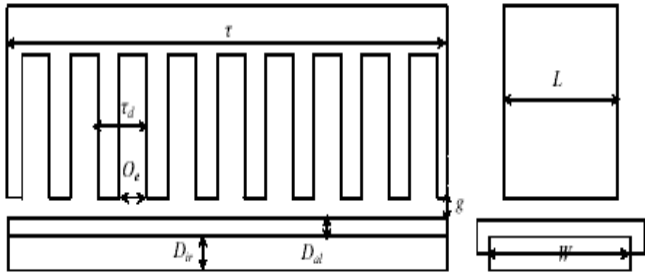


Fig. 1 : Structure du moteur linéaire étudié

### III. MODELISATION DU MOTEUR LINEAIRE A INDUCTION

Les performances du moteur linéaire à induction diffèrent de celles de son homologue rotatif, à cause des effets d'extrémités qui se produisent à l'entrée et à la sortie du primaire ou du secondaire et qui altèrent considérablement les performances de ce type de moteur par rapport à ceux du moteur cylindrique. Les problèmes associés aux moteurs linéaires à induction sont relativement difficiles à analyser. Plusieurs techniques ont été développées, pour cette fin. Elles peuvent être regroupées en deux familles: les méthodes analytiques et les méthodes numériques. Toutes ces méthodes, quelles soient analytiques ou numériques partent d'une formulation de champs électromagnétiques issue des équations de Maxwell. Celles-ci régissent tous les phénomènes électromagnétiques, au sein des dispositifs électromagnétiques de façon générale et du moteur linéaire à induction en particulier. Le problème de l'analyse des champs électromagnétiques au sein du moteur linéaire à induction se pose de façon fondamentale en termes des équations de Maxwell qui gouvernent tous les phénomènes électromagnétiques. Dans la gamme des fréquences de fonctionnement des dispositifs électrotechniques classiques, notamment le moteur linéaire, on peut ignorer des courants de déplacement et les phénomènes électrostatiques. De plus, en négligeant l'aimantation rémanente dans les parties ferromagnétiques du moteur et en considérant que les tôles magnétiques du moteur linéaire à induction qui sont isotropes. Les équations de Maxwell et les relations constitutives des milieux constituant cet actionneur, s'écrivent sous la forme suivante:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_c \quad (1)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

Les deux premières équations expriment le couplage entre les phénomènes électriques et magnétiques, tandis que la troisième et la quatrième équation reflètent les charges électriques de conduction et la conservation du flux magnétique. De même, les deux dernières équations représentent les propriétés des matériaux magnétiques et la loi d'ohm généralisée respectivement. D'autre part, les équations (2) et (3), nous permettent de définir respectivement un potentiel scalaire électrique  $\Phi$  et un potentiel magnétique  $A$  tels que:

$$\vec{B} = \text{rot } A \quad (6)$$

$$\vec{E} + \frac{\partial A}{\partial t} = -\text{grad } \phi \quad (7)$$

En présence des pièces en mouvement, la densité des courants de conduction s'écrit sous la forme suivante:

$$\vec{J}_c = \vec{J}_{ex} - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \text{grad } \phi + \sigma \vec{V} \wedge \vec{B} \quad (8)$$

Cette densité des courants est la superposition de quatre termes représentant respectivement:

- Les courants imposés par la source alimentant l'enroulement du primaire du moteur linéaire à induction;
- Les courants de Foucault induits par la variation temporelle de l'induction dans les zones conductrices de l'induit et de l'inducteur du moteur;
- Un terme dû au potentiel électrique qui entre en jeu, puisque le flux magnétique n'est pas défini de façon univoque en fonction du potentiel vecteur magnétique seulement;
- Les courants induits par un mouvement mécanique relatif éventuel, entre une pièce conductrice et les lignes du champ magnétique.

Les équations précédentes peuvent être combinées pour aboutir à l'équation globale suivante:

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot } A \right) = \vec{J}_{ex} - \sigma \left( \frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad } \phi - \sigma \vec{V} \wedge \text{rot } A \right) \quad (9)$$

Cette équation permet d'analyser les champs électromagnétiques dans un dispositif électromagnétique alimenté en courant de façon générale et dans le moteur linéaire à induction en particulier. Notons que le potentiel vecteur magnétique n'est pas unique, en effet (6) montre que celui-ci dérive d'un rotationnel. Une infinité de solutions se présentent et elles diffèrent les unes des autres d'un gradient, ce qui donne l'unicité de la solution:

$$\text{div } A = 0 \quad (10)$$

Généralement, un dispositif électromagnétique comporte plusieurs matériaux, dont certains ont des caractéristiques non linéaires. Par ailleurs, les phénomènes électromagnétiques varient fortement au sein de la structure. C'est pourquoi, une analyse de la structure complète en trois dimensions (3D) s'avère fastidieuse et coûteuse en termes de temps de calcul. D'autre part, l'analyse à une dimension (1D) est peu

représentative. L'emploi des modèles 2D est particulièrement simple et efficace et son choix est réaliste. Si on néglige l'effet des courants induits dirigés suivant (OX) qui se referment dans la partie active de l'induit, l'effet de la partie frontale de l'enroulement du primaire et l'effet de la longueur transversale finie d'un moteur linéaire à induction, on peut écrire:

$$\vec{J}_c = J_c \vec{k} \quad \text{et} \quad \vec{A} = \vec{A}_Z(x, y) = A \vec{k} \quad (11)$$

Dans ce cas, la densité des courants d'excitations et le vecteur potentiel magnétique sont perpendiculaires à la section longitudinale du moteur linéaire à induction, qui représente le plan de l'étude et dans lequel le flux magnétique circule. De plus, le vecteur potentiel n'a qu'une seule composante suivant (OZ) qui ne dépend pas de la troisième dimension (Z).

D'autres parts, la contribution du terme  $\text{grad } \phi$  dans les courants induits, dans cette hypothèse, peut être négligé à cause de la symétrie de la répartition de ces courants dans les appareils à induction de façon générale.

Dans ces conditions, l'équation vectorielle (10) projetée sur les axes de coordonnées, donne naissance à la formulation analytique suivante:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_{ex} + \sigma \left( \frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} \right) \quad (12)$$

Plusieurs corrections ont été proposées dans un but de prendre en considération les effets tridimensionnels dans une modélisation 2D du moteur linéaire à induction, tels que l'effet de bords dû à la longueur transversale finie du moteur, à la partie frontale de l'enroulement du primaire d'une part et l'effet des courants qui se referment dans la partie active de l'induit d'autre part, donc [8]:

- Induction magnétique au point (x, y):

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad \text{avec} \quad B_x = \frac{\partial A}{\partial y} \quad \text{et} \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} \quad (13)$$

- Champ magnétique au point (x, y):

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \Rightarrow \vec{H} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{B} \quad (14)$$

- Le flux:

$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_C \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (15)$$

- Courant dans une bobine:

$$I = \iint_{\text{bobine}} \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (16)$$

Le tableau suivant représente les paramètres du micromoteur linéaire étudié :

TABLE I  
PARAMETRE DU MOTEUR LINEAIRE

Paramètres	Valeurs
Nombre de phase q, Nombre de pôles p	3 ; 4
Nombre de couches de l'enroulement du primaire	2
Valeur efficace du courant primaire nominal I (A)	2.5
Diamètre d'un bras D <sub>b</sub> (mm)	11.5
Pas polaire τ (mm)	25
Nombre d'encoches du primaire Z	12
Entrefer g (mm)	1.5
Ouverture de l'encoche du primaire O <sub>e</sub> (mm)	3.8
Epaisseur de la plaque en Aluminium D <sub>al</sub> (mm)	2.5 ou 4.5
Epaisseur de l'acier du secondaire D <sub>ir</sub> (mm)	2.5
Longueur transversale du secondaire W (mm)	111
Hauteur du primaire h <sub>p</sub> (mm)	71
Profondeur ou hauteur de l'encoche h <sub>c</sub> (mm)	30
Fréquence nominale f (Hz)	50
Largeur de la dent l <sub>d</sub> (mm)	4.5
Longueur transversale du primaire L (mm)	101

#### IV. MISE EN OUVRE DU LOGICIEL LEC\_RBR

LEC\_RBR permet de modéliser des familles de machines avec des géométries simples et complexes, la surface 2D peut être réalisée par l'utilisation des points, des droites et des arcs [9-14]. La figure 2 représente la géométrie de notre moteur linéaire à induction.

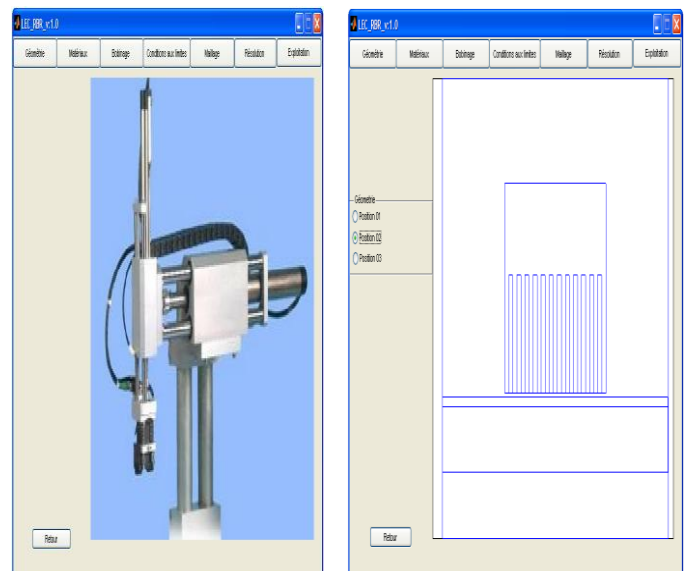


Fig. 2 : Géométrie du moteur linéaire à induction construite avec le logiciel LEC\_RBR

Nous avons affecté à chaque élément triangulaire du maillage les coefficients correspondants (perméabilité et courant) qui diffèrent d'une région à une autre.

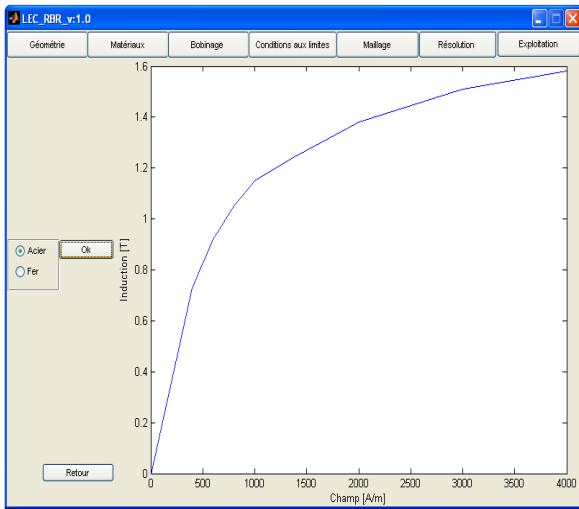


Fig.3 : Courbe d'aimantation B(H) construite avec LEC\_RBR

La condition de Dirichlet ( $A_z=0$ ) a été programmée sur toute la périphérie extérieure du domaine d'étude de notre moteur.

Le maillage du moteur linéaire à induction est décrit par les trois matrices de coordonnées, de segments et de triangles. La résolution est représentée par un vecteur qui donne la valeur des potentiels, de l'induction et du champ dans tous les nœuds du maillage.

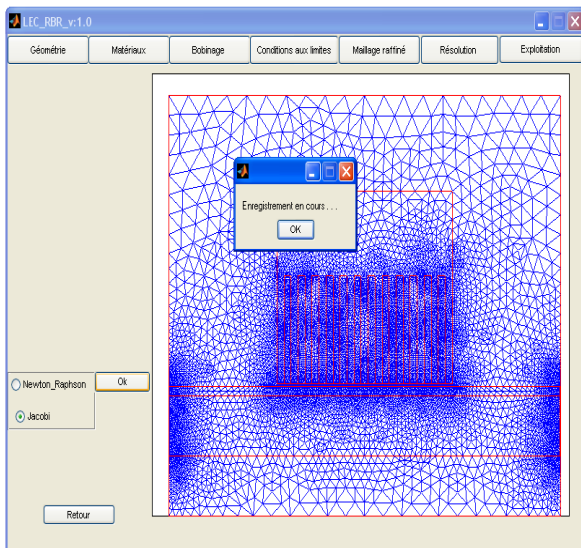


Fig. 4 : Résolution par la méthode de Newton-Raphson après un maillage raffiné du moteur linéaire

L'équation magnétodynamique est formulée en terme de potentiel vecteur  $\vec{A}$ , ce dernier ne constitue pas une grandeur physique directement exploitable. Il constitue toutefois une grandeur d'état et peut ainsi utilisé pour reconstruire toutes les grandeurs d'exploitations locales ou globales qui nous intéressent.

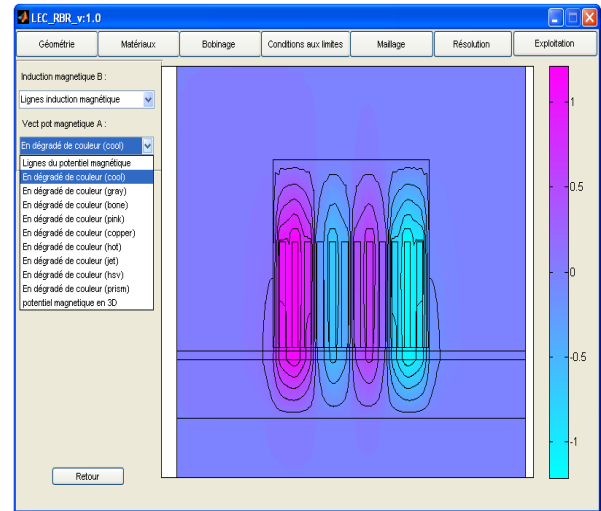


Fig. 5 : Distribution des lignes isovaleurs et le potentiel en dégradé de couleur

Toutes les quantités de vecteurs (potentiel, induction, champ,...) peuvent être représentées sous forme de vecteurs sur une région. Les vecteurs sont calculés dans chaque élément finis, dans le point d'intégration ou la quantité a une valeur maximale. La figure 6 représente les vecteurs d'induction dans le moteur linéaire à induction.

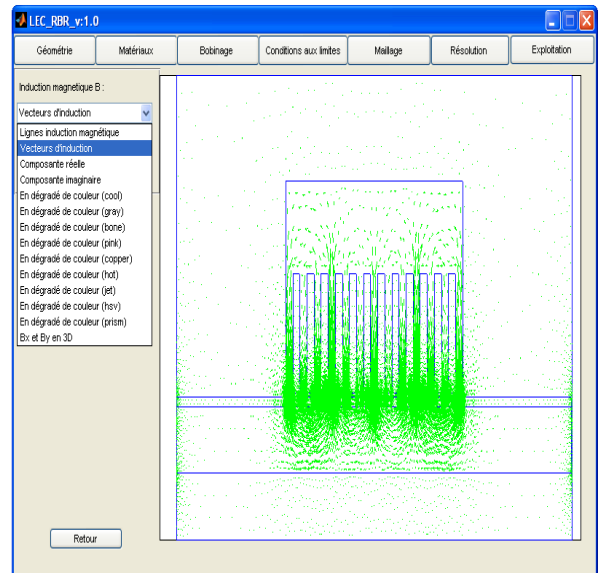


Fig. 6 : Vecteurs d'induction dans le moteur linéaire à induction

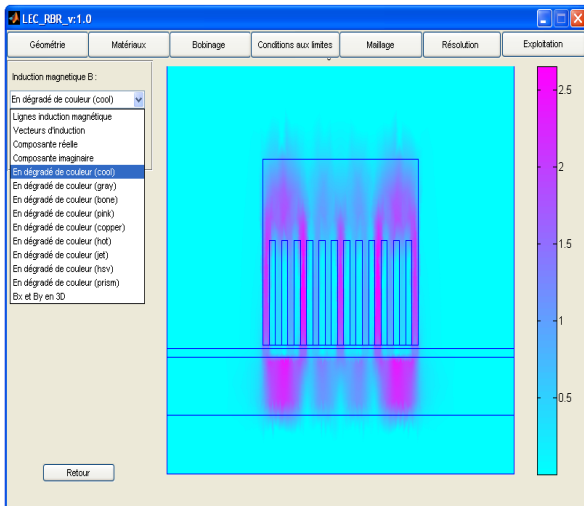


Fig. 7 : Induction en dégradée de couleur

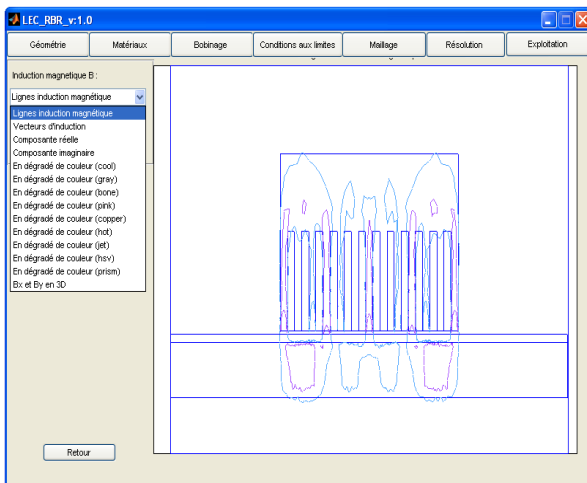


Fig. 8 : Les lignes d'induction

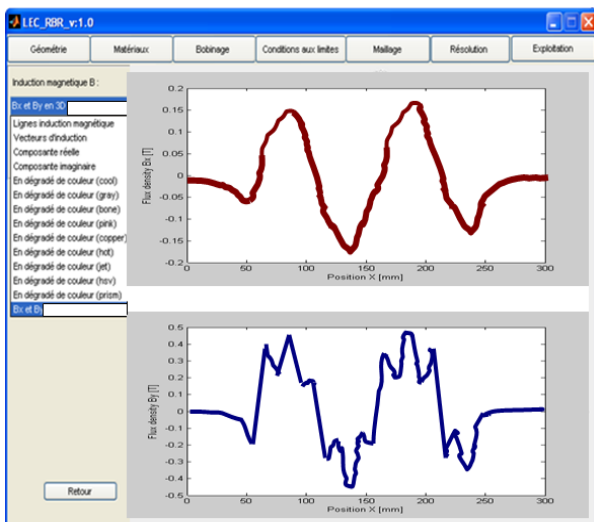


Fig. 9 : Induction  $B_x$  et  $B_y$  en 2D

Les figures 7, 8 et 9 représentent respectivement l'induction en dégradée de couleur, les lignes d'induction et l'induction  $B_x$  et  $B_y$  dans le moteur linéaire à induction en deux dimensions. Les lignes isovalues du potentiel vecteur change sinusoidalement avec le temps à la fréquence  $f$  ou à la fréquence angulaire  $\omega$ .

## V. CONCLUSION

Aujourd'hui, les moteurs linéaires sont largement utilisés dans l'industrie, notamment dans les systèmes de production. Toutefois, de part la géométrie des moteurs linéaires utilisés, il existe des phénomènes secondaires qui ont une influence sur la génération de la force de poussée et qui entraînent des ondulations de forces indésirables. Pour affiner ce modèle et pour quantifier l'influence de ces perturbations, il est donc nécessaire de modéliser finement tous ces phénomènes. Donc dans ce contexte, cet article représente une modélisation du moteur linéaire à induction avec le logiciel LEC\_RBR qui a été développé dans le Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine en déterminant les différentes caractéristiques électromagnétiques et mécaniques concernant ce type d'actionneur électromécanique.

## REFERENCES

- [1] J. F. Gieras, Eastham A. R. and G. E. Dawson; "Performance Calculation for Single-Sided Linear Induction Motors with a Solid Steel Reaction Plate under Constant Current Excitation", *In IEEE Proceedings*, Vol. 132, pp. 185-194, 1985.
- [2] J. F. Gieras, G. E. Dawson and A. R. Eastham; "Performance Calculation of the Single Sided Linear Induction Motors with a Double Layer Reaction-Rail under Constant Current Excitation", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 22, pp. 54-62, 1986.
- [3] J. Faiz, H. Jafari; "Accurate Modelling of Single-Sided Linear Induction Motor Considers End Effect and Equivalent Thickness", *IEEE Transactions on Magnetic*, Vol. 36, pp. 3785-3790, 2000.
- [4] J. F. Gieras, G. E. Dawson and A. R. Eastham; "A New Longitudinal End Effect Factor for Linear Induction Motors"; *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-2., pp. 152-159, 1987.
- [5] M. Mirsalim, A. Doroudi and J. S. Moghani; "Obtaining the Operating Characteristics of Linear Induction Motor: A New Approach", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 38, pp. 1365-1370, 2002.
- [6] A. S. Gerçek; "Performance Prediction of the Single-Sided Linear Induction Motors for Transportation Considers Longitudinal End Effect by Using Analytic Method", *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 2, pp. 95 – 104, 2009.
- [7] M. Kant; "Moteurs Electriques à Mouvement Linéaire et Composé", *Technique de l'ingénieur*, D3700, 2004.
- [8] L. Mokrani; "Contribution à la CAO des Machines Electriques, Application au Moteur Linéaire à Induction", *Thèse de Doctorat d'Etat*, Université de Batna, Algérie, 2008.
- [9] M Belatel, A. Reguioua et M.A. Rebaa, "Réalisation d'une Plate-forme Logiciel sous Environnement Matlab pour la Conception des Machines Electriques", Université de Constantine1, Algérie, 2010.
- [10] M. Belatel, A. Reguioua et M.A. Rebaa, "Réalisation d'un logiciel sous environnement Matlab pour l'étude des machines électriques et plus particulièrement le moteur asynchrone", *Revue Sciences et Technologie B*, N° 33, 2011, pp.9-18.
- [11] J. Briot; *Développement Efficace des Interfaces Graphiques*, Editions MATLAB, 2000.
- [12] *MATLAB Application Program Interface Guide*; Version 5, The Math Works, Natick- MA , 1996.
- [13] *Using MATLAB Graphics; Version 5*, The Math Works, Natick- MA, 1996.
- [14] J. Briot; *Introduction à la Programmation des Interfaces Graphiques*, Editions MATLAB, 2009.