

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière :Génie Electrique

Spécialité : ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES

Présenté par

**MAHMOUDI Thinhinane
YAMRANENE Kahina**

Thème

OPTIMISATION DES PERFORMANCES DYNAMIQUE DE LA MACHINE LINEAIRE A AIMANTS PERMANENTS

Mémoire soutenu publiquement le 02 JUILLET 2014 devant le jury composé de :

M Mustapha ZAOUIA	Maitre de conférences classe B,	UMMTO, Président
Mr Hassane MOHELLEBI	Professeur,	UMMTO, Rapporteur
M Zehor OUDNI	Maitre assistant classe A,	UMMTO, Examineur
M Farid HOCINI	Maitre de conférences classe B,	UMMTO, Examineur
M Meziane HAMEL	Doctorant	UMMTO, Examineur

Remerciements

On tient à remercier vivement notre promoteur

Mr H. MOHELLEBI Professeur à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO) et Président du conseil scientifique de la Faculté de Génie Electrique et Informatique (FGEI), pour nous avoir guidé, soutenu et pour ses précieux conseils, tout au long de ce travail, et de nous avoir fait profiter de son expérience et savoir, et d'éveiller notre curiosité à connaitre toujours plus.

Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants d'Entraînement Electrique pour leur disponibilité et de nous avoir ouvert les portes du laboratoire QETH. Ainsi qu'à tout le personnel de Génie Electrique et Informatique.

Nous remercions toute personnes ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

DEDICACES



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A

*La mémoire de mon père, parti à jamais en janvier
2010, paix à son âme.*

*Ma très chère mère, perle de ma vie, celle sans qui
je ne serais pas ce que je suis et qui a toujours
été là depuis mes tout premiers parcours et
veillé à mon confort, je te dois tout, que dieu
nous la garde et protège,*

Mes frères Mani et Nassim,

*Mon petit neveu adoré Enzo ainsi qu'à sa maman
Caroline,*

Mon oncle, sa femme et ses enfants, Aris et Melissa

Toutes mes tantes et leurs familles

Toute ma famille, grands et petits

*Tous mes amis, en particulier Idir pour sa présence
soutient et encouragements ainsi qu'à mon
amie Katya*

Mon binôme kahina ainsi qu'à toute sa famille,

Mes camarades de notre promotion.

Thínhinane



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A la mémoire de mon père et que Dieu la
cueille dans son vaste paradis;*

*A celle qui je dois tout, même ma vie, ma
très chère mère que Dieu la protège pour
nous ;*

A mes deux très chers frères

Yousef et Mourad

Et à mes Oncles et leurs petites familles;

*Sans oublier ma très chère tante Zazie et
ma petite chère Katia ;*

A toute mes amis(es) sans exception ;

A mon binôme Tina et à toute sa famille ;

A tout mes chères ;

*Et surtout sans oublié les étudiants de ma
promotion.*

kahina

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : généralités sur les machines linéaires

I-1. Introduction	3
I-2. Machine linéaire et entraînements	3
I-2-1. Entraînement direct	3
I-2-2. Entraînement indirect	4
I-2-3. Comparaison	5
I-2-4. Comparaison technique	6
I-3. Architecture, forme et constitution de la machine linéaire.....	7
I-3-1. Définition et constitution générale	7
I-3-2. Description, structure, géométrie et disposition d'une machine linéaire.	8
I-3-2-1. variante de géométrie, forme	10
I-3-2-2. variante de disposition	12
I-3-3. Comparaison entre un moteur linéaire et un moteur tournant	14
I-4. Effets spéciaux	15
I-4-1. Effet de bord (largeur finie)	15
I-4-2. Effet de longueur finie	16
I-5. Types de machines linéaires	17
I-5-1. Moteur linéaire synchrone à aimants permanents	17
I-5-2. Moteur linéaire asynchrone (à induction)	19
I-5-3. Moteur linéaire à courant continue	20
I-5-4. Moteur linéaire pas à pas	20
I-6. Principe de fonctionnement de la machine linéaire	21
I-7. Schéma électrique équivalent de la machine linéaire	22
I-8. Avantages et inconvénients de la machine linéaire	23
I-8-1. Avantage	23
I-8-2. Inconvénients	23
I-9. Domaine d'application et recherche actuelle sur les machines linéaire	24
I-10. Conclusion	24

Chapitre II : Magnétisme, équation électromagnétique et matériaux magnétique

II-1. Introduction	25
II-2. Historique sur le magnétisme	25
II-2-1. Les premiers écrits traitant de la pierre d'aimant origine du nom "magnétisme"	25
II-2-2. Premières observations des phénomènes magnétiques.....	26
II-3. Les aimants permanents	27
II-3-1. Différents types d'aimants permanents.....	28

II-3-2. Propriétés magnétiques générales des aimants permanents	28
II-3-3. Aimantation, désaimantation et vieillissement des aimants	29
I-3-3-1. Aimantation	29
I-3-3-2. Désaimantation	29
I-3-3-3. Vieillissement	30
II-4. Matériaux magnétiques	30
II-4-1. Notion de moment magnétique	30
II-4-1-1. Au niveau atomique	30
II-4-1-2. Dans un aimant (exemple ferromagnétique)	31
II-4-2. Propriétés des matériaux magnétiques	32
II-4-2-1. L'aimantation	32
II-4-2-2. La polarisation	33
II-4-2-3. La susceptibilité magnétique	33
II-4-2-4. La perméabilité magnétique	33
II-5. Classement des matériaux magnétiques	34
II-5-1. Matériaux paramagnétiques	34
II-5-2. Matériaux diamagnétiques	34
II-5-3. Matériaux ferromagnétiques	34
II-6. Cycle d'hystérésis et champ de première aimantation	35
II-7. Classification des matériaux ferromagnétiques	37
II-7-1. Matériaux ferromagnétique doux	37
II-7-2. Matériaux ferromagnétiques durs	38
II-8. Les tôles magnétiques	38
II-8-1. Tôles à grains orientés	38
II-8-2. Tôles à grains non orientés	39
II-9. Grandeurs électromagnétiques, équations de Maxwell.....	39
II-9-1. Grandeurs fondamentales et définition	39
I-9-1-1. Champ électrique E	39
I-9-1-2. Champ magnétique H	40
I-9-1-3. Champ magnétique d'induction B	40
I-9-1-4. Flux magnétique Φ	40
I-9-1-5. Densité de charge électrique	41
I-9-1-6. Densité de courant	41
I-9-1-7. Circuit magnétique	41
II-9-2. Equations de Maxwell	42
II-9-4-1. Première équation de Maxwell	42
II-9-4-2. Deuxième équation de Maxwell	43
II-9-4-3. Troisième équation de Maxwell	44
II-9-4-4. Quatrième équation de Maxwell	44
II-9-4-5. Tableau récapitulatif des équations de Maxwell	46
II-9-3. Loi d'Ohm.....	46
II-9-4. Relation des milieux	47
II-9-4-1. Cas d'un milieu magnétique linéaire	47
II-9-4-2. Cas d'un milieu diélectrique linéaire	47

II-9-4-3. Pour un aimant permanent	47
II-10. Phénomènes électromagnétiques	48
II-10-1. Formulation magnétostatique bidimensionnelle	48
II-10-2. Formulation en termes de potentiel vecteur magnétique.....	48
II-10-2-1. En coordonnées cartésiennes	49
II-10-2-2. En coordonnées cylindriques	50
II-10-3. Formulation magnétodynamique bidimensionnelle.....	51
II-11. Conclusion	51

Chapitre III : méthodes de résolution

III-1. Introduction	52
III-2. Méthode des différences finies	52
III-3. Méthode d'intégrale de frontière	54
III-4. Méthode des éléments finis	54
III-4-1. Introduction	54
III-4-2. Principe de la méthode des éléments finis	54
III-4-3. Formulation éléments finis des équations électromagnétiques	54
III-4-3-1. Formulation vibrationnelle	55
III-4-3-2. Formulation résidus pondérés	56
III-4-3-3. Discrétisation du domaine d'étude	57
III-4-3-3-1. Eléments de références	57
III-4-3-3-2. fonctions d'interpolations	59
III-4-3-3-3. Fonction d'approximation sur un élément	60
III-4-4. Formulation élément finis.....	61
III-5. Condition aux limites	62

Chapitre IV : Application

IV-1. Introduction	63
IV-2. Présentation du dispositif étudié	63
IV-2-1. Caractéristiques et données utilisée	64
IV-2-1-1. Données électromagnétiques	64
IV-2-1-2. Données mécaniques	64
IV-2-1-3. Caractéristiques de résolution	64
IV-3. Application 1 : Dispositif test à 3 encoches à un aimant	64
IV-3-1. Relevé des différents graphes	65
IV-3-1-1. Avant le déplacement	65

IV-3-1-2. Apres le déplacement	70
IV-4. Application 2 : Dispositif à 6 encoches à 1 aimant	77
IV-4-1. Relevé des graphes.....	77
IV-5. Application 3 : Dispositif à 6 encoches à 2 aimants	85
IV-5-1. Relevé des graphes	85
IV-6. Application 4 : Dispositif à 6 encoches à 3 aimants	93
IV-6-1. Relevé des graphes	93
IV-7. Application5 : Dispositif à 6 encoches à 1 aimant et changement de la perméabilité magnétique mur de la culasse	101
IV-7-1. Application	101
IV-7-2. Résultats obtenus : allure de la force en fonction du déplacement pour différents μ_r	102
IV-7-3. Résultats obtenus pour la vitesse en fonction du déplacement pour différents μ_r	102
IV-7-4. Résultats obtenus pour la force en fonction de la vitesse pour différents μ_r	103
IV-8. Application 6 : dispositif à 1 aimant et 6 encoches et relevé des graphes associés à la force, vitesse en fonction de μ_r changeant	104
IV-8-1. Variation de la force en fonction de μ_r	105
IV-8-2. Variation de la vitesse en fonction de μ_r	106
IV-9. Conclusion	106
 Conclusion générale	 107

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE :

Le progrès sans cesse en évolution des machines électriques et la conception des dispositifs électromagnétiques ces dernières décennies a donné l'essor à plusieurs concepts tel les machines linéaires, caractérisées par une multitude de domaines d'applications industrielles, ceci dit, toute études dans le domaine de modélisation électromagnétique en générale et des dispositifs ayant des parties en mouvement visant à tenir compte des phénomènes physiques complexes en minimisant le recours à l'application directe ont été rendu possible grâce à l'introduction des outils de calcul numérique et de simulation ainsi qu'à l'évolution grandissante du domaine de l'informatique donnant naissance à plusieurs logiciels de conception assistée par ordinateur, permettant l'expérimentation avant réalisation, parmi ces logiciels figure Matlab (Matrix Laboratory) qu'est un langage très puissant qui fait des calculs intenses, et est un système de modélisation numérique.

L'entraînement électrique se trouve partout et dans diverses applications, entraîner des charges et convertir de l'énergie électromécanique par rotation-translation se fait grâce à l'utilisation de beaucoup d'organes de transmission pour assurer l'entraînement électrique et ce en faisant appel à des engrenage, crémaillères courroies, poulies parlants et d'autres dispositifs assurant ainsi le mouvement rotatif en linéaire ou inversement, cependant ce type de transformations pose problème des inerties qui limitent la vitesse et l'accélération des systèmes, les chercheurs ont donc opté à trouver le moyen d'un entraînement direct sans avoir recours aux pièces de conversion de mouvement d'une autre nature, et ceci en réalisant un dispositif électromagnétique dont le mouvement et l'effort sont directement appliqués à la charge d'où une amélioration considérable de vitesse et précision, ainsi fut l'intérêt grandissant des machines linéaires.

Les méthodes numériques sont de plus en plus utilisées et suscitent l'intérêt des chercheurs et scientifiques, parmi elles, on site : la méthode des éléments finis, la méthode des différences finis ...etc.

La modélisation des machines linéaires permet entre autre l'étude et l'évolution de la force électromagnétique ; le déplacement de la charge ; l'étude de sa vitesse et l'impact de plusieurs autres paramètres tel que la fréquence, le matériau magnétique, principalement les tôles et dans d'autres cas les aimants et les propriétés physiques leurs étant appropriées, il existe cependant plusieurs types de machines linaires parmi elles celles à aimants permanents.

L'usage de ces aimants est très répandu et touche par exemple des domaines comme : les moteurs, générateurs et autres machines tournantes, écouteurs téléphoniques et haut-parleurs, instruments de mesure, composants hyperfréquences, supports d'enregistrement : bande et disques magnétiques [1].

L'importance des matériaux magnétiques dans les applications industrielles a conduit à la représentation des caractéristiques de ces matériaux par leurs cycles d'hystérésis. Ainsi la représentation de ce cycle prend une grande importance dans le domaine de la modélisation et plusieurs modèles de représentation du cycle d'hystérésis ont été développés à savoir le modèle de Preisach, le modèle de Hodgdon, le modèle de Jiles-Atherton, le modèle de Stoner-Wohlfarth [1].

Le présent travail consiste à l'optimisation des performances dynamiques d'une machine linéaire à aimants permanents pour se faire, ce mémoire est constitué de quatre chapitres, le premier étant la présentation de la machine linéaire, le deuxième traite du magnétisme et matériaux magnétiques, les phénomènes et équations électromagnétiques. Une approche de la méthode numérique utilisée qu'est la méthode des éléments finis est résumée dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre concerne l'application du modèle proposé ainsi que les résultats obtenus.

Chapitre I

I-1. Introduction

Parmi les systèmes d'entraînements électriques et les modes de conversion d'énergie électromécanique on trouve la conversion par rotation-translation, et cette dernière nécessite un bon nombre d'organes de transmissions.

Généralement le dispositif de conversion demande un moteur électrique rotatif, un organe de conversion et de guidage formant ainsi un système d'entraînement indirect et qu'est utilisé à grande échelle, mais qui dans certains cas fait défaut chose qui a introduit un nouveau système où l'entraînement est direct par moteur linéaire.

En effet les progrès constamment en évolution des machines électriques ces dernières décennies, a donné l'essor à plusieurs dispositifs tels les machines linéaires, caractérisés par une multitude de domaine d'utilisations industriels récents et qui s'impose lors d'une grande vitesse et précision.

I-2. Machine linéaire et entraînements

La machine linéaire comme son nom l'indique est une machine qui produit un déplacement linéaire, elle trouve un vaste domaine d'application et est utilisée dans l'industrie, que ce soit sur les grosse machines-outils que sur les petits équipements de fabrication, ainsi que dans le transport, l'automatisme, appareils de soins médicaux comme les dispositifs cardiaques artificiels... etc.

Pour assurer un entraînement électrique et convertir ainsi de l'énergie électromécanique par rotation-translation, beaucoup d'organes de transmission sont mis en jeu, pour ce faire on utilise généralement des dispositifs de conversion qui demandent un moteur électrique rotatif, un organe de transmission et de guidage (vis à billes, crémaillère,...), formant un entraînement indirect, utilisable à grande échelle mais présentant des situations où ces systèmes ne répondent pas aux exigences des industrielles qui demandent beaucoup de précisions, une grande vitesse, une bonne fiabilité et longue durée de vie, l'introduction de nouveaux systèmes est donc impérative; c'est ainsi que les entraînements directs par moteurs linéaires ont été sollicités. Il existe donc deux types d'entraînements : direct et indirect.

I-2-1. Entraînement direct

Il s'agit de concevoir un dispositif électromagnétique nommé moteur linéaire dont l'entraînement linéaire est 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, dans ce cas il y'a moins de pièces en mouvement donc moins d'inerties d'où une réduction de la taille du moteur ainsi qu'une bonne précision et moins de pertes dues aux systèmes de transmission et de conversion du mouvement [2].



Figure 1.1 : entraînement à moteur linéaire direct

I-2-2. Entraînement indirect

Ce type d'entraînement est basé sur la transformation d'un mouvement rotatif en linéaire et ce à l'aide des machines tournantes et des organes de transmissions et de conversion du mouvement entre actionneur rotatif et charge, mit en œuvre grâce aux engrenages, crémaillères, courroies ou vis à billes.

Ce mode d'entraînement, souvent utilisé pour son faible coût et usage de machines standards, et permettant un éventuel éloignement du dispositif par rapport à la charge entraînée présente aussi plusieurs inconvénients dont la limitation en terme dynamique, qui est le résultat d'une accélération relativement faible causé par les multiples organes de transmissions et leurs moment d'inerties d'où une force faible et qui n'est pas directement appliquée à la charge.

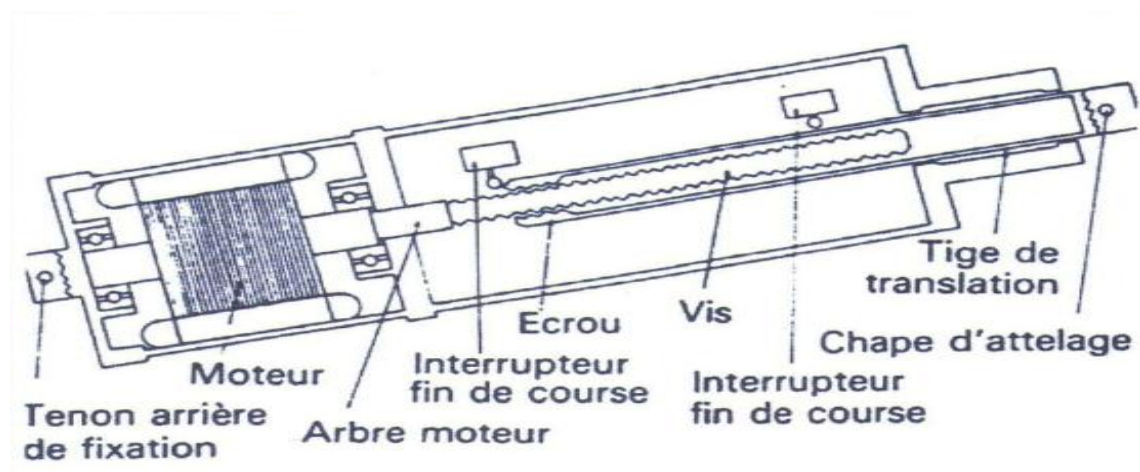


Figure 1.2 : entraînement à moteur linéaire indirect

I-2-3. Comparaison

Pour une idée plus approchée des performances des machines linéaires, on propose un tableau de comparaison entre ces dernières et leurs homologues à entraînement indirect, en choisissant le dispositif le plus utilisé, à savoir une machine rotative couplée à une vis à bille, les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

	Moteur linéaire.	Moteur rotatif + vis à bille.
Vitesse	Vitesse standard d'environ 5 m/s	Vitesse maximum de 1.5 m/s
Inertie	Accélération très importante car la force est directement appliquée à la charge.	Accélération limitée pour cause de cumule de différents moments d'inerties (axe, couplages, vis...).
Précision	Le chariot est muni d'un codeur disposant une tête de lecture optique ou magnétique chose qui améliore la précision. La force n'a pas à être réévaluée, il suffit d'ajouter des modules de chemin linéaire.	Les vis à billes nécessitent une grande précision mécanique. Les mécanismes vibratoires sont difficiles à gérer, pour les éviter il faut augmenter le diamètre, chose qui se répercute sur l'inertie qui devient dans ce cas plus grande donc le couple et la puissance du moteur doivent augmenter. La position exacte n'est pas déterminée car le codeur se trouve dans le moteur rotatif
Propreté	Utilisation de système de refroidissement à air filtré d'où une machine propre.	Utilisation de graisses et de lubrifiants pour un bon fonctionnement chose qui diminue de la propreté de la machine.
Maintenance	Nécessite peu de maintenance, il faut juste toujours s'assurer de la qualité des câbles utilisés étant en mouvement constant. Très grande durée de vie.	La vis à bille étant en contact mécanique constant requiert un entretien constant. La durée de vie d'une vis à bille vaut 1/10 de durée de vie d'un moteur linéaire.
Chaleur	Dissipée au niveau de la charge.	Dissipée à distance de la charge.

Figure 1.3 : tableau comparatif entre un moteur linéaire et un moteur rotatif avec vis à bille.

I-2-4. Comparaison technique

Voici en illustration, une comparaison entre les deux systèmes d'entraînement.

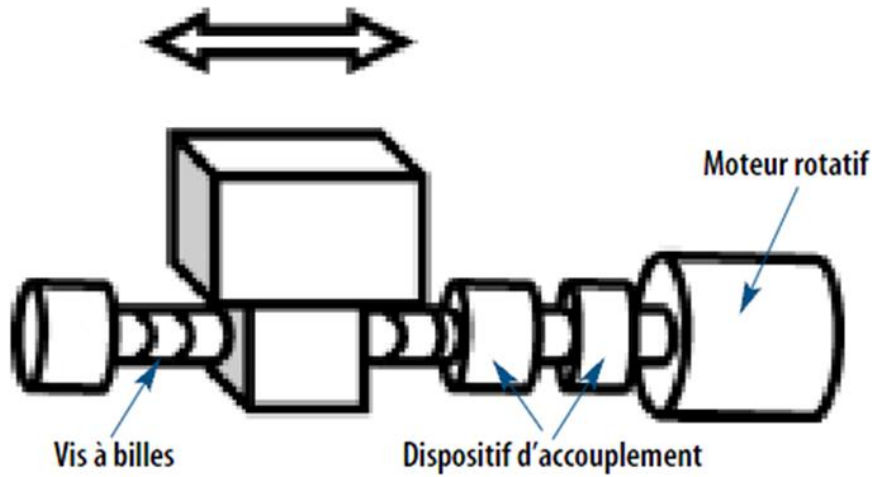


Figure 1.4 : entraînement classique à moteur rotatif.

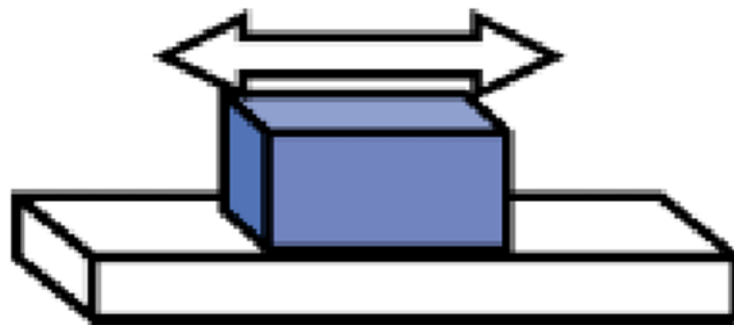


Figure 1.5 : entraînement à moteur linéaire.

I-3. Architecture, forme et constitution de la machine linéaire

I-3-1. Définition et constitution générale

La machine linéaire n'est, en principe, tout autre qu'un déploiement géométrique d'une machine rotative sur un plan transversal par son axe, c'est en outre un moteur classique tournant dont on aurait coupé le stator et le rotor sur un plan radial et dont on aurait déroulé le bobinage comme le montre les figures (II.1), (II.2) et (II.3) ci-dessous.

Le moteur ainsi "déroulé" produira une force de poussée linéaire sur toute sa longueur par la création d'un champ électromagnétique glissant au lieu de développer, comme son homologue rotatif, un couple, un champ tournant.

On désigne alors le stator comme primaire et le rotor comme secondaire pour la machine linéaire. Sachant que l'un des deux peut être statique et l'autre en mouvement.

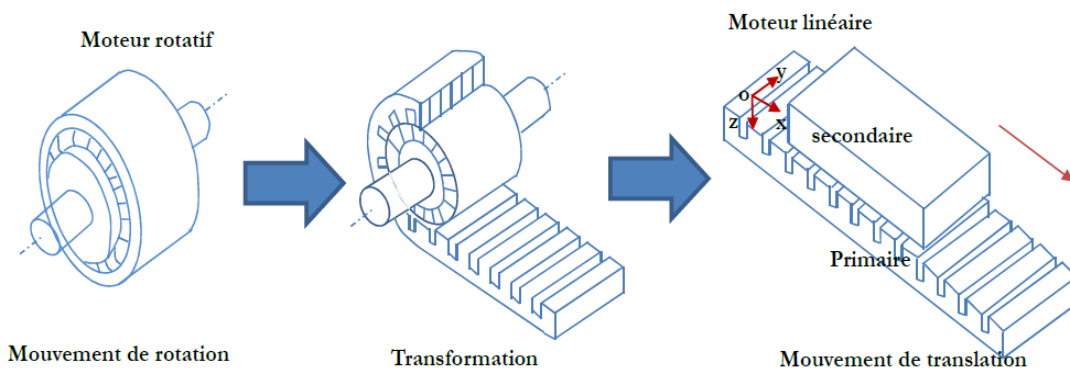


Figure II.1 : Transformation d'un moteur rotatif en linéaire.

La figure (II.1) présente un moteur linéaire à induction avec un seul primaire. Selon la figure (II.1), les enroulements sont placés suivant l'axe transversal \overrightarrow{OY} . Ainsi, les courants créent un champ d'induction magnétique, dirigé suivant l'axe \overrightarrow{OZ} . Si les enroulements sont convenablement répartis et alimentés par une source électrique polyphasée de pulsation ω , le champ magnétique se propage sous la forme d'une onde glissante selon la direction \overrightarrow{OZ} . $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\max} \cos\left(\frac{\pi x}{\tau} - \omega t\right)$ où τ représente le pas polaire du moteur. En réaction, les courants induits créent le flux magnétique au secondaire. Une force de translation apparaît due à l'interaction entre le primaire et le secondaire. Le principe est identique à celui du moteur rotatif à induction, mais au lieu de créer un champ magnétique tournant, c'est un champ magnétique de translation qui est créé. Tous les types de moteurs rotatifs peuvent être utilisés en moteur linéaire [3].

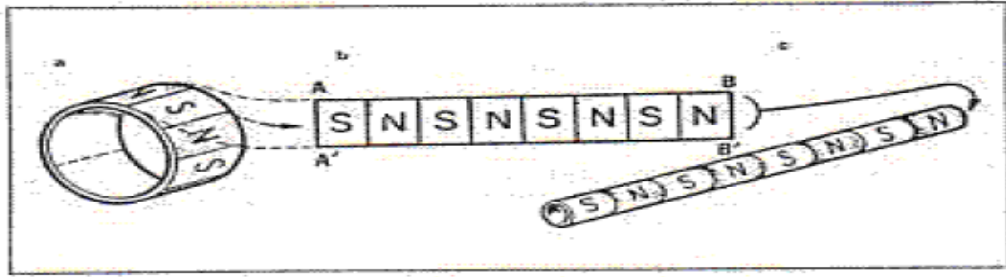


Figure II.2 : Passage d'un moteur rotatif en linéaire.

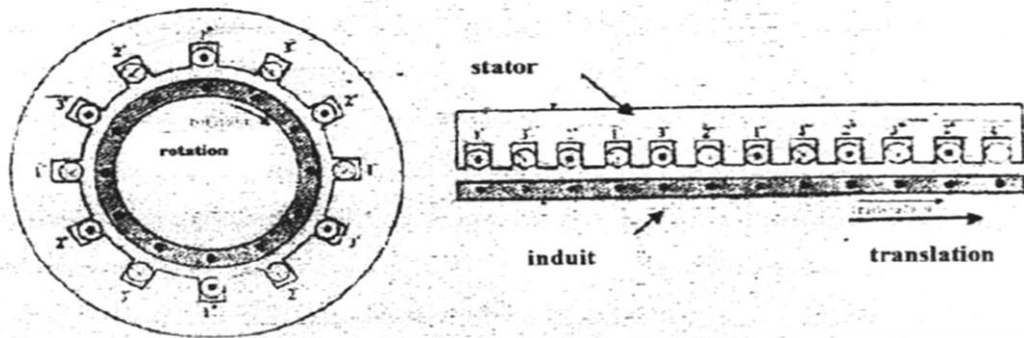


Figure II.3 : Passage d'un moteur rotatif en linéaire.

Cette machine est donc essentiellement constituée d'un stator (culasse) d'inducteurs et d'induit, ou dans certains cas aimants permanant.

I-3-2. Description, structure, géométrie et disposition d'une machine linéaire

La machine linéaire peut présenter différentes formes et structures. Le moteur linéaire recouvre en effet une vaste variété de systèmes, on y distingue des moteurs à plusieurs géométries partant de plate à tubulaire. Voici présenté ici-bas quelques variantes partant de la structure aux architectures et types.

I-3-2-1. variante de structure

De par sa forme, la machine linéaire se présente sous deux types couramment utilisées, une forme plane qu'on peut trouver sous deux aspects : en T ou en U, (Figure II.4) adaptées à maintes utilisations et distinguées par leurs formes, comme on trouve le type tubulaire (Figure II.5) dont la distribution homogène des enroulements inducteurs permet une bonne distribution du champ magnétique autour de l'induit.

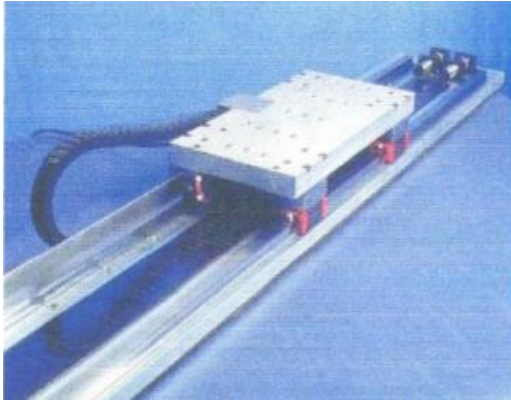


Figure II.4 : moteur linéaire plan



Figure II.5 : moteur linéaire tubulaire
réalisé au niveau du laboratoire d'E.E⁽¹⁾

Cependant l'utilisation de ses structures plate (Figure II.6) ou tubulaire (Figure II.8) repose sur le fait que le rail, partie fixe, éventuellement de grande longueur, peut être entouré par la partie mobile (inducteur), et parmi ces topologies de machines linéaire on cherche à minimiser l'effort exercé sur le système de guidage.

Si la surface active d'entrefer est plane et unique, les effets normaux (non productifs du mouvement attendu) sont loin d'être négligeable et créent des contraintes très fortes sur le guidage [4].

Ces effets sont considérés comme parasites et peuvent atteindre des valeurs 100 fois supérieures à celles des efforts tangentiels qui constituent la composante utile.

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 (II.7)) ou encore tubulaires (Figure (II.8)) [4].

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 ou de collage de la partie mobile sur la partie fixe. En effet il est difficile d'avoir des usinages parfaits assurant un centrage idéal des parties mécaniques. Il est donc nécessaire de réaliser un guidage mécanique très précis.

Ce guidage devrait donc avoir un coefficient de frottement aussi faible que possible, surtout dans les applications où la masse embarquée est grande [4].

(1) : Entraînement Electrique

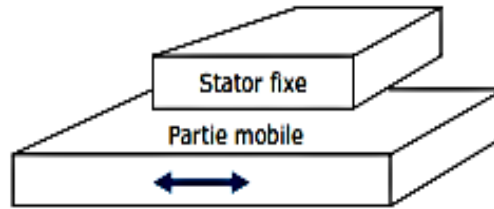


Figure II.6 : moteur linéaire à forme plate

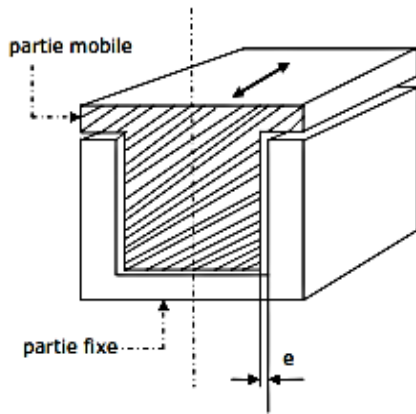


Figure II.7 : moteur linéaire en T ou U.

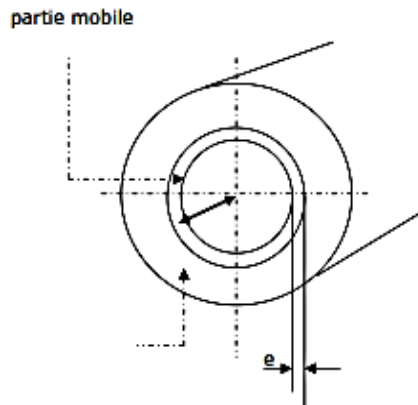


Figure II.8 : moteur linéaire tubulaire.

I-3-2-2. variante de géométrie, forme

Les machines linéaires à structure plane ou tubulaire peuvent présenter une multitude de formes selon leurs géométries, on peut ainsi avoir différentes structures, soit à simple stator à inducteur long, induit court ou bien à inducteur court et induit long (Figure II.9), ou bien à double stator à inducteur long, induit court ou inversement (Figure II.10)

La géométrie à stator unique et à primaire (inducteur) long et induit court est caractérisée par un inducteur distribué tout au long du parcours mais présentant un surcoût de production vue la grande quantité de cuivre nécessitant à sa production.

La seconde géométrie à stator unique et à primaire (inducteur) court et induit long, plus économique (pour le cuivre utilisé) et ayant un système de guidage par rails fabriquées en matériaux ferromagnétiques pour le mouvement de translation, ce dernier est donc très employé.

Ce type de structure (à stator unique) est une variante simple qui s'intègre aisément dans les applications courantes mais qui présente une force d'attraction importante entre stator et partie mobile [5].

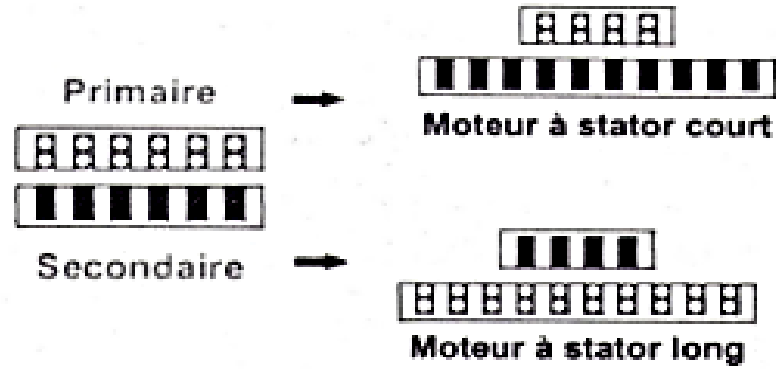


Figure II.9 : les différentes géométries à stator long et court.

Par ailleurs les moteurs linéaires à géométrie plane selon le nombre de primaire : à double primaire sachant que ce dernier peut être long et induit court et inversement (Figure II.10), permet d'obtenir, d'une part des forces de poussées plus élevées que pour la structure à stator unique et d'autre part d'alléger la partie mobile, car si cette dernière est bien centrée, la résultante des forces d'attraction est alors nulle. Cette structure est particulièrement adaptée au cas où le stator est fixe [5].

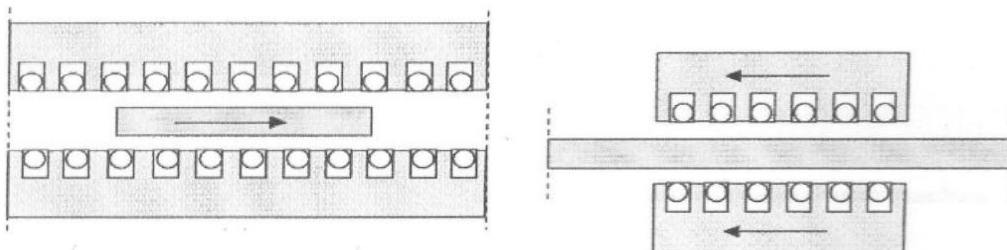


Figure II.10 : les différentes géométries à double stator long et court.

Ces différentes variantes offrent une multitude de possibilités de machines linéaire que voici résumé par le schéma ci-dessus (figure II.11).

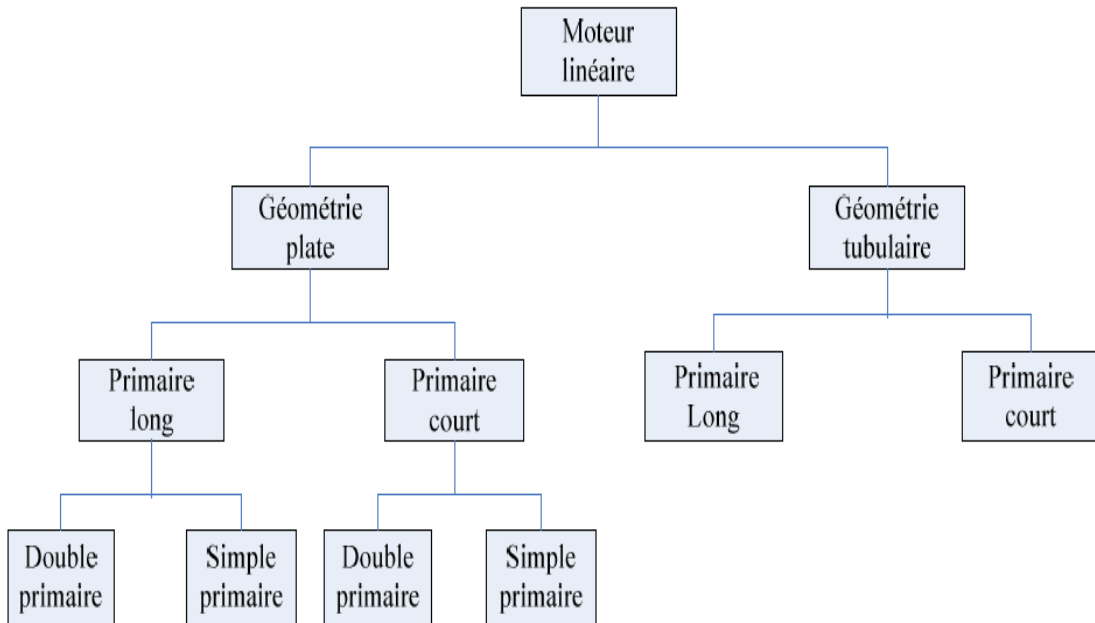


Figure II.11 : classement des moteurs linéaires selon leurs géométries.

I-3-2-3. variante de disposition

Les machines linéaires peuvent être classées par des variantes de dispositions de l'inducteur par rapport à l'induit, et par la partie en mouvement de celle fixe on en distingue donc :

- Machines linéaires à induit mobile et inducteur, rails, fixes : l'induit est en mouvement et alimenté par un câble souple, limitant ainsi sa course de déplacement (Figure II.12).

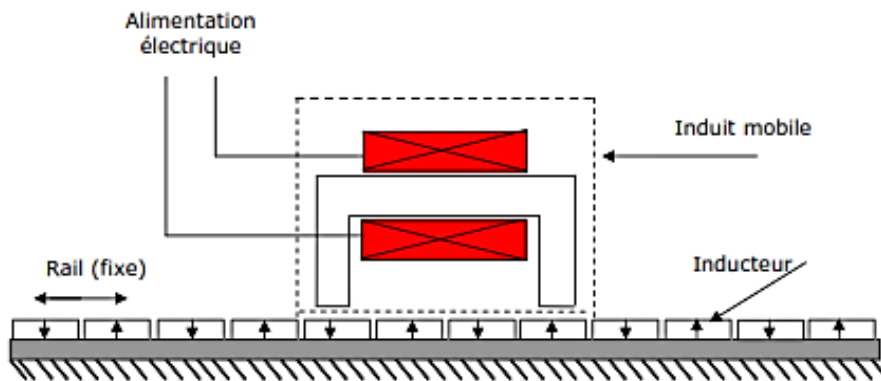


Figure II.12 : Structure à inducteur solidaire du rail fixe

- Machines linéaires à induit fixe et inducteur solidaire à son rail mobiles (Figure II.13).

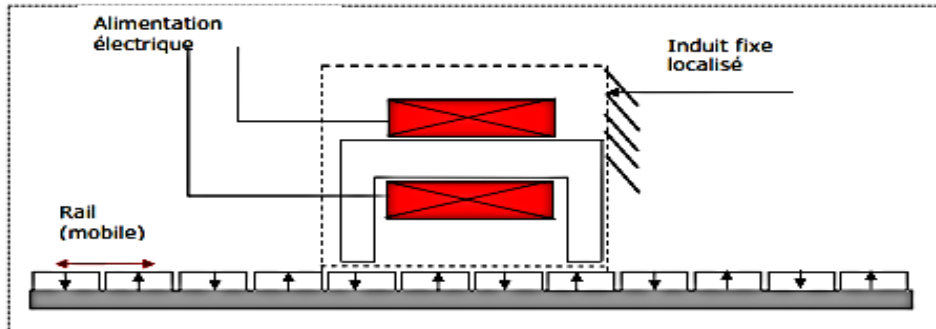


Figure II.13 : Structure à inducteur solidaire du rail mobile

- Machines linéaires à induit fixe distribué le long du rail (voie active dans le cas des trains) et inducteur mobile. Dans ce cas l'énergie est amenée à la partie fixe ce qui évite les difficultés de transmission mais le système d'alimentation est complexe et coûteux (Figure II. 14) [5].

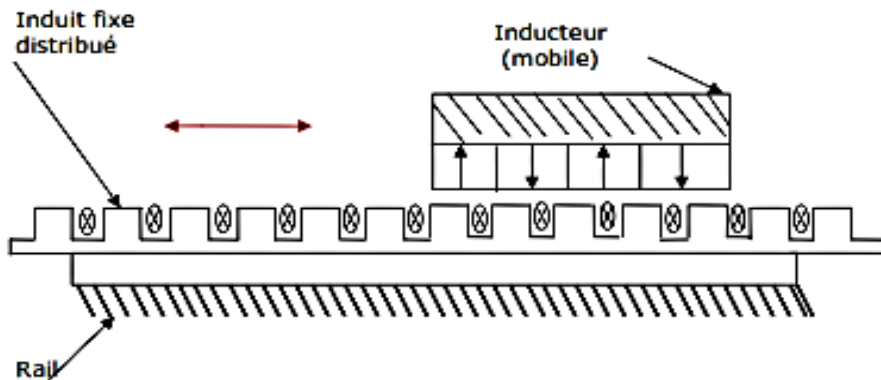


Figure II.14 : Structure à inducteur mobile et induit fixe.

I-3-3. Comparaison entre un moteur linéaire et un moteur tournant type asynchrone

En comparant le moteur rotatif asynchrone à son équivalent linéaire pour sa forme, on constate que la différence réside dans l'apparence et la constitution, en effet, l'induit d'une machine rotative est généralement constitué d'un conducteur physiquement séparé (cage d'écureuil ou bobiné), alors que celui de la machine linéaire peut être constitué d'une simple plaque conductrice solide donc sans direction privilégiée pour les courants [6].

Aussi les machines rotatives sont constituées d'un stator et d'un rotor alors que dans les machines linéaires on peut avoir deux stators inducteurs posés face à face, ce qui facilite la fermeture du flux dans le circuit magnétique d'une part et l'obtention d'une induction magnétique plus importante dans l'entrefer [6].

Par ailleurs l'inducteur et l'induit dans une machine rotative sont, respectivement, mobile et fixe, alors que dans une machine linéaire ils peuvent être fixes ou mobiles, de tels sorte à ce que si l'induit est fixe, l'inducteur serait mobile (dans ce cas l'inducteur est plus court que l'induit), ou bien, si l'inducteur est fixe dans ce cas c'est l'induit qui serait mobile (avec un induit plus court que l'inducteur) [6].

Suite à leur fonctionnement, le moteur linéaire présente des spécificités dues à la disposition de leur partie mobile par rapport à leur partie fixe où s'introduisent des effets spéciaux généralement parasites, et qui interviennent peu dans les machines rotatives. Notamment des systèmes de guidage particuliers, entraînant de nouvelles contraintes au niveau de l'entrefer magnétique. De plus, les moteurs linéaires présentent des effets d'extrémités provoqués par les discontinuités de leurs structures géométriques. Ces différences technologiques par rapport aux moteurs rotatifs doivent être prises en comptes au moment de la conception et de la réalisation pratique [5].

Comme les autres moteurs électriques, les moteurs linéaires comportent deux parties agissant l'une sur l'autre sans contact, à travers des surfaces actives maintenues en vis-à-vis aussi proche que possible, par des dispositifs de centrage auxiliaires. Dans les moteurs rotatifs, les surfaces sont cylindriques et les dispositifs de centrage par des boîtes de roulements sont beaucoup plus simples et efficaces que le guidage sur une structure linéaire où les surfaces sont planes et les dispositifs de centrage sont le plus souvent extérieurs aux moteurs et confondus avec les moyens de guidage du mobile et la résultante des forces d'attraction peuvent être importante et difficile à maîtriser à cause de la distance entre les appuis. Toutefois, certaines structures permettent de s'affranchir de cette force d'attraction et de faciliter ainsi le guidage [5].

Compte tenu du système de guidage entre les parties fixe et mobile d'un moteur linéaire, il est difficile de réaliser un entrefer aussi faible que dans une variante tournante. L'entrefer rapporté au pas de déplacement est, par conséquent, plus élevé. Il en résulte une force par unité de surface plus faible [5].

I-4. Effets spéciaux

La machine linéaire est ouverte à ses extrémités ce qui lui donne l'avantage d'avoir un nombre paire ou impaire de pôles, aussi contrairement à l'induction dans le moteur rotatif, qu'est distribuée en onde tournante et n'est présente nulle part dans l'entrefer, l'induction dans le moteur linéaire ne peut créer dans l'entrefer un champ purement glissant équivalent au champ tournant des machines rotatives et est perturbé par un ensemble de phénomènes, on parle alors d'effet d'extrémités classés en deux catégories :

- Effet de largeur finie (ou encore dit effet de Bord).
- Effet de longueur finie.

I-4-1. Effet de bord (largeur finie) :

Les f.e.m à l'entrée et sortie, dues aux courants induits supplémentaires appelés de fuites qui se ferment en dehors de la carcasse magnétique de la machine, provoquent des effets de bord ou encore dit de largeur finie qui perturbent le champ.

En effet la f.e.m dans l'induit change de signe sur un pas polaire provoquant de ce fait la fermeture des courants correspondants ; cependant si la bande conductrice dans l'induit était un développement plan du rotor à cage où chaque barreau est séparé de son voisin par un isolant, tous les courants induits se fermeraient, l'échange de courant entre les différents barreaux ne pourrait alors se faire que par les connections frontales.

La portion utile de l'induit est constituée par un conducteur unique, le courant se ferme en partie par les bandes latérales et en partie dans la zone active, ce dernier traduit l'effet de largeur finie, diminuant la poussée du moteur, son importance dépend de la longueur relative des parties où glissent et s'annulent les f.e.m utiles ainsi que la résistivité des bandes latérales de fermeture (Figure III.1) [6].

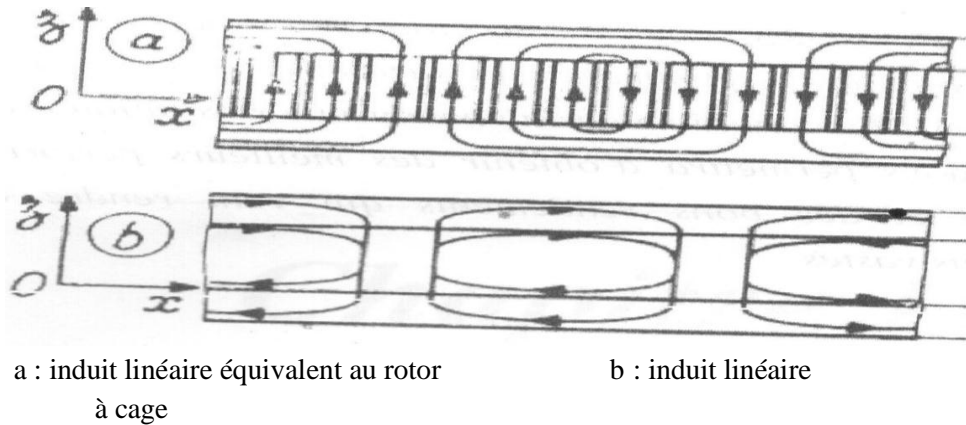


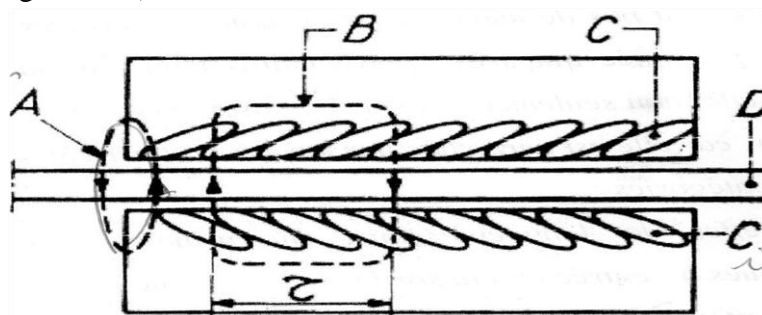
Figure III.1 : Schéma représentant les courants dans l'induit du moteur linéaire

I-4-2. Effet de longueur finie:

L'interruption du circuit magnétique aux extrémités de la machine provoque une discontinuité du champ magnétique, en d'autres termes il y a perturbation du champ magnétique résultant.

Si on examine la distribution du champ magnétique à vide, c'est-à-dire sans tenir compte des courants induits, les courants d'excitations créent dans l'entrefer une onde d'induction glissante B .

D'autre part les dimensions finies de l'inducteur implique une brusque variation de la perméabilité magnétique aux extrémités ceci se traduit par un champ de fuite et apparition de composantes pulsatoires parasites se propageant à l'intérieur de la machine. (Figure III.2) [6].



A=champ de fuite

D= induit

B=champ principal

τ = pas polaire

C=inducteur

Figure III.2 : Coupe longitudinale du moteur linéaire

Ces effets d'extrémité sont donc néfastes pour la machine linéaire, et ont pour conséquences :

- Force de tirée longitudinale.
- Pertes joule supplémentaire.
- Distorsion de la distribution longitudinale du flux.
- Réduction du facteur de puissance et du rendement.

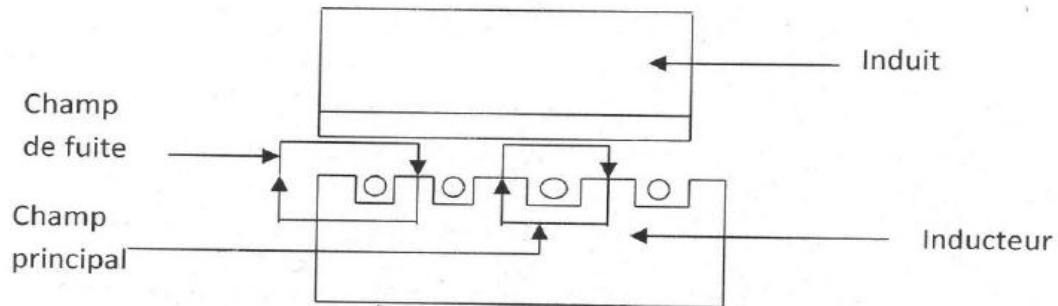


Figure III.3 : Lignes de fuite dans la machine linéaire.

I-5. Types de machines linéaires

Il existe autant de types de machines rotatives que linéaires, en effet chaque type rotatif possède son équivalent linéaire, on y trouve alors des moteurs linéaires à courant continu, des moteurs linéaires synchrones et des moteurs linéaires asynchrones (ou encore dit à induction)...etc.

I-5-1. Moteur linéaire synchrone à aimants permanents

Il existe des moteurs linéaires synchrones à aimants permanents, l'utilisation de ces derniers comme source d'excitation a attribué à la machine linéaire un surcroît de performances, une densité de force élevée et d'excellentes caractéristiques (Figure IV.2).

Le principe de fonctionnement du moteur linéaire à aimants permanents repose sur l'action d'un champ électromagnétique de l'inducteur sur l'induit ce dernier étant composé d'aimants permanents. Le bobinage est régulièrement reparti sur les dents de l'inducteur.

Généralement, les aimants utilisés dans les moteurs linéaires synchrones à aimants permanents sont de type Néodyme-Fer-Bore, les aimants permanent de ce type sont actuellement les produits les plus avancés technologiquement, et moins coûteux que ceux en Samarium Cobalt. Les aimants $Nd_2Fe_{14}B$ sont fabriqués par compression, puis frittage de poudres métallurgiques. Ils développent une puissance

énergétique jusqu'à 10 fois supérieure aux matériaux magnétiques traditionnels et sont conseillés pour des applications aux températures de fonctionnement entre 80 et 220 degrés Celsius.

La présence de fer peut entraîner une corrosion de ce matériau, c'est pourquoi il est déconseillé de l'utiliser à l'état brut dans un environnement hostile ou humide. Pour remédier à cet inconvénient, les aimants en Néodyme sont habituellement protégés par un revêtement anticorrosif en nickel ou/et cuivre, étain, zinc.

Les moteurs linéaires à aimants permanents sont souvent alimentés en bipolaire, ainsi les enroulements, sont mis en série pour former deux phases décalées d'un angle $\pi/2$. L'alimentation des deux phases par des courants positifs et négatifs provoque un mouvement linéaire appliqué sur l'induit

Dans les moteurs linéaires synchrones, l'entraînement à forte poussée est nécessaire, sa structure est basée sur le développement à plat d'une machine synchrone rotative. Ainsi pour chaque modèle synchrone on a son équivalent linéaire, mais pour des raisons économiques seules quelques topologies sont considérées comme pratiques. Les modèles réalisables se trouvent être les machines linéaires synchrones homopolaires (dont le champ magnétique est statique) et hétéro polaires, tout comme les moteurs linéaires à guide actif avec enroulement inducteur conventionnel ou supraconducteur sur le corps mobile, il y'a aussi des moteurs linéaire synchrones à guide passif, ces derniers sont utilisés pour les applications à courts déplacements et à faibles poussées, comme l'on trouve les moteurs linéaire à aimants permanents, souvent alimentés en bipolaire [7][5].

Voici représentée ci-dessus un schéma d'un moteur linéaire synchrone (Figure IV.1 ; IV.2).

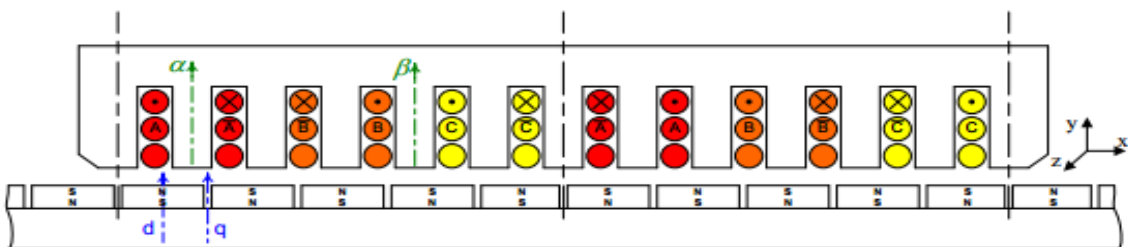


Figure VI.1 : schéma simplifié de la structure d'un moteur linéaire synchrone LMD 10-050 d'ETEL

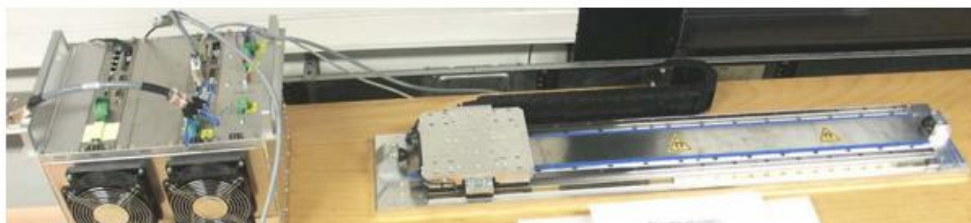


Figure IV.2 : moteur linéaire synchrone à aimants permanant LMD 10-050 Plat, simple-face

I-5-2. Moteur linéaire asynchrone (à induction) :

Tout comme le moteur asynchrone rotatif, le moteur linéaire asynchrone est utilisé comme convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique ou inversement ; et possède le même principe de fonctionnement que son équivalent rotatif. La machine linéaire à induction comporte un enroulement inducteur alimenté sous courant alternatif et d'un induit non alimenté.

Si l'induit comporte un enroulement alors il sera fermé sur lui-même, dans le cas échéant il sera sous forme de tôles en aluminium ou en cuivre.

Ce type de moteurs est caractérisé par sa simplicité de construction, robustesse et coût de fabrication (pas cher) [6].

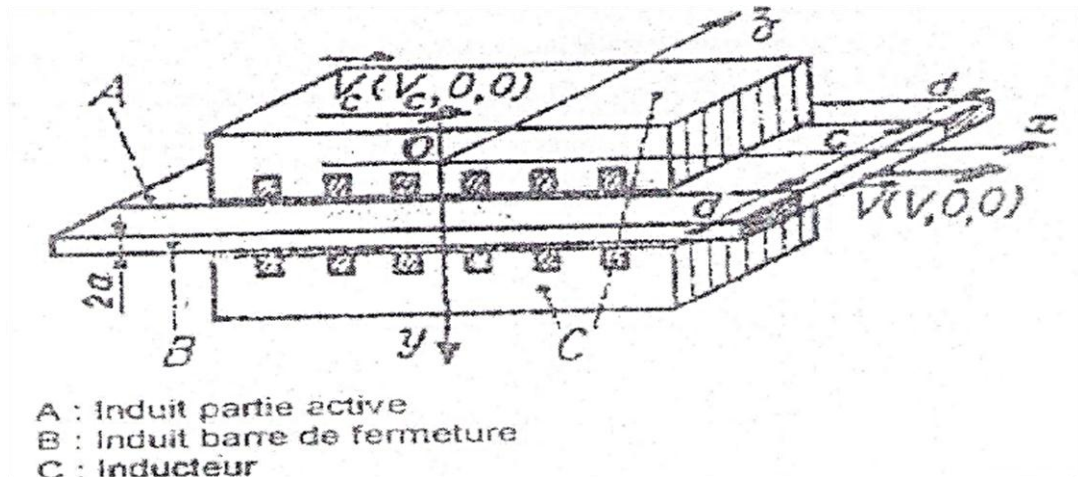


Figure IV.4 : Moteur linéaire à induction



Figure IV.5 : Model machine linéaire asynchrone réalisée par des étudiants en entraînements électriques

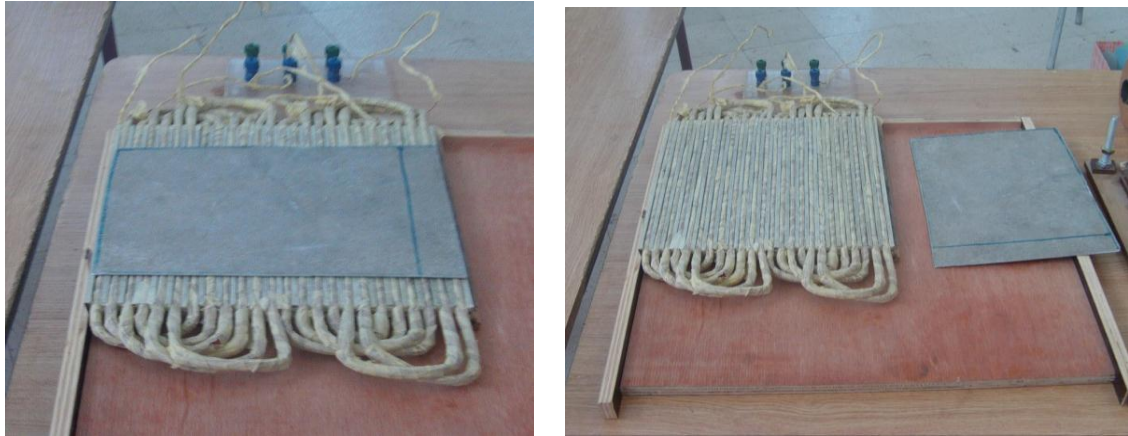


Figure IV.6 : autre model réalisé par des étudiants d'entraînements électriques

I-5-3. Moteur linéaire à courant continue

La structure du moteur linéaire à courant continu, bien que légèrement modifiée, est identique à celle du moteur rotatif à courant continu, soit à pôles lisses ou saillants, ce type de moteurs sont adaptés pour les long déplacements à très forte puissance et sont utilisés principalement dans les domaines de transports et tractions ferroviaires.

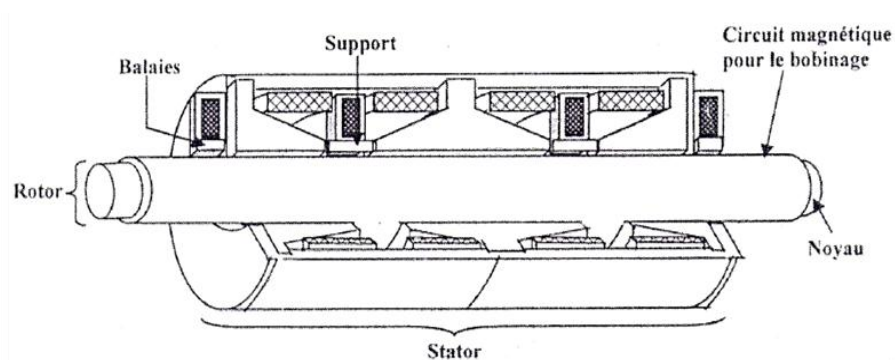


Figure IV.7: moteur linéaire à commutateur à courant continu.

I-5-4. Moteur linéaire pas à pas

Le moteur pas à pas linéaire se compose d'un stator portant le bobinage et d'une partie mobile se déplaçant linéairement. Cette partie mobile peut être réalisée à partir d'une pièce ferromagnétique dentée, dans ce cas la structure est dite à réluctance ou passive ; ou alors la partie mobile est maniée d'aimants permanents et dans ce cas la structure est dite polarisée ou active [5].

I-6. Principe de fonctionnement de la machine linéaire

En alimentant les enroulements inducteurs par une source triphasée de pulsation ω , des courants circulent selon la direction de l'axe (OZ), ces derniers donnent naissance à un champ magnétique principale de direction axiale (OY), (Figure V.1).

Comme les enroulements inducteurs sont uniformément repartis, le champ magnétique principal et la force magnétomotrice créés se propagent dans la direction (OX), sous forme d'une onde glissante avec une vitesse linéaire V_c dont l'expression est la suivante :

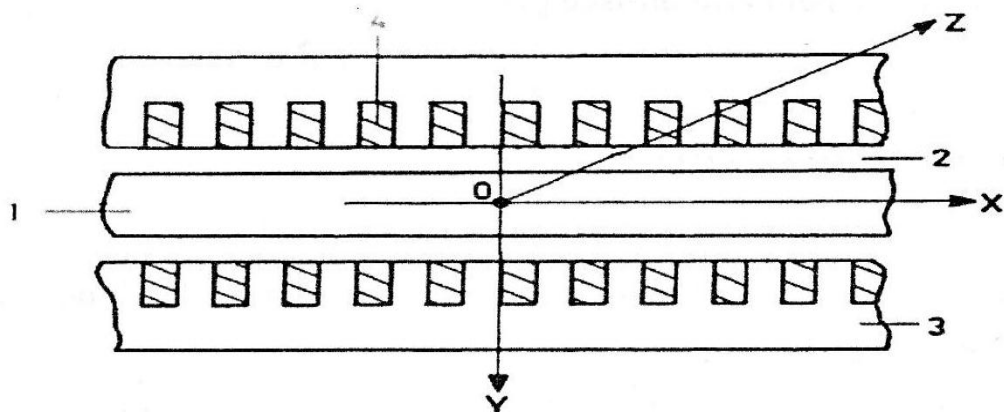
$$V_c = \omega * K$$

Avec :

K = Le nombre d'onde.

Lorsque le flux magnétique traverse l'entrefer, il induit des courants dans le rotor et par conséquent un flux magnétique qui glisse par rapport à l'induit et l'inducteur, mais ce flux reste immobile par rapport au flux principal.

Le principe de fonctionnement du moteur linéaire à induction est donc celui du couplage magnétique asynchrone : les enroulements d'excitations créent un champ magnétique glissant traversant l'entrefer et engendrant ainsi dans l'induit (qui n'est tout autre que la partie rotorique d'une machine tournante) des f.e.m, en d'autres termes des courants.



1= Induit

2= Entrefer

3=Inducteur

4= Enroulement

Figure V.1 : Schéma du moteur asynchrone envisagé.

I-7. Schéma électrique équivalent de la machine linéaire

En négligeant l'effet d'extrémités, dans le moteur linéaire, le champ d'induction résultant serait sensiblement équivalent au champ tournant des machines rotatives et aurait comme expression:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\max} e^{j*(\omega t - kx)}$$

Par ailleurs il est possible de tenir compte des effets spéciaux sur le schéma équivalent monophasé du moteur linéaire (Figure VI.1).

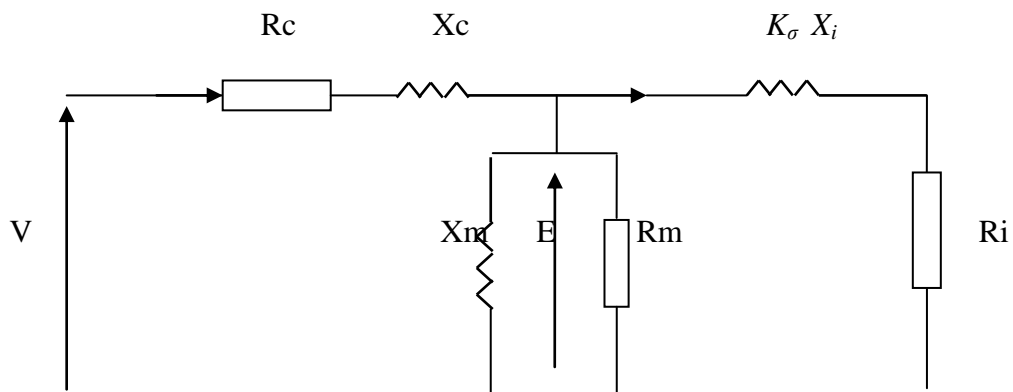


Figure VI.1 : schéma équivalent relatif à une phase d'une machine linéaire asynchrone.

Avec :

R_c et X_c : Représentent respectivement la résistance et la réactance de fuite des enroulements inducteurs.

R_i et X_i : Représentent respectivement la résistance et la réactance de fuite de l'induit.

X_m : La réactance de couplage magnétique entre l'inducteur et l'induit.

R_m : La résistance représentant les pertes électromagnétique.

K_σ : Coefficient multiplicateur de X_i introduit par sa partie imaginaire, l'augmentation des fuites magnétiques.

I-8. Avantages et inconvénients de la machine linéaire

I-8-1. Avantage

- Grande dynamique du mouvement (vitesse maximale ou accélération).
- Grande précision ou résolution de positionnement.
- Fiabilité dans divers situations, et durée de vie valant dix fois plus celle d'un système de transmission moteur rotatif-vis à bille.
- Faible réactances de magnétisation.
- Faible inertie mécanique et excellente capacité thermique, ce qui augmente leurs champs d'application.
- Dynamique élevée par une réduction de massa (vitesse, accélération).
- Flexibilité d'utilisation (partie indépendante sur un même axe).
- Entraînement direct est donc absence de jeu de transmission.
- Mouvement directement linéaire : guidage magnétique.
- Refroidissement séparé du primaire et du secondaire.
- Coût de maintenance très bas [6].

I-8-2. Inconvénients

Bien que les avantages des moteurs linéaires soient nombreux ils possèdent aussi des inconvénients, Parmi lesquels se trouve:

- L'emplacement du moteur linéaire près de la charge, qui dans certains cas peut :
 - Perturber le processus en cours par les échauffements produits par le moteur dans la zone de travail.
 - Le circuit magnétique du moteur peut attirer des particules magnétiques (copeaux d'usinage) avec risque d'accumulation locale.
 - Un moteur placé dans l'environnement agressif (certaines huiles, eau) doit être protégé de manière adéquate.
- La conception de l'enroulement doit supporter de grandes densités du courant.
- La surface de l'inducteur conduit alors à des encoches très profondes, ce qui demande une quantité importante de cuivre.

Le circuit des inducteurs doivent être complété par certains nombre d'écrans magnétique [6].

I-9. Domaine d'application et recherche actuelle sur les machines linéaire

La machine linéaire trouve sa place dans divers champs d'applications à l'instar de la traction ferroviaire, les machine outils, les ascenseurs, les robots culinaires, les tringles de rideaux et plusieurs autres applications.

Depuis les années 1960, le Japon est le pays le plus innovateur dans le domaine des moteurs linéaires, les études actuelles au Japon sont basées sur :

- Les systèmes motorisés multidirectionnels,
- Les méthodes d'analyse systématique des systèmes à moteurs linéaires,
- Les méthodes de mesure et d'évaluation des moteurs linéaires 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 (efforts de coupe, etc.)
- Commandes limitant les variations de paramètres (évolution et répartition de la masse, etc.)

Utilisation des moteurs linéaires à aimant permanents [5].

Ce travail s'inscrit donc parfaitement dans les problématiques actuelles sur l'étude qui vise à optimiser la force de poussée d'un moteur linéaire à aimants permanents.

I-10. Conclusion

Aujourd'hui, les moteurs linéaires sont largement utilisés dans l'industrie, notamment dans les systèmes de production

Toutefois, de par 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 force indésirables. Pour affiner ce modèle et pour quantifier l'influence de ces perturbations, il est donc nécessaire de modéliser finement tous ces phénomènes [6].

Par ailleurs nous nous somme intéressé à cette machine dans le but de concevoir un circuit magnétique optimisé.

Chapitre II

II-1. Introduction

De tout les temps, des hommes se sont intéressés au magnétisme. L'attraction ou répulsion de deux aimants disposés en vis-à-vis sans contact constitue en effet une manifestation évidente de l'existence de forces d'interaction à distance, et ce seul fait suffit à s'interroger sur les lois de la physique qui s'impose à nous [8].

L'intérêt pour le magnétisme et les matériaux magnétiques est allé croissant aussi pour leurs applications. Tout comme le courant électrique nous ne pouvons que constater les effets du magnétisme, nous ne pouvons pas voir les lignes de forces existantes autour d'un aimant. Les propriétés magnétiques de certains matériaux sont dues à la rotation des électrons sur eux-mêmes dans l'atome, ce phénomène est appelé spin. Ceci dit les matériaux magnétiques se divisent en trois principales catégories : les matériaux paramagnétiques, diamagnétiques, ferromagnétiques [6] [8].

Les applications des matériaux magnétiques varient et vont des transformateurs, aux machines électriques mais aussi aux inductances, actionneurs (rails par exemple) et électroaimants ; toutes ces applications reposent sur les matériaux magnétiques, mais également sur les deux lois physiques qui gouvernent les phénomènes magnétiques en électrotechnique, à savoir les lois de Faraday et d'Ampère [6].

II-2. Historique sur le magnétisme

II-2-1. Les premiers écrits traitant de la pierre d'aimant origine du nom "magnétisme"

Toutes nos informations sur les origines du magnétisme en Chine ont été tirées d'un ouvrage chinois sur l'Histoire de l'Electromagnétisme ainsi que d'un ouvrage récent de M. Soutif sur les origines des Sciences et des Techniques en Orient.

On sait par **Guanzhong** que, dans l'antiquité chinoise, on appelait «**pierres tendres**» les pierres d'aimant. C'est le nom général de tous les oxydes fortement magnétiques existant dans la nature et ayant un caractère de magnétisme permanent. Ce sont des minéraux magnétiques à base de fer : $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{FeO-TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$; parfois aussi FeS_{1+x} , et surtout la magnétite Fe_3O_4 . Ce nom de «pierres tendres» a pour origine leur attirance pour les métaux ferreux, par analogie avec la tendresse que manifeste une mère à son enfant.

A l'époque de la dynastie des Han Orientaux, **Gaoyiu** écrivait: «Pierre Tendre est la mère du fer, elle peut donc attirer son enfant». Ce texte nous laisse à penser que le fer était alors extrait de minerais magnétiques. Les habitudes changent: de nos jours, les aimants sont désignés sous le vocable de matériau magnétique «**dur**» par opposition avec les matériaux magnétiques «**doux**» qui se désaimantent spontanément! [9].

Par ailleurs, plus de trois siècles avant J-C, **Aristote** savait déjà que la magnétite aimante le fer ; et plus près de nous, à la fin du 16eme siècle, le médecin anglais **William Gilbert** (1544-1603) réalisait une étude expérimentale du champ magnétique d'une sphère alimentée qui l'amenait à assimiler la terre à un grand aimant sphérique[8].

Ainsi fut donné, après toutes ces découvertes d'aimants et de phénomènes magnétiques, le nom de « magnétisme » à la science qui étudie ces interactions d'aimants entres eux et « matériaux magnétiques », tous matériaux pouvant soit être attiré par des aimants, soit aimanté eux même afin d'attirer d'autres matériaux.

II-2-2. Premières observations des phénomènes magnétiques

La découverte des phénomènes magnétiques fut il y'a de cela plusieurs millier d'années dans une ville nommé Magnésia, en effet on y a trouvé des mines de fer comportant un grand nombre de pierres qui avaient la caractéristique d'attirer le fer et de se repousser entre elles mais aussi de s'attirer si l'une d'entre elles était retournée de 180 degrés. On donna le nom de "magnétite" ou encore " pierre de Magnésie " (Figure II.1), après cette découverte à cette pierre tout en faisant allusion à l'endroit (Magnésia) où elle a été trouvée la première fois [6].

Depuis, vers 1269 on a découvert que cette pierre pouvait aimanter une aiguille de fer lui permettant ainsi de s'orienter, il s'en est suivit du concept de « pôles magnétiques » puis la boussole fut créée avec la constations du magnétisme terrestre [6].

Par ailleurs l'attraction magnétique semble bien être le premier phénomène magnétique qui ait attire l'attention des hommes sur la «pierre d'aimant», puisque c'est de lui que découle son nom chinois de «pierre tendre» [9].

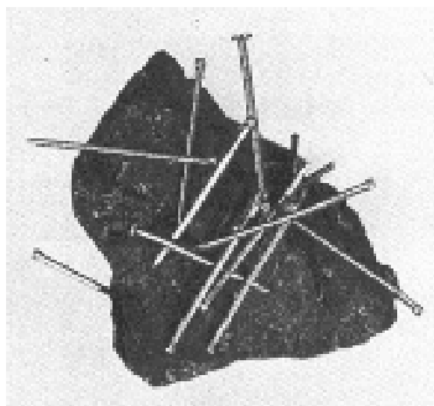


Figure II.1 : pierre de Magnésie

II-3. Les aimants permanents

Les aimants permanents ont d'abord été élaborés à partir d'acier ou de chrome-cobalt. Vers 1935, on a commencé à étudier des alliages de fer-aluminium, nickel, cobalt et cuivre. Ces alliages fondus ou frittés sont connus sous le nom de ticonal ou alnico. En 1951, on a utilisé les ferrites de baryum et de strontium.

Actuellement les alliages ticonal et ferrites sont employés couramment et sont les deux types de matériaux à aimants permanents les plus utilisés. Avec les matériaux modernes, la désaimantation due au vieillissement ou à l'action d'un champ magnétique (pas trop intense), peut être considérée comme négligeable. Cette propriété permet d'ailleurs de réaliser des aimants présentant des pôles de nom contraires très proche les uns des autres. Ces différentes propriétés ont permis d'abandonner les formes classiques d'aimants permanents en fer à cheval ou en long barreau (Figure II.2.1 et Figure II.2.2). Il est maintenant possible de réaliser des aimants de formes diverses et très pratiques [10].

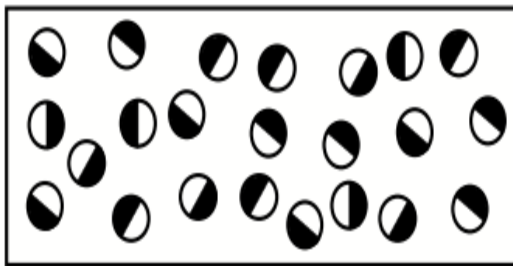


Figure II.2.1 : barreaux non aimanté

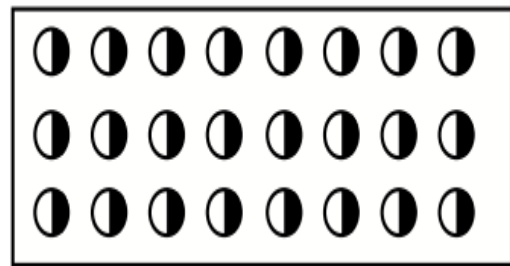


Figure II.2.2 : barreaux aimanté

Dans les appareils de mesures électriques (galvanomètres, ampèremètres et voltmètres), ils ont permis notamment une grande amélioration de la sensibilité et de la fiabilité. Dans certains moteurs et certains générateurs (alternateurs de voitures, dynamos, magnétos), ils sont employés à la place d'électroaimants. On les emploie aussi en électronique pour les haut-parleurs (Figure II.3) et les microphones [10].

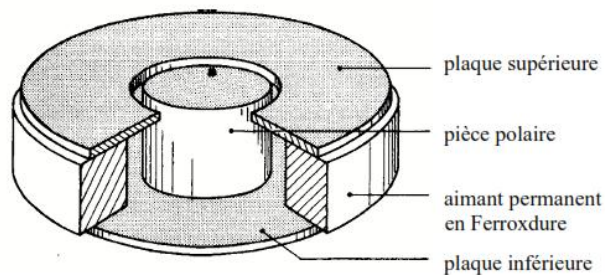


Figure II.3 : Aimant permanent pour haut-parleur.

II-3-1. Différents types d'aimants permanents

Le choix de la nature des aimants d'une machine à aimants permanents à une influence non négligeable sur son comportement. Les caractéristiques des principaux types d'aimants utilisés dans les machines électriques sont données ci-après.

- Les ALNiCo sont des alliages à base de fer, d'aluminium, de nickel et des additions de cobalt, cuivre ou titane. Ils peuvent être isotropes ou anisotropes. On trouve des aimants ayant une induction rémanente B_r avoisinant 0.7 T pour les isotropes et 1.2 T pour les anisotropes avec une valeur faible du champ coercitif (H) variant de 40 à 80 A/m et une énergie spécifique allant de 10 à 18kJ/m³.
- Les ferrites sont des composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium. Ils sont obtenus par frittage et peuvent être isotrope ou anisotropes. Ces aimants possèdent des performances modestes mais se sont imposés dans de très nombreuses applications en raison de leur faible coût et leur rigidité magnétique élevée. Ils trouvent leurs applications dans des machines à aimants de faible puissance à faible coût : puisqu'ils possèdent une induction rémanente faible (environ 0.4 T).
- Les terres rares telles que les Samarium-Cobalt et les Néodyme-Fer-Bore sont beaucoup plus performantes en termes de densité volumique d'énergie que les autres types d'aimants.
- Les Samarium-Cobalt autorisent une température de fonctionnement élevée (350°C), mais ils sont très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition.
- Le Néodyme-Fer-Bore (NdFeB) ont des performances supérieures aux Samarium-Cobalt et ils sont moins coûteux mais leur tenue en température est moins bonne (160°C) [11].

II-3-2. Propriétés magnétiques générales des aimants permanents

Aimant néodyme : possède la force magnétique la plus importante de tous les matériaux. Même un petit aimant possède une force importante. Son inconvénient est sa faible capacité antirouille.

Aimant cobalt : le nom officiel est aimant samarium-cobalt et cet aimant possède la seconde plus importante force magnétique après l'aimant néodyme. Ses avantages sont sa propriété antirouille et sa résistance aux températures élevées. En raison de sa résistance mécanique inférieure, il est fragile et doit être utilisé avec précaution.

Aimant en ferrite : ce matériau possède une force magnétique faible, mais offre une démagnétisation faible en raison de sa force coercitive relativement élevée. En raison de sa résistance mécanique inférieure, il est fragile et doit être utilisé avec précaution.

Aimant en alnico : il offre une résistance supérieure à la température et une résistance mécanique fiable. Il présente l'inconvénient d'une forte démagnétisation [12].

Les aimants permanents possèdent un large cycle d'hystérésis. C'est le deuxième quadrant de ce cycle où se situe la courbe dite de désaimantation qui caractérise un aimant permanent. La courbe de désaimantation qui est obtenue. Suite au phénomène d'hystérésis est caractérisés par :

- Le point d'intersection avec l'axe des ordonnées. Qui définit l'induction rémanente B_r laquelle indique la valeur de l'aimantation qui subsiste après disparition du champ d'excitation.
- Le point d'intersection avec l'axe des abscisses, définit le champ coercitif de l'aimant H_c .
- Les valeurs B_M , H_M du point de fonctionnement M .
- Le produit d'énergie volumique $(BH)_{MAX}$ qui correspond au volume minimal de l'aimant [11].

II-3-3. Aimantation, désaimantation et vieillissement des aimants

I-3-3-1. Aimantation

Le matériau est placé dans un champ magnétique d'excitation suffisant pour l'aimanter à saturation. Il acquiert alors son énergie potentielle magnétique qu'il conserve en fonctionnement.

L'amplitude du champ magnétique qu'il faut appliquer pour obtenir la saturation dépend des processus d'aimantation. Sa durée d'application n'a aucune importance, mais il ne faut pas oublier que toute variation du flux d'induction en milieu conducteur génère des courants induits qui s'opposent à la pénétration du champ au cœur de la matière [8].

I-3-3-2. Désaimantation

Une fois aimanté, l'aimant ne doit plus être désaimanté même partiellement. La désaimantation représente une opération contre-nature puisque le matériau a été conçu pour s'y opposer.

Une désaimantation thermique partielle ou totale reste déconseillée car elle risque toujours d'entraîner des modifications incontrôlées, de nature physico-chimique [8].

I-3-3-3. Vieillessement

Les fabricants d'aimants commercialisent en principe des matériaux dont la stabilité physico-chimique est parfaitement établie, mais il peut y avoir néanmoins des signes de vieillissement magnétique. Par exemple dans le cas d'un pot de haut-parleur, on pourra trouver que le champ magnétique créé par l'aimant dans l'entrefer décroît légèrement et régulièrement au cours du temps. Pour un circuit bien conçu, le vieillissement reste extrêmement faible, à la limite du mesurable, par exemple de l'ordre de 10^{-4} en valeur relative sur une durée de plusieurs années [8].

II-4. Matériaux magnétiques

Les matériaux magnétiques sont au cœur du génie électrique et présentent pour les moteurs un élément fondamental de leurs évolutions. On les trouve dans un vaste domaine d'application dans l'industrie.

Il existe deux principales catégories de matériaux magnétiques classés ainsi selon leurs cycles d'hystérésis, on distingue donc des matériaux magnétiques durs et des matériaux magnétiques doux.

A la fin du 19^e siècle, les techniciens ne disposaient que d'un seul matériau magnétique, l'acier, pour construire les premières machines électriques. De nombreux matériaux, toujours plus performants, ont été mis au point au cours du 20^e siècle, des matériaux de plus en plus doux pour un fonctionnement dynamique, et des aimants de plus en plus performants [8].

II-4-1. Notion de moment magnétique

I-4-1-1. Au niveau atomique

Un électron tournant autour du noyau crée un moment magnétique orbital: \vec{m}_o (Figure II.5).

Un électron tournant sur lui-même (spin) crée un moment magnétique de spin : \vec{m}_s (Figure II.5).

Le moment magnétique (atomique) \vec{m} tient compte des deux contributions:

$$\vec{m} = \sum \vec{m}_o + \sum \vec{m}_s \quad (\text{II.1})$$

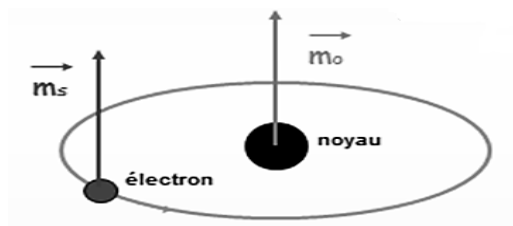


Figure II.5 : moment magnétique

Il est à noter que ce n'est pas tous les atomes qui possèdent un moment magnétique, en effet il est nécessaire d'avoir des couches non saturées : les gaz rares sont donc exclus. Mais si les atomes possèdent des couches incomplètes alors ils possèdent un moment magnétique atomique [13].

I-4-1-2. Dans un aimant (exemple ferromagnétique)

Lorsque l'on regarde, au niveau microscopique la structure de la matière d'un matériau ferromagnétique, on remarque l'existence de petits domaines d'aimantation homogène c'est à dire des lieux où les moments atomiques « jouent » collectifs, ils sont orientés dans une même direction. On appelle ces domaines les domaines de Weiss⁽²⁾ (Figure II.6) [13].

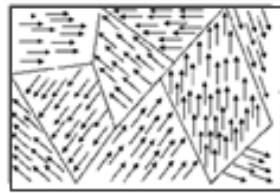


Figure II.6 : état des moments magnétique.

Si on prend un aimant permanent : un corps qui, une fois aimanté conserve un état très ordonné des moments magnétiques atomiques, et un clou : un corps, qui peut s'aimanter, dont les moments atomiques sont orientés par groupe dans des directions différentes et qu'on rapproche l'aimant du clou alors, l'aimant excite le clou, de ce fait un champ magnétique produit par l'aimant devient une excitation magnétique[13].

Les moments magnétiques des atomes du clou s'ordonnent parallèlement à l'excitation magnétique. Le clou s'aimante, il produit alors lui aussi son propre champ magnétique. Des pôles nord et sud sont apparus sur le clou, il y a attraction (Figure II.7) [13].

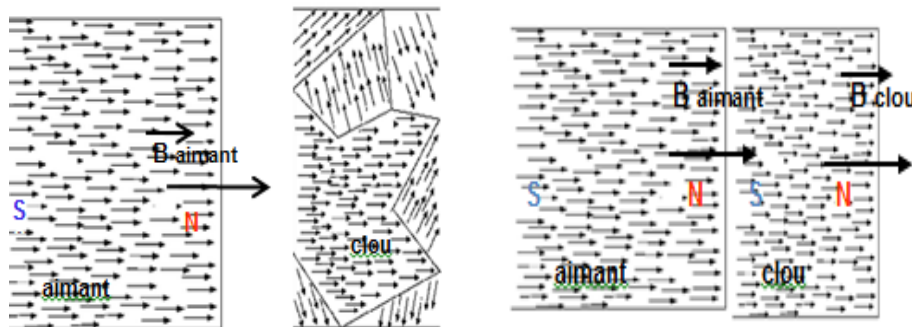


Figure II.7 : alignement des moments magnétiques du clou.

⁽²⁾Pierre Weiss (1865-1940) , physicien, membre de l'académie des sciences.

II-4-2. Propriétés des matériaux magnétiques

I-4-2-1. L'aimantation

L'aimantation est la densité de volume du moment magnétique ampérien, exprimée en [A/m] et donnée par la formule suivante :

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}_i}{V} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

m_i : moment magnétique ampérien

tout en sachant que les sources d'aimantation, Coulombiennes et Ampériennes sont définies dans la figure II-8 ci bas [4][13].

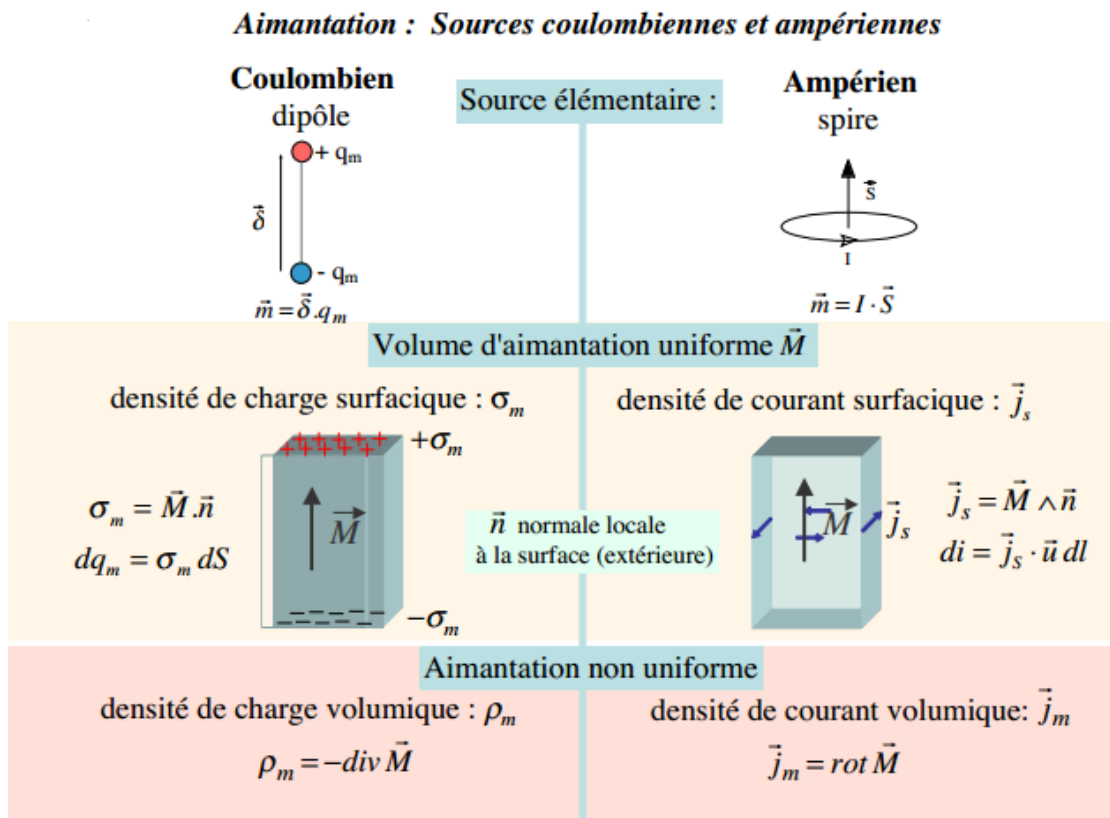


Figure II.8 : source Ampérienne et Coulombienne d'aimantation

I-4-2-2. La polarisation

La polarisation est la densité de volume du moment magnétique coulombien, exprimée en [Tesla] et donnée par la formule suivante [4]:

$$J = \frac{\sum m_i^c}{V} \rightarrow \quad (II.3)$$

Avec :

m_i^c : moment magnétique coulombien

I-4-2-3. La susceptibilité magnétique

Elle est définie comme étant le rapport entre la polarisation et le champ magnétique, effectivement lorsqu'une substance magnétique est plongée dans un champ magnétique H, elle acquiert une certaine aimantation M tel que :

$$M = \chi \cdot H \quad (II.4)$$

Avec χ est le coefficient désignant la susceptibilité magnétique relative [4].

I-4-2-4. La perméabilité magnétique

La perméabilité absolue μ est la faculté de canalisation du champ magnétique et s'exprime par :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (II.5)$$

Avec : μ_0 = perméabilité magnétique du vide, elle vaut $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$.

μ_r = perméabilité relative.

Voici ci-dessus un tableau (Figure II.9) de la perméabilité des principaux matériaux magnétiques [6].

Matériau	Composition	Perméabilité relative μ_r	Utilisation
Fer Armco	Fer pur	10'000	relais, électroaimant
Acier Hypersyl	Si à 3 %	40'000 à 50'000	inductances transformateurs
Mumétal Permalloy C	Ni à 80 %	70'000 à 130'000	blindages magnétiques relais rapides
Acier au cobalt Permendur V	Co à 35 - 50 %	3'500	tôles pour petites machines tournantes

Figure II.9 tableau de la perméabilité des principaux matériaux magnétiques.

II-5. Classement des matériaux magnétiques

Tout comme le courant électrique nous ne pouvons que constater les effets du magnétisme, nous ne pouvons pas voir les lignes de forces existantes autour d'un aimant. Les propriétés magnétiques de certains matériaux sont dues à la rotation des électrons sur eux-mêmes dans l'atome, ce phénomène est appelé spin.

Ceci dit les matériaux magnétiques se divisent en trois principales catégories : les matériaux paramagnétiques, diamagnétiques, ferromagnétiques [6].

II-5-1. Matériaux paramagnétiques

Ce type de matériaux s'aimantent faiblement dans le sens du champ magnétisant, leurs aimantations cessent dès que celui-ci est supprimé, le paramagnétisme est donc un comportement concernant les substances dans certains atomes, caractérisés par des couches électroniques incomplètes qui sont porteurs de moment magnétique permanent et indépendant les uns les autres, parmi les exemples de ce type de matériaux on peut citer l'Aluminium, Platine et Manganèse [6].

II-5-2. Matériaux diamagnétiques

Ces matériaux s'aimantent dans le sens opposé au champ magnétisant, leurs aimantations cessent dès que le champ magnétisant est supprimé, l'origine du diamagnétisme est un phénomène quantique pouvant être expliqué par la modification du mouvement orbital des électrons autour du noyau atomique. Parmi les exemples de ce type de matériaux il y'a le Cuivre, Zinc, Or, et l'Argent [6].

II-5-3. Matériaux ferromagnétiques

Ce genre de matériaux peut être fortement magnétisé ; leurs aimantations persistent plus ou moins lorsque le champ magnétisant est supprimé. Le ferromagnétisme est un comportement associé aux matériaux magnétiquement ordonnés, cette caractéristique est décernée aux matériaux dont les distances entre les atomes sont suffisamment petite pour qu'ils interagissent ; ils présentent une polarisation même en champ nul, cette polarisation spontanée est due au fait que les moments atomiques ont tendance à s'orienter spontanément parallèlement les uns les autres, cette dernière dépend de la température [6].

L'existence d'une aimantation spontanée, même en l'absence de champ magnétique appliqué, conduit Pierre Weiss⁽²⁾ à supposer qu'il existe des interactions entre porteurs élémentaires de moments et qu'elles équivalaient à un champ magnétique fictif appelé champ moléculaire, proportionnel à l'aimantation $\vec{H}_m = \alpha \vec{M}$ qui vient s'ajouter au champ appliqué.

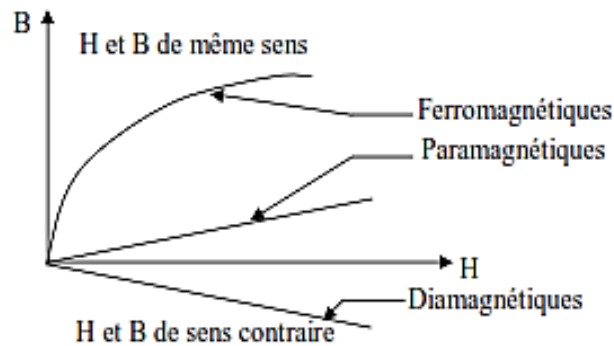


Figure II.10 : illustration des comportements magnétiques.

II-6. Cycle d'hystérésis et champ de première aimantation

L'hystérésis est un phénomène observé dans les matériaux ferromagnétiques (ex : fer, cobalt, nickel...) soumis à des champs magnétiques variables. Ce comportement se traduit par une loi $B = \mu H$, matérialisé par une courbe, appelée courbe d'aimantation ou cycle d'hystérésis [1].

La simplicité de l'équation $B = \mu H$ n'est qu'apparente vu que cette relation n'est pas linéaire et puisque la perméabilité μ dépend de H, ce qui nous donne une partie linéaire, un coude de saturation et zone non linéaire, cette relation n'est pas réversible puisqu'elle fait intervenir des paramètres dépendant de l'histoire du matériau.

Des études ont été menées sur l'évolution du cycle d'hystérésis représentant les matériaux magnétiques en régime statique et dynamique, la majorité des développements et applications ont concerné le modèle de Preisach sachant que celui-ci présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de la manière intrinsèque du régime dynamique (transitoire et harmonique). Le modèle de Jiles-Atherton se trouve ainsi plus adapté à une intégration rapide et efficace de l'effet dynamique [1].

On fait croître progressivement le champ d'excitation dans lequel est mis le matériau étant initialement démagnétisé (pas d'aimantation) et on obtient une courbe représentant l'induction en fonction du champ (Figure II.11). On distingue trois principales zones : la première est linéaire, puis coude de saturation et enfin la zone de

saturation. C'est la courbe de première aimantation : courbe $B=f(H)$ lorsque le corps ferromagnétique ne possède aucune aimantation.

A partir d'un point (B, H) de la courbe de première aimantation, on diminue le champ H , l'induction B ne repasse pas sur la même courbe, par conséquent une valeur nulle de B ne correspond pas à une valeur nulle de H , il subsiste de ce fait une induction rémanente B_r (Figure II.12). Le champ d'excitation doit s'inverser pour annuler B , c'est le champ coercitif H_c (le champ à appliquer afin d'annuler l'induction). On obtient ainsi le cycle d'hystérésis : courbe de $B=f(H)$ lorsque le corps ferromagnétique possède déjà une aimantation.

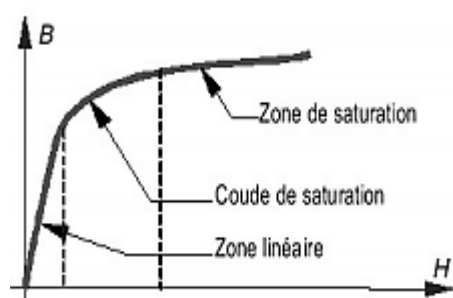


Figure II.11 : courbe de $B(H)$

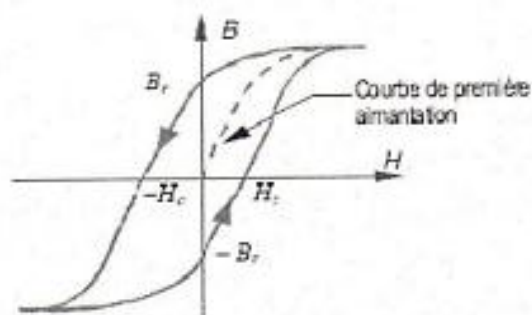
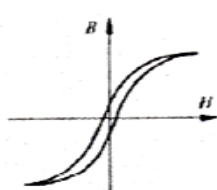
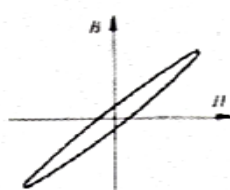


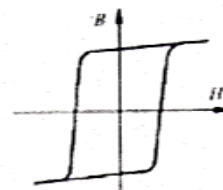
Figure II.12 : cycle d'hystérésis



Permalloy (Fe-Ni)

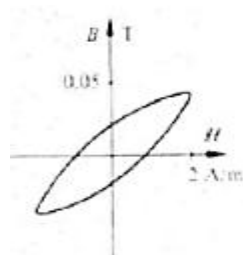


Isoperm (Fe-Ni)

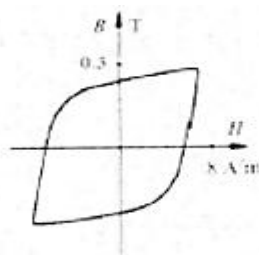


Alnico (Fe - Ni - Cu - Co)

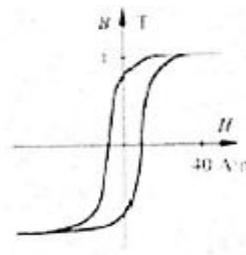
Figure II.13 : cycle d'hystérésis de quelques matériaux magnétiques



Amplitude très faible



Amplitude moyenne



la saturation est atteinte.

Figure II.14 : cycle d'hystérésis du même matériau pour différentes amplitude de l'induction.

On définit donc plusieurs zones dans la courbe $B=f(H)$:

- **Zone linéaire** : dans cette zone, $B=\mu H$ constante. C'est cette zone qui est généralement exploitée pour les transformateurs et les machines tournantes.
- **Saturation du milieu ferromagnétique** : lorsque H devient trop grand, B ne varie presque plus. Le matériau magnétique est dit saturé. On a toujours $B = \mu \cdot H$, mais μ n'est plus constant (« il s'écroule »). B tend vers le champ de saturation B_s .
- **Induction rémanente B_r** : elle subsiste lorsque $H = 0$, une valeur nulle de B ne correspond pas à une valeur nulle de H .
- **Champ coercitif H_c** : champ H nécessaire pour annuler l'induction rémanente B_r .
- **Hystérésis** : c'est le dédoublement de la caractéristique $B(H)$ du matériau magnétique. Donc B dépend non seulement de H , mais aussi de l'aimantation M .

II-7. Classification des matériaux magnétiques :

De par le cycle d'hystérésis on peut regrouper les matériaux magnétiques en deux principales catégories :

II-7-1. Matériaux ferromagnétique doux :

Caractérisés par une induction rémanente B_r assez faible, d'une surface de cycle d'hystérésis importante et d'un champ H_c (champ coercitif, à appliquer pour annuler l'induction) élevé. Ces matériaux sont généralement destinés à la fabrication d'aimants permanents [6].

Caractérisés par une induction rémanente B_r plutôt élevée, d'une surface de cycle d'hystérésis faible et d'un champ H_c assez faible ; par conséquent une diminution des pertes par hystérésis, les matériaux ayant ces caractéristiques sont, à titre d'exemple, le fer ; cobalt, nickel... etc [6].

Selon les critères de l'ingénieur électrotechnicien, un bon matériau métallique doux, soumis à l'action des champs magnétiques relativement faibles, doit présenter une aimantation élevée, proche de l'aimantation à saturation. Cette facilité d'aimantation signifie une perméabilité magnétique très élevée. Le cycle d'hystérésis associé à ce type de matériaux est très étroit, donc un champ coercitif très réduit.

II-7-2. Matériaux ferromagnétiques durs

Caractérisés par une induction rémanente B_r assez faible, d'une surface de cycle d'hystérésis importante et d'un champ H_c (champ coercitif, à appliquer pour annuler l'induction) élevé. Ces matériaux sont généralement destinés à la fabrication d'aimants permanents [6].

Par opposition aux matériaux magnétiques doux qu'on aimante et désaimante facilement, les matériaux durs ne peuvent être désaimantés qu'avec difficulté, d'où l'intérêt pour la réalisation des aimants permanents.

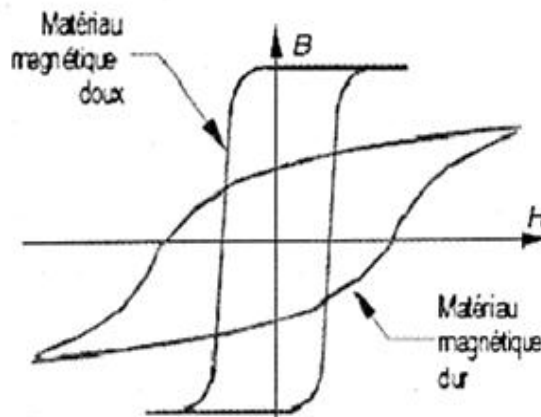


Figure II. : Classification par cycle d'hystérésis.

II-8. Les tôles magnétiques

Les tôles magnétiques sont regroupées en deux grandes catégories, soit, tôles magnétiques à grains orientés et tôles magnétiques à grains non orientés, elles se différencient par leur procédé de fabrication et teneur en Silicium.

II-8-1. Tôles à grains orientés

Basées sur une texture en grains fortement orientés obtenue par recristallisation secondaire, et possédant une teneur en Silicium toujours voisine des 3 % ces tôles sont réparties en deux groupes selon leur coût et mode de fabrication et épaisseurs en tôles conventionnelles et tôles à haute perméabilité

Elles sont principalement utilisées dans les circuits magnétiques des transformateurs [4][6].

II-8-2. Tôles à grains non orientés

Fabriquées par laminage à froid, leurs épaisseurs varient entre 1 mm pour les tôles bas de gamme à 0.35mm pour les tôles de bonne qualité, elles possèdent une teneur en Silicium de 0.1 à 3.2 % et sont isolé entre elles par des couches d'isolant très mince organique ou minérale. Elles sont principalement utilisées dans les circuits magnétiques des machines rotatives [4][6]

Ces tôles sont utilisées pour la constitution de tous les circuits magnétiques feuilletés, fonctionnant en régime d'induction variable, à fréquence industrielle. [8]

II-9. Grandeurs électromagnétiques, équations de maxwell

L'électromagnétisme constitue une branche assez importante dans la physique sont intérêt vas d'établir les lois régissant les phénomènes magnétique et électrique et rendre compte de toute les applications de l'électromagnétisme.

Il considère donc les phénomènes électriques et magnétiques à l'échelle macroscopique ; les forces électriques et magnétiques produites sur des particules chargées sont liées à l'existence des grandeurs vectorielles appelées champ électrique E et champ d'induction magnétique B.

Plusieurs travaux de recherche en était menés sur ces phénomènes et relations vectorielle jusqu'à l'arrivée de J.C Maxwell qui a unifié les travaux d'Amper et Faraday, il a mis en œuvre les quatre équations portent son nom, qui depuis, gouvernent tous les phénomènes électromagnétique.

Depuis et jusqu'à présent, l'électromagnétisme s'est installé dans de nombreuses applications.

II-9-1. Grandeurs fondamentales et définition

I-9-1-1. Champ électrique \vec{E}

Le champ électrique est une grandeur physique qui exerce une force électrique sur une particule chargée, donc s'il existe une force \vec{F} d'origine électrostatique qui s'exerce sur une charge ponctuelle q placé en un point donné dans l'espace il y'a existence d'un champ électrique \vec{E} .

La relation entre (\vec{E} , \vec{F} , q) est la suivante :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (\text{II.6})$$

Avec : \vec{E} : champ électrique [V/m].
 F : force électrique [N].
 q : charge en coulomb [C].

I-9-1-2. Champ magnétique H :

L'intensité du champ magnétique H présente les mêmes caractéristiques que le champ électrique E, et est exprimé en Ampère par mètre ([A/m]).

Par analogie au champ électrique \vec{E} , lors du déplacement des charge électrostatiques Q il y'a création d'une force électromagnétique F capable d'attirer les aiguilles d'une boussole [4].

I-9-1-3. Champ magnétique d'induction \vec{B}

Le champ d'induction magnétique \vec{B} traduit l'effet du déplacement des charges électriques. Exprimé en Tesla ([T]) [1].

Ce champ d'induction magnétique crée exerce sur une particule en mouvement de charge q une force \vec{F} perpendiculaire à sa vitesse \vec{V} , sans changer sa valeur, et dont l'expression est :

$$\vec{F} = q\vec{V} \wedge \vec{B} \quad (\text{II.7})$$

I-9-1-4. Flux magnétique

C'est le nombre de lignes de force d'un champ d'induction \vec{B} , traversant surface fermée (S) d'une matière et est exprimé en weber ([Wb]). Le flux d'induction magnétique Φ représente le produit de l'induction magnétique B pour une aire S bien déterminée qui peut être oblique ou perpendiculaire au champ d'induction [4].

Il est définie par :

$$\Phi = B.S.\cos\theta \quad (\text{II.8})$$

Avec : Φ : flux magnétique [wb].
B : induction magnétique [T].
S : surface [m²].
 θ : angle d'inclinaison [°].

I-9-1-5. Densité de charge électrique

Dans l'étude des phénomènes électriques on ne trouve non seulement des charges ponctuelles, mais également des distributions continues de charges qui sont caractérisées par trois types de densités différentes [4].

On distingue alors :

σ_v : Densité volumique de charge [C/m³].

σ_s : Densité surfacique de charge [C/m²].

σ_l : Densité linéaire de charge [C/m].

I-9-1-6. Densité de courant

L'application d'un champ électrique dans un milieu qui contient des charges libres produit une force sur chacune d'elles

Par l'action d'un champ, les charges se déplacent dans la même direction que ce dernier, ce qui produit un courant électrique circulant dans le volume du milieu considéré [4].

La densité du courant est donnée par la formule suivante :

$$J = \sum_i \sigma_i V_i \quad [A/m^2] \quad (II.9)$$

avec : σ_i : Densité volumique [C/m³].

V_i : vitesse de déplacement des charges électrique [m/s].

I-9-1-7. Circuit magnétique

Les circuits magnétiques sont basés sur l'utilisation de matériaux ferromagnétiques avec comme but l'obtention d'un champ d'induction B dans une zone précise (entrefer).

Pour ce faire, on crée un champ d'excitation H à l'aide de bobinage puis on le canalise vers la zone d'utilisation (l'entrefer).

Le circuit magnétique est généralement constitué d'un bobinage, qui génère l'excitation et donc le champ ; d'une culasse qui dirige le champ H vers la zone utile (La culasse impose le parcours du champ magnétique de par sa grande perméabilité par rapport à l'air, le matériau qui compose la culasse se comporte comme un tube de champ.) et enfin d'un entrefer où l'on souhaite utiliser le champ (l'entrefer est la zone d'interaction avec l'extérieur).

II-9-2. Equations de Maxwell

C'est en 1873 que le physicien Ecossais **JAMES CLERK MAXWELL** traduit ces deux phénomènes (électrique-magnétique) par des équations reliant l'électricité au magnétisme dites équations de Maxwell. Elles deviennent par la suite les équations fondamentales de l'électromagnétisme applicables à tout problème électromagnétique. Elles sont locales, reliant d'une part le champ électrique \vec{E} et l'induction magnétique \vec{B} , d'autre part de champ magnétique \vec{H} et l'induction électrique \vec{D} à leurs sources, densité de charge ρ et densité de courant de conduction \mathbf{J} .

II-9-4-1. Première équation de Maxwell

C'est la généralisation sous la forme différentielle du théorème de Gauss, qui décrit la relation qui existe entre le champ électrique à travers une surface fermée S et la charge totale Q contenue dans un volume V [4]

D'après cette équation :

$$\oiint E \cdot ds = \sum_{i=1}^n \frac{Qi}{\epsilon_0} \quad (\text{II.10})$$

$$\oiint D \cdot ds = \sum_{i=1}^n Qi \quad (\text{II.11})$$

Et d'autre part on a :

$$\sum_{i=1}^n Qi = \iiint_V \rho \cdot dv \quad (\text{II.12})$$

Donc :

$$\oiint D \cdot ds = \iiint_V \rho \cdot dv \quad (\text{II.13})$$

En appliquant le théorème d'Ostrogradski à l'intégrale de gauche on aura :

$$\iiint \vec{\nabla} \cdot \vec{D} \cdot dv = \iiint \rho \cdot dv \quad (\text{II.14})$$

D'où on aboutira à l'expression de la première équation de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.15})$$

Avec :

\vec{D} : Vecteur déplacement électrique [C/m^2].

$\sum_{i=1}^n Qi$: La charge totale contenue dans le volume [C].

dv : Elément du volume [m^3].

ρ : La densité de charge volumique [C/m^3].

ds : Elément de surface [m^2].

II-9-4-2. Deuxième équation de Maxwell

C'est la forme différentielle de la loi d'induction, elle stipule que la variation du champ magnétique produit un champ électrique [4].

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (\text{II.16})$$

Sachant que :

$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (\text{II.17})$$

alors :

$$e = - \frac{d}{dt} (\iint \vec{B} \cdot d\vec{s}) = \iint - \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{s} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (\text{II.18})$$

D'après le théorème de Stokes ; on aura :

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint (\nabla \wedge \vec{E}) \cdot d\vec{s} \quad (\text{II.19})$$

D'où l'expression de la deuxième équation de Maxwell est sous forme :

$$\nabla \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.20})$$

II-9-4-3. Troisième équation de Maxwell

Cette loi met en évidence le principe de la conservation du flux magnétique.

D'après la 2^{ème} équation de Maxwell [4] :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.21})$$

En appliquant la divergence aux deux côtés de cette équation :

On aura alors la relation suivante :

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) = \vec{\nabla} \cdot \left(- \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \quad (\text{II.22})$$

On sait que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) = 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \left(- \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.23})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) = 0 \quad (\text{II.24})$$

D'où on aboutira à l'expression de la troisième équation de maxwell :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.25})$$

II-9-4-4. Quatrième équation de maxwell

C'est la généralisation de théorème d'ampère, qui énonce que tout courant i circulant dans un conducteur engendra un champ magnétique H autour de ce conducteur, tel que l'intégrale de ligne soit égale à i , pourvu que la parcours d'intégration englobe le conducteur et que ce parcours soit fermé [4].

On a :

$$\oint H \cdot dl = \sum i \quad (\text{II.26})$$

Avec:

i: l'intensité des courants de conduction enlacés par le contour.

La relation entre l'intensité de courant et la densité de courant est donnée par :

$$\sum I = \iint J \cdot ds \quad (\text{II.28})$$

En appliquant le théorème de Stokes à l'intégrale de gauche de l'équation (II.27)

On obtient la formule suivante :

$$\oint H \cdot d\vec{l} = \iint (\nabla \wedge H) \cdot ds \quad (\text{II.29})$$

$$\Rightarrow \iint J \cdot ds = \iint (\nabla \wedge H) \cdot ds \quad (\text{II.30})$$

D'où :

$$\nabla \wedge H = J \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$J = J_c + J_d \quad (\text{II.32})$$

$$J_d = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{II.33})$$

Donc on aboutira à l'expression de la quatrième équation de Maxwell :

$$\nabla \wedge H = J_c + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{II.34})$$

Avec :

J_c : Densité du courant de conduction [A/m²].

J_d : Densité du courant de déplacement [A/m²].

II-9-4-5. Tableau récapitulatif des équations de Maxwell

Ce tableau est une récapitulation des différentes équations de l'électromagnétisme (équations de Maxwell) :

Equations	Forme locale	Formes intégrale
Premier équation (Maxwell-Gauss)	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$	$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iiint \rho \cdot d\vec{v}$
Deuxième équation (Maxwell-Faraday)	$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint \vec{B} \cdot d\vec{s}$
Troisième équation (conservation du flux magnétique)	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$
Quatrième équation (Maxwell-Ampère)	$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint (\vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{s}$

II-9-3. Loi d'Ohm

Elle interprète la relation entre le champ électrique H et a densité de courant J par l'intermédiaire de la conductivité électrique δ .

La loi d'Ohm généralisée s'écrit sous la forme :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}t = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \tag{II.35}$$

Avec

σ : Conductivité électrique.

J_s : Densité de courant source.

J_{ind} : Densité de courant induit.

Et E : champ électrique qui règne sur le milieu.

II-9-4. Relation des milieux

Les équation de Maxwell traduisant généralement les interactions, qui existe entre le champ magnétique \vec{H} et l'induction magnétique \vec{B} en fonction de la perméabilité magnétique μ , ainsi que celui existant entre l'induction électrique \vec{D} (vecteur déplacement) et le champ électrique \vec{E} , en fonction de la permittivité électrique ϵ [3][4].

II-9-4-1. Cas d'un milieu magnétique linéaire

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{II.36}$$

Avec :

μ : Perméabilité magnétique absolue avec $\mu = \mu_0 \mu_r$

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide = $4 \pi 10^{-7}$

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu considère

II-9-4-2. Cas d'un milieu diélectrique linéaire

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \tag{II.37}$$

Avec : $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

ϵ : Permittivité électrique absolue [F/m].

ϵ_0 : Permittivité électrique du vide $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$ [F/m].

ϵ_r : Permittivité relative du milieu considéré.

II-9-4-3. Cas d'un aimant permanent

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \tag{II.38}$$

$$\vec{H} = \vec{H}_{ex} + \vec{M} \tag{II.39}$$

$$\vec{H}_{ex} = \vec{H} - \vec{M} \tag{II.40}$$

Avec :

\vec{M} : Le vecteur aimantation du milieu magnétique considéré.).

→
Hex : champs excitation.

II-10. Phénomènes électromagnétiques

II-10-1. Formulation magnétostatique bidimensionnelle

Dans ce modèle, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps [3].

Donc ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$)

II-10-2. Formulation en termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A}

On considère Les équations de Maxwell (II.27) et (II.35) :

Et la relation de milieu :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.41})$$

D'après l'équation (II.26), il existe un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \Rightarrow \exists \vec{A} / \vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{II.42})$$

Avec :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \Rightarrow \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (\text{II.43})$$

Où :

\vec{A} : Potentiel vecteur magnétique [Tm]

On remplace \vec{H} dans l'équation (II.25) on aura :

$$\vec{\nabla} \wedge \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{J} \quad (\text{II.44})$$

La combinaison entre les équations suivantes (II.42) et (II.43) avec (II.34) nous donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \frac{\vec{\nabla} \wedge \vec{A}}{\mu} = \vec{J} \quad (\text{II.45})$$

Avec :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (II.46)$$

Telles que :

\vec{J}_s : Densité de courant de source.

\vec{J}_{ind} : Densité de courants induits : $\vec{J}_{ind} = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0$

D'où :

$$\vec{\nabla} \wedge \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{J}_s \quad (II.47)$$

II-10-2-1. En coordonnées cartésiennes

Dans le cas des coordonnées cartésiennes, le potentiel vecteur magnétique \vec{A} prend une seule composante.

$$\vec{A} = (0, 0, A_z)$$

$$\vec{J} = (0, 0, J_{sz})$$

En considérant le cas linéaire :

$$\mu = \text{Constante}$$

Donc l'équation (II.46) s'écrira :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = \mu \vec{J}_{sz} \quad (II.48)$$

Sachant que :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = -\Delta \vec{A} + \overrightarrow{\nabla(\vec{\nabla} \cdot \vec{A})} \quad (II.49)$$

Selon la condition de Jauge coulomb :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (II.50)$$

Donc :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = -\Delta A \quad (\text{II.51})$$

En introduisant (II.50) dans (II.51) on aura :

$$-\Delta A = \mu J_{sz} \quad (\text{II.52})$$

L'étude se fait dans le plan [x, y] (2D), ce qui permet d'écrire:

$$\frac{\partial}{\partial z} = 0$$

D'où :

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{sz} \quad (\text{II.53})$$

C'est l'équation magnétostatique 2D en termes de potentiel vecteur magnétique A [3].

II-10-2-2. En coordonnées cylindriques

Considérons un système à symétrie de révolution, donc on peut réduire le plan d'étude sur un plan [r, z], et ça se traduira par la condition :

$$\frac{\partial A}{\partial \varphi} = 0$$

Avec :

$$\vec{A} = (0, A_\varphi, 0)$$

Donc on aura :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{A} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{U}_r & r\vec{U}_\varphi & \vec{U}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & rA_\varphi & 0 \end{vmatrix} = \frac{1}{r} \left[-\frac{\partial r A_\varphi}{\partial z} \vec{U}_r + \frac{\partial r A_\varphi}{\partial r} \vec{U}_z \right]$$

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{U}_r & r\vec{U}_\varphi & \vec{U}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ -\frac{1}{r} \frac{\partial_r A_\varphi}{\partial z} & 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial_r A_\varphi}{\partial r} \end{vmatrix}$$

On déduit, que l'équation magnétostatique en termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A} s'écrit sur la forme suivante :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial z} \right) \quad (\text{II.54})$$

II-10-3. Formulation magnétodynamique bidimensionnelle

On parle de l'étude magnétodynamique quand les phénomènes magnétiques et électriques sont dépendants du temps.

Dans ce cas, on considère les trois équations de Maxwell suivantes :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.55})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.56})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.57})$$

II-11. conclusion

Le progrès sans cesse en évolution réalisé ces dernières décennies dans la fabrication des aimants a permis de sonner l'essor à plusieurs concepts novateur dans le domaine industriel qui demande un faible coût associé à une croissance de performances de machines.

Associé à l'électronique ou aux machines électriques, l'aimant est considéré comme le composant idéal pour faire toujours plus petit, plus efficace et plus performant.

Les machines linéaires à aimants permanent suscitent de plus en plus d'intérêt et pour ce faire on essaye toujours d'améliorer voir optimiser ce genre de machine pour donner solutions aux problèmes qu'elle rencontre.

Chapitre III

III-1. Introduction

Lorsque les équations aux dérivées partielles ne peuvent être résolues analytiquement, on fait appel aux méthodes numériques et aux outils de calcul numérique et ce par exemple dans le cas d'une géométrie assez complexe et où le matériau utilisé a des propriétés physiques non linéaire. La discrétisation du domaine étant assez difficile, alors le recours aux méthodes numériques fait gagner non seulement un pas de temps mais aussi permet de réaliser des calculs intenses grâce à l'utilisation des outils informatiques.

L'étude de tout phénomène physique consiste en premier lieu en sa modélisation. Le choix d'une méthode de résolution est lié directement au problème formulé [4].

Parmi les méthodes utilisées, on cite la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis, intégrales de frontières...

III-2. Méthode des différences finies

La méthode des différences finies a été rendu très populaire par l'avènement de l'ordinateur, qui consiste à discrétiser le problème posé et à résoudre au calculateur numérique (ceci s'est fait vers 1949 pour cette méthode). Cette méthode est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences où chaque dérivée de l'inconnu est approchée par une différence de valeur de l'inconnu aux nœuds du domaine de résolution [3].

II-2.1. Approximation des dérivées

On utilise généralement un réseau carré (Figure III.1) en se limitant aux termes d'ordre 1 dans le développement en série de Taylor (on accepte une erreur d'ordre h) on peut écrire les dérivées successives par rapport à x et y . ainsi les dérivées seront déterminées par rapport à un point P .

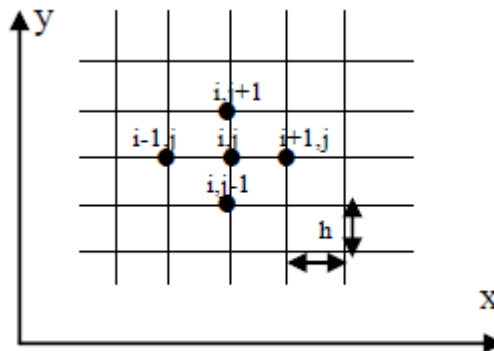


Figure III-1 : maillage type différences finis

On peut écrire alors le Laplacien discrétisé :

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_{i,j} &= \frac{A_{i+1,j} - A_{i-1,j}}{2h} \\ \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)_{i,j} &= \frac{A_{i,j+1} - A_{i,j-1}}{2h} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.1})$$

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right)_{i,j} &= \frac{A_{i+1,j} - 2A_{i,j} + A_{i-1,j}}{h^2} \\ \left(\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\right)_{i,j} &= \frac{A_{i,j+1} - 2A_{i,j} + A_{i,j-1}}{h^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.2})$$

Ainsi Le Laplacien discrétisé sera alors

$$(\Delta A)_{i,j} = \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right)_{i,j} + \left(\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\right)_{i,j} \quad (\text{III.3})$$

D'où :

$$(\Delta A)_{i,j} = \frac{A_{i+1,j} + A_{i-1,j} + A_{i,j+1} + A_{i,j-1} - 4A_{i,j}}{h^2} \quad (\text{III.4})$$

Cette formule est appelée la forme à cinq points.

La forme de cette formule aux différents nœuds du domaine, s'écrit avec le système matriciel suivant:

$$[M].[A]=[S] \quad (\text{III.5})$$

avec :

[M] :matrice inversible

[A] :matrice des inconnues

[S] :matrice source

Dans le cas des dispositifs à géométries complexes, cette méthode s'adapte difficilement, car elle présente des inconvénients relatifs à la définition des valeurs de l'inconnue sur la frontière du domaine d'étude [3].

III-3. Méthode d'intégrale de frontière

Cette méthode permet la présentation du domaine tout en limitant la discrétisation à la frontière, cette méthode est mise en œuvre par la méthode directe qui basée sur la loi de Biot et savart ou bien sur la méthode de l'identité de Green.

Elle est utilisée dans l'étude des structures de grande dimension, et elle s'adapte aux problèmes à frontière ouvertes (Ex :le vecteur $\vec{A}=0$ à l'infini), généralement utilisée en magnétique. En revanche elle à comme inconvénient la difficulté de prendre en considération la structure, et elle nécessite un espace mémoire considérable et un temps de calcul long, car le système algébrique issu de cette méthode est à matrice pleine [14].

III-4. Méthode des éléments finis

III-4-1. Introduction

La méthode des éléments finis est une méthode développée appliquée en premier lieu, en génie Mécanique et Civile, elle est appliquée en Electrotechnique vers 1970, par P.P.SILVESTER et M.V.CHARI.

Elle est basée sur une formulation intégrale du problème aux dérivées partielles et de leurs conditions aux limites.

Cette méthode est utilisée pour les traitements des problèmes à géométrie complexes, et les matériaux dont les propriétés physiques peuvent être non linéaires [14].

III-4-2. Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est un outil numérique de résolution des équations aux dérivées partielles de la physique mathématique [14].

III-4-3. Formulation éléments finis des équations électromagnétiques

Le principe de la méthode des éléments finis est basée sur la substitution à la forme différentielle que représentent les équations aux dérivées partielles et aux conditions aux limites associées d'une formulation intégrale du phénomène à étudier.

Cette formulation intégrale peut être de deux types :

- formulation projective (résidus pondérés)
- formulation vibrationnelle [14].

III-4-3-1. Formulation vibrationnelle

Cette formulation nécessite la connaissance au préalable de la fonction d'énergie du système à étudier.

Cette fonctionnelle est déterminée à partir du principe de l'action Hamiltonienne qui stipule l'existence d'une fonctionnelle de type intégrale.

Elle est définie par

$$F(A) = \int_{\Omega} L.d\Omega \quad (\text{III.6})$$

Avec

Ω : domaine d'étude.

L: fonction de LAGRANGE déduite de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie du potentiel du système.

Cas d'un problème électromagnétique

Dans ce cas la fonction L est donnée par l'expression :

$$L = \int_0^B vBdB - JA \quad (\text{III.7})$$

avec :

L:fonction de LAGRANGE .

A:Potentiel vecteur magnétique. [T.m]

J:densite de courant. [A/m²]

v:Reluctivite magnétique. [H/m]⁻¹

B:induction magnétique. [T]

L'expression de la fonctionnelle de l'énergie est donnée par la fonction suivante :

$$F(A) = \int_{\Omega} \left[\int_0^B v B dB - JA \right] d\Omega \quad (\text{III.8})$$

La résolution du problème variationnelle défini par la fonctionnelle d'énergie F(A) revient à minimiser cette fonctionnelle, la minimisation est effectuée en utilisant le principe de RAYLEIGH-RITZ.

Qui s'énonce comme suite :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_i} = 0 \quad (\text{III.9})$$

Et : i= 1, 2,3,.....n

Ou :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_2} = \dots\dots\dots \frac{\partial F(A)}{\partial A_n} = 0 \quad (\text{III.10})$$

Avec :

n: nombre de nœuds du domaine d'étude.

A_i: est l'inconnu aux nœuds i du domaine.

III-4-3-2. Formulation résidus pondérés

La méthode des résidus pondérés, appelée aussi méthode projective consiste à choisir des fonctions de projection Φ_i de façon à minimiser l'intégrale du résidu dans l'équation suivante :

$$\int_{\Omega} R \phi_i d\Omega = 0 \quad (\text{III.11})$$

$$R = L(A) - F \quad (\text{III.12})$$

Avec :

R: représente le résidu de l'approximation.

L(A): operateur différentiel.

F : fonction définie sur le domaine d'étude Ω .

A : l'inconnu du problème.

Φ_i : fonction de projection.

Les valeurs de A permettent d'annuler l'intégrale représentant la solution du système algébrique obtenu.

Le choix des fonctions de projection permet de définir plusieurs méthodes, parmi celle-ci, on cite les méthodes suivantes :

- Méthode de collection par points.
- Méthode des moindres carres.

- Méthode de GALERKINE

La méthode de collocation par points utilise les fonctions de DIRAC comme fonction de pondération (projection).

La méthode de moindre carre utilise la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites.

Dans ce qui suit, on s'intéressera particulièrement à la méthode de projection de GALERKINE, qui est la plus utilisée en Electrotechnique, puisqu' elle conduit à un système matriciel symétrique.

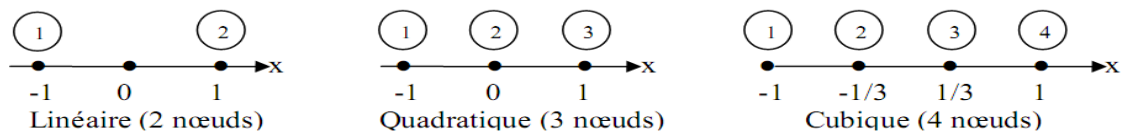
III-4-3-3. Discrétisation du domaine d'étude

Quand l'équation aux dérivées partielles est transformée en une forme intégrale, on passe à l'étape de discrétisation, qui consiste en la subdivision du domaine en un nombre fini de sous domaine appelé "élément", dont la géométrie est préalablement choisie. L'approximation de l'inconnu se fait en chaque élément par des fonctions d'interpolation, qui se déterminent en fonction des valeurs de l'inconnu aux nœuds de cet élément. C'est ce qu'on définit par l'interpolation nodale, ce qui est très important dans l'analyse par élément finis

III-4-3-3-1. Eléments de références

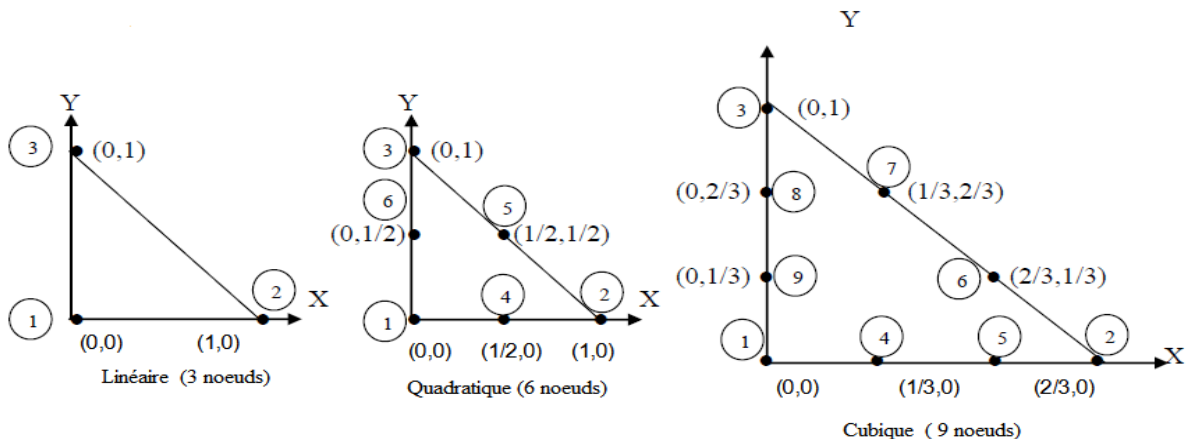
On utilise des éléments de références de manière à simplifier la définition analytique des éléments de forme complexe, et éléments les plus simple sont : le triangle, le rectangle, le tétraèdre et le parallélépipède, auxquels on associe un système de coordonnées normées.

❖ Élément à une dimension 1D

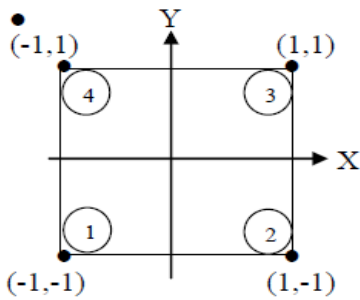


❖ Élément à deux dimensions 2D

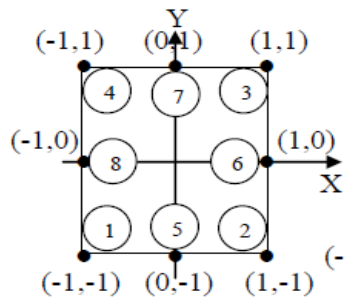
➤ Eléments triangulaires



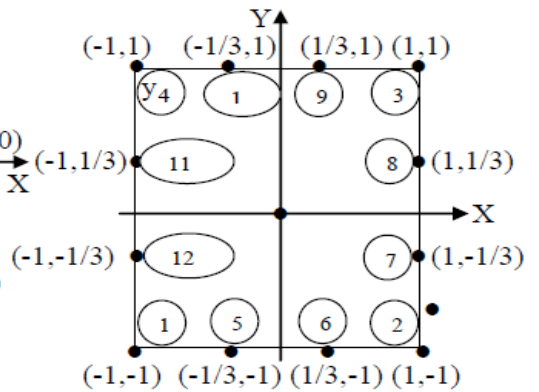
➤ **Éléments carres**



Linéaire (4 nœuds)

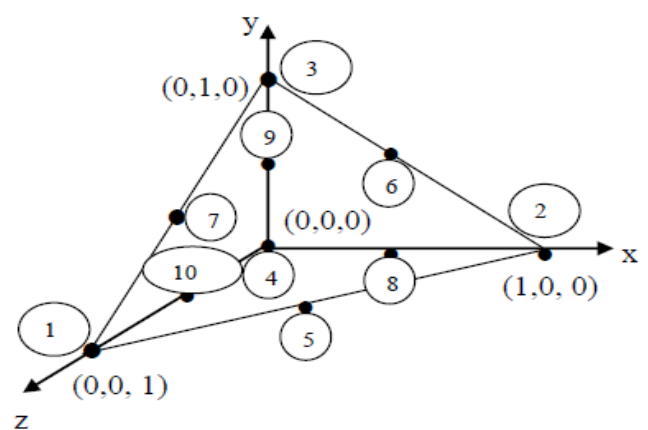
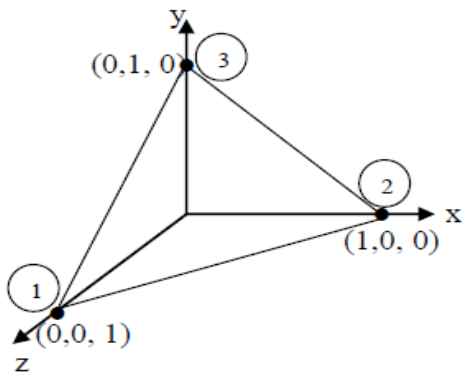


Quadratique (8 nœuds)



Cubique (12 nœuds)

❖ **Éléments à trois dimensions 3D**



III-4-3-3-2. fonctions d'interpolations

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de PASCAL, donné ci-dessus :

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ ————— } \text{ordre 0} \\
 U \ V \text{ ————— } \text{ordre 1} \\
 U^2 \ UV \ V^2 \text{ ————— } \text{ordre 2} \\
 U^3 \ U^2V \ UV^2 \ V^3 \text{ ————— } \text{ordre 3}
 \end{array}$$

Tringle de PASCAL

La construction de ces fonctions doit vérifier les conditions suivantes :

❖ **Principe de l'état complet**

- la fonction doit contenir un terme constant.
- le nombre de termes de la fonction doit être égal au nombre de nœuds de l'élément.

❖ Principe de compatibilité

La fonction doit être contenue (c'est-à-dire la première dérivée existe). On peut citer un exemple d'une fonction d'interpolation :

$$A(U, V) = a + bU + cV + dUV + eU^2 + fV^2 \quad (\text{III.13})$$

La base polynômiale sera alors :

$$P = [1 \ U \ V \ UV \ U^2 \ V^2] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

III-4-3-3-3. Fonction d'approximation sur un élément

La construction d'une fonction approchée $U^e(x)$, avec (e) comme indice relatif à

l'élément étudié, différente sur chaque élément par la méthode d'approximation nodale.

Donc la fonction d'approximation aura la forme suivant :

$$U(x) = [\Phi_1 \ \Phi_2 \ \dots \ \Phi_n] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ U_n \end{bmatrix} = \Phi \cdot U \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$U(x)$: c'est la fonction d'approximation qui s'identifie à la fonction exacte.

$\Phi_1 \ \Phi_2 \ \dots \ \Phi_n$: les fonctions de forme de l'élément.

U_1, U_2, \dots, U_n : les variables associées aux nœuds du domaine.

III-4-4. Formulation éléments finis

Dans un cas général où nous avons une machine linéaire à induit en mouvement et inducteur l'équation en terme potentiel vecteur magnétique A se traduit par la relation suivante :

Equation magnétodynamique :

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} - j\sigma\mu\omega A = -\mu \vec{J}_s \quad (III.16)$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} - j\sigma\mu\omega A = 0 \dots\dots\dots \text{Induit et culasse} \quad (III.17)$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} - j\sigma\mu\omega A = -\mu \vec{J}_s \dots\dots\dots \text{inducteur} \quad (III.18)$$

Sous Matlab l'expression est formulée sous la forme :

$$\text{div}(-C \overrightarrow{\text{grad}}U) + a.U = F \quad (III.19)$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} - j\sigma\mu\omega A = -\mu J_s \quad (III.20)$$

Si on divise l'équation (III.20) sur μ on aura :

$$(1/\mu) \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) - j\sigma\omega A = -\vec{J}_s \quad (III.21)$$

C'est-à-dire :

$$\frac{-1}{\mu} \Delta A_z = \vec{J}_s \quad \Rightarrow \quad \text{div} \left(-\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{grad}}A_z \right) = \vec{J}_s \quad (III.22)$$

Cependant dans notre application nous avons utilisé comme induit un aimant permanent se déplaçant sur une longueur x .

La relation $\overrightarrow{B} = \mu_0(\overrightarrow{H} + \overrightarrow{M})$ liant l'induction magnétique au champ magnétique \overrightarrow{H} fait intervenir l'aimantation \overrightarrow{M} à travers la relation du milieu suivante :

$$\overrightarrow{B} = \mu_0(\overrightarrow{H} + \overrightarrow{M}) \quad (III.23)$$

Avec :

$$\overrightarrow{H}_f = \overrightarrow{H}_e + \overrightarrow{M} \quad (III.24)$$

$$\overrightarrow{H}_e = \overrightarrow{H}_f - \overrightarrow{M} \quad (III.25)$$

L'équation obtenue en terme de potentiel vecteur magnétique A est donnée par :

$$\vec{\text{Rot}} \left(\frac{1}{\mu_0} \vec{\text{Rot}} \vec{A} \right) = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{J}_s + \vec{\text{Rot}} \vec{M} \quad (\text{III.26})$$

J_s = densité de courant.

σ = conductivité électrique.

μ_0 = perméabilité magnétique du vide.

Le développement de l'équation (III.21) en hypothèse 2D cartésienne en considérant que le potentiel vecteur magnétique qui est dirigé selon l'axe (o z) est donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - J_{sz} - \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (\text{III.27})$$

A_z = composante du potentiel vecteur magnétique suivant oz

J_{sz} = densité de courant source suivant la direction oz

M_x et M_y = Aimantation selon ox et oy.

II-1. Condition aux limites

La résolution des équations de maxwell tient compte des conditions aux limites du problème étudié, et généralement, on rencontre quatre type de conditions :

- **Condition de type DIRICHLET**

Elle est sous forme : $A = g_0$

Avec

A : la fonction inconnue du problème.

g_0 : une constante.

- **Condition de type NEWMAN**

Elle nous renseigne sur la valeur de la composant normale de l'inconnu sur la limite du domaine à étudié, elle apparait souvent sur les plans de symétrie.

Elle est de la forme :

$$\frac{\partial A}{\partial n} = g_0 \quad (\text{III.28})$$

- **condition mixte DIRICHLET et NEWMAN**

C'est une combinaison des deux types DIRECHLET et NEWMAN, elle s'exprime comme suit :

$$\partial A + b \frac{\partial A}{\partial n} = g$$

Avec :

A : la valeur de l'inconnue sur les frontières.

G : la fonction inconnue.

a, b : coefficients défini sur le domaine d'étude.

Chapitre IV

IV-1. Introduction

Le modèle de la machine linéaire utilisé dans ce travail est une machine linéaire à encoches trapézoïdales dont on a reconstitué la géométrie sur lequel a été appliqué plusieurs cas.

La première application concerne un programme test, comportant une machine linéaire à aimant permanent ayant 3 encoches.

Ce dernier est par la suite adapté à une géométrie de machine linéaire à 6 encoches à aimants permanents.

IV-2. Présentation du dispositif étudié

Le dispositif étudié dans cette application est une structure de machine linéaire tubulaire synchrone à aimants permanent constituée d'un enroulement triphasé à deux paires de pôles logés dans des encoches de forme trapézoïdales et dont l'induit constitué d'aimants permanents séparé par des isolants ferromagnétiques

Cette structure présente une symétrie axiale de telle sorte à avoir une symétrie axiale.

La géométrie du dispositif étudié est représentée en la (Figure IV.1).

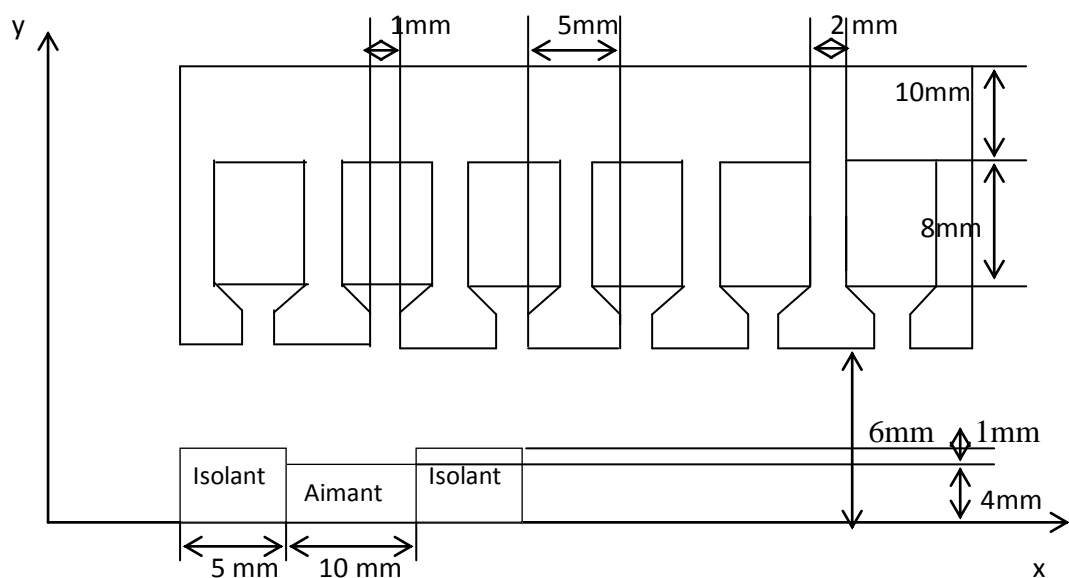


Figure IV.1 : la géométrie étudiée.

IV-2-1. Caractéristiques et données utilisée

IV-2-1-1. Données électromagnétiques

- $j_{exc} = 83.33 \cdot 10^6$ A.
- Conductivité électrique $\sigma = 5.7 \cdot 10^7$ [Ω/m].
- Perméabilité magnétique à vide $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$
- Perméabilité relative $\mu_r = 1500$.
- Perméabilité relative de l'isolant ferromagnétique $\mu_r = 300$
- Aimant type FeNdB à induction rémanente $B_r = 1.2$ [T] et aimantation $M = 5.4 \cdot 10^6$
- Fréquence $f = 50$ Hz

IV-2-1-2. Domaines d'étude

- Aire
- Culasse
- Encoches
- Isolant
- Aimant

IV-2-1-3. Données mécaniques

- Masse $m = 0.08$ Kg

IV-2-1-4. Caractéristiques de résolution

- Problème magnétodynamique avec prise en compte du mouvement de l'aimant selon l'axe (ox).
- Remaillage et prise en compte du mouvement.
- Domaine de résolution axisymétrique.
- Conditions aux limites de type DIRICHLET.

IV-3. Application 1 : Dispositif test à 3 encoches à un aimant

Le dispositif test est une géométrie d'une machine linéaire à 3 encoches (Figure IV.2) dont les paramètres sont ceux précités.

Dans ce premier test nous allons présenter la géométrie et son maillage ainsi que le potentiel vecteur magnétique A , le champ H et l'induction B avant et après déplacement. Le reste des applications présentera les résultats obtenus une fois la fin du déplacement. Avec une aimantation M_z (orientée selon l'axe (oz))

Le domaine de résolution concerne la moitié du dispositif auquel sont associés des conditions aux limites sur les frontières du domaine de type DIRICHLET.

IV-3-1. Relevé des différents graphes

Les graphes relevés concernent :

- La géométrie.
- Le maillage.
- Le potentiel vecteur magnétique A.
- L'induction B.
- Le champ H.
- La force en fonction du déplacement.
- La vitesse en fonction du déplacement
- La vitesse en fonction du temps
- La force en fonction de la vitesse
- Déplacement en fonction du temps

IV-3-1-1. Avant le déplacement

➤ La géométrie :

Elle est représentée en la figure IV.2

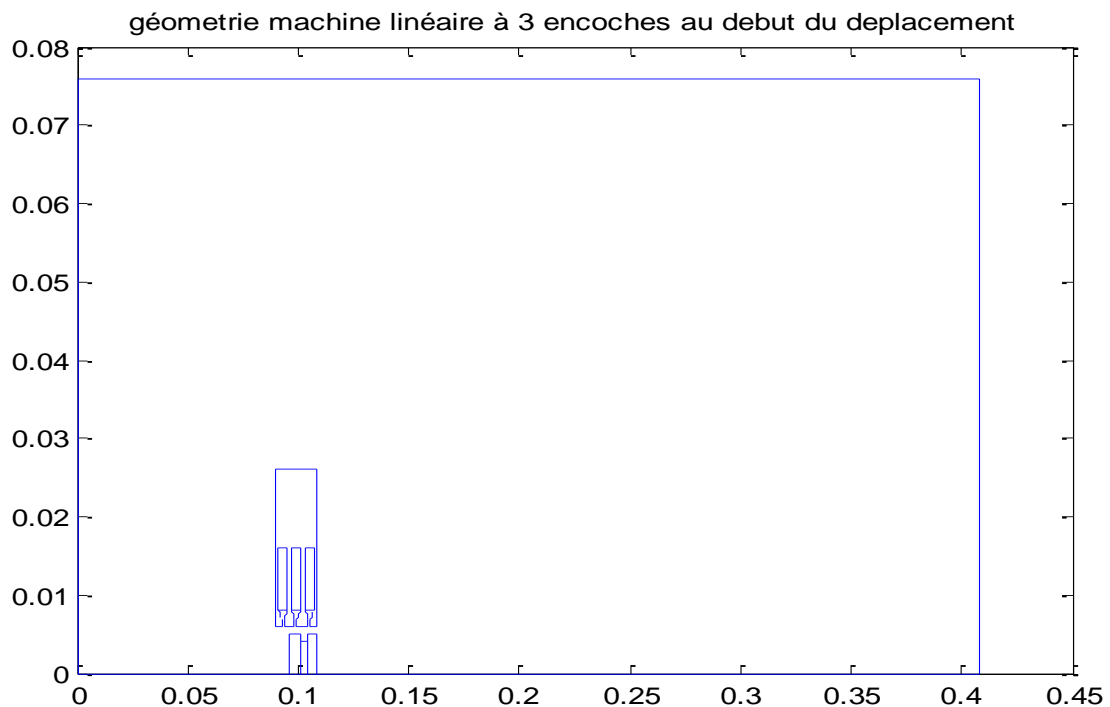


Figure (IV.2) : la géométrie ML⁽³⁾ à 3 encoches au début du déplacement

(3) ML : machine linéaire

➤ **Le maillage**

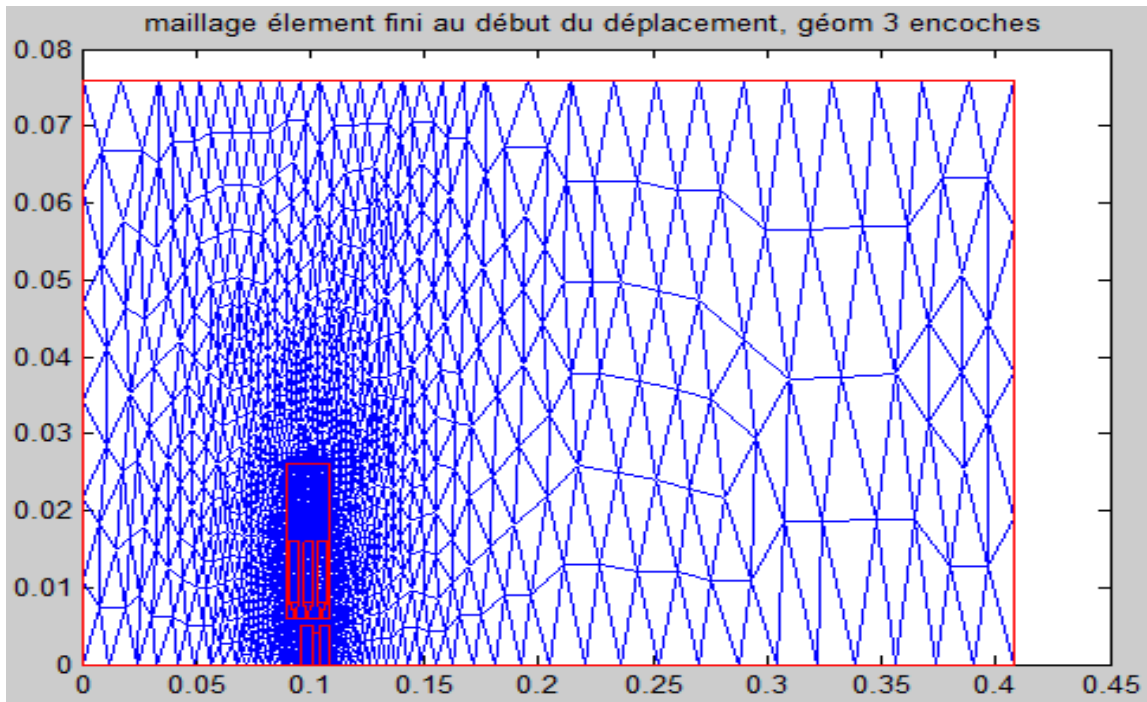
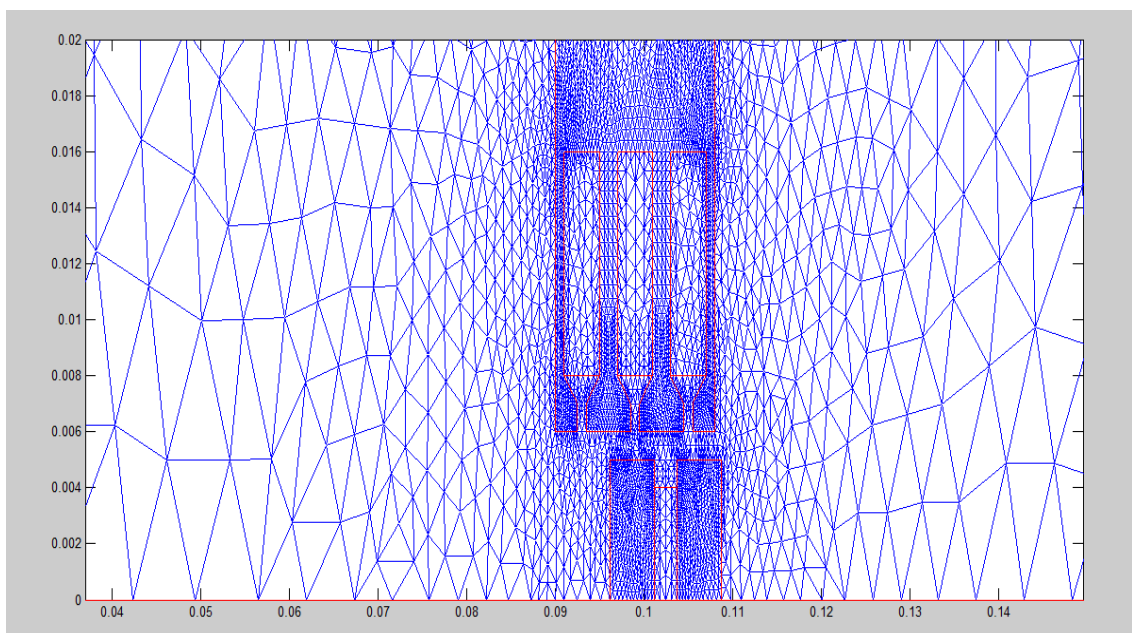


Figure (IV.3) : Maillage élément fini au début du déplacement, 3 encoches

❖ **Zoom sur le maillage**



➤ **Potentiel vecteur magnétique A**

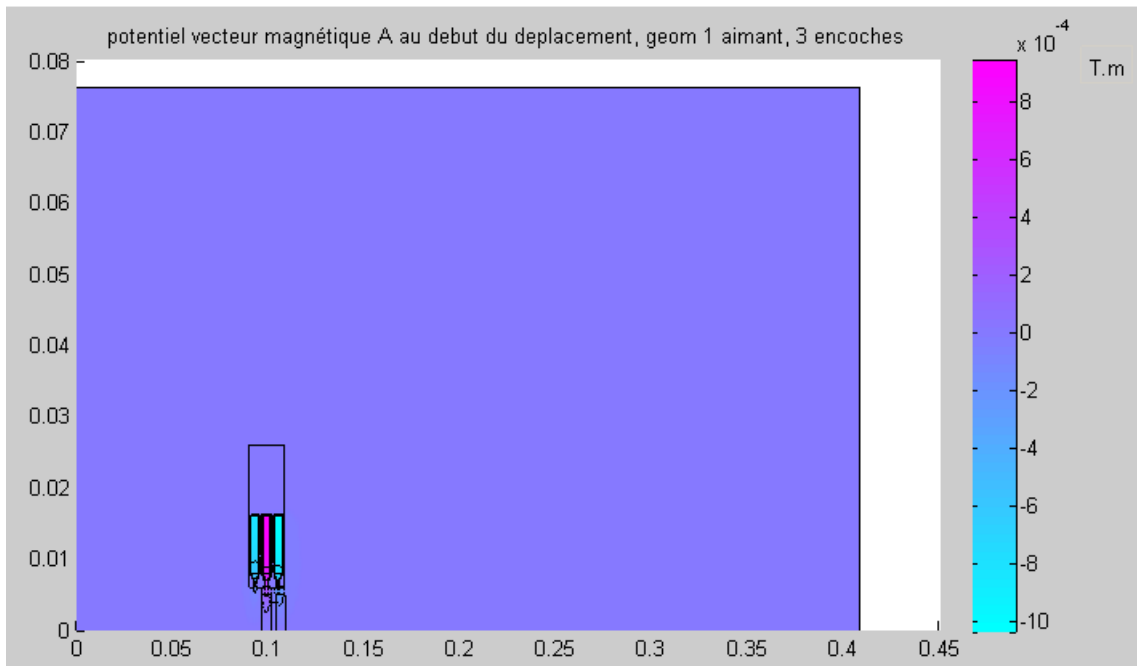
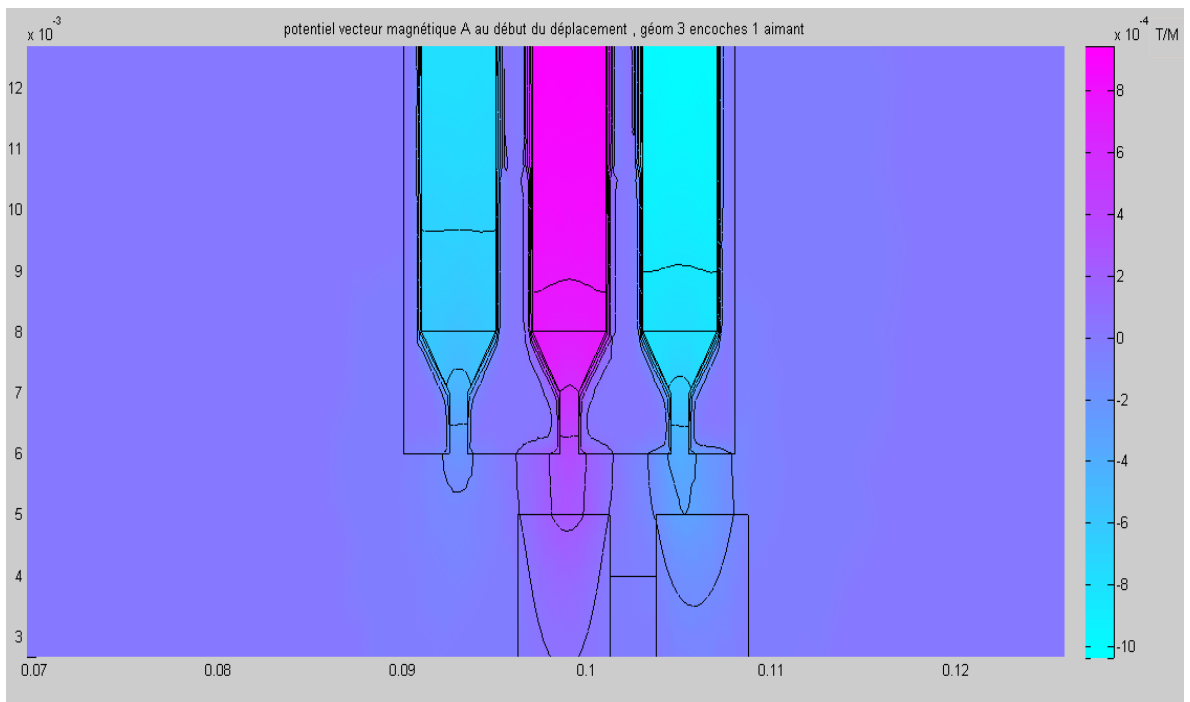


Figure (IV.4) : Potentiel vecteur magnétique A au début du déplacement, ML 3 encoches

❖ **Zoom sur le potentiel vecteur magnétique A**



➤ **Induction B**

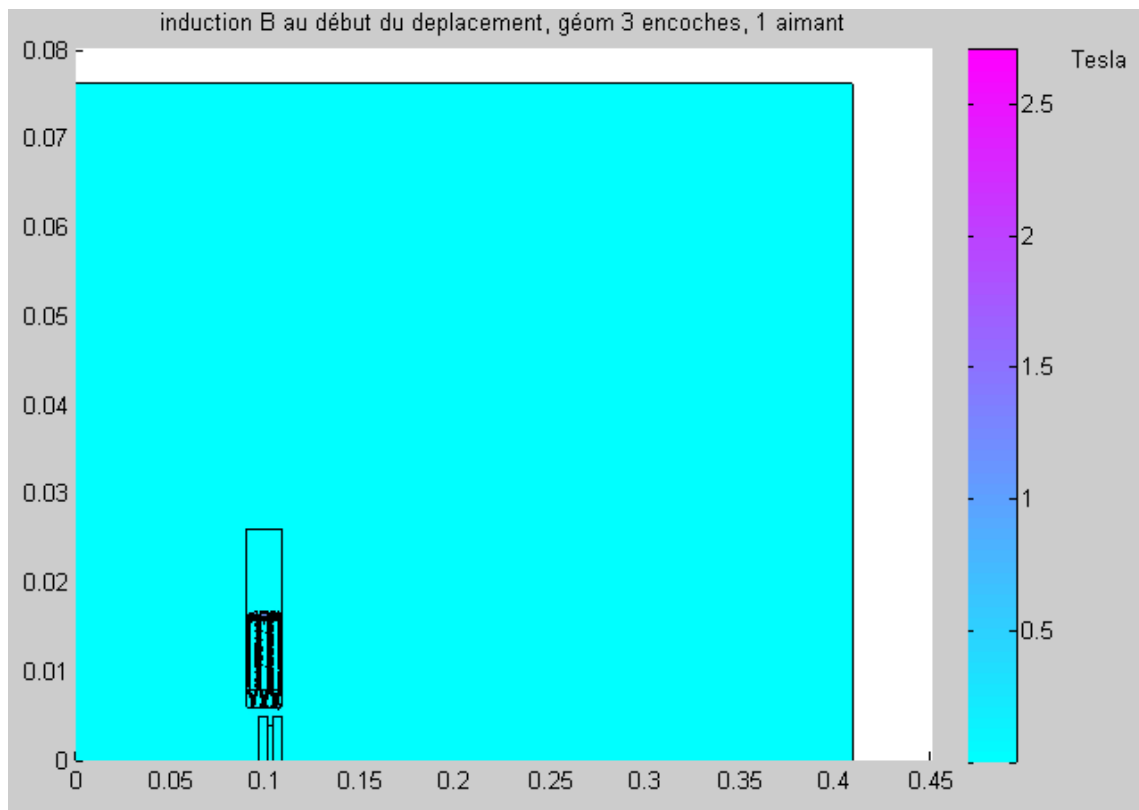
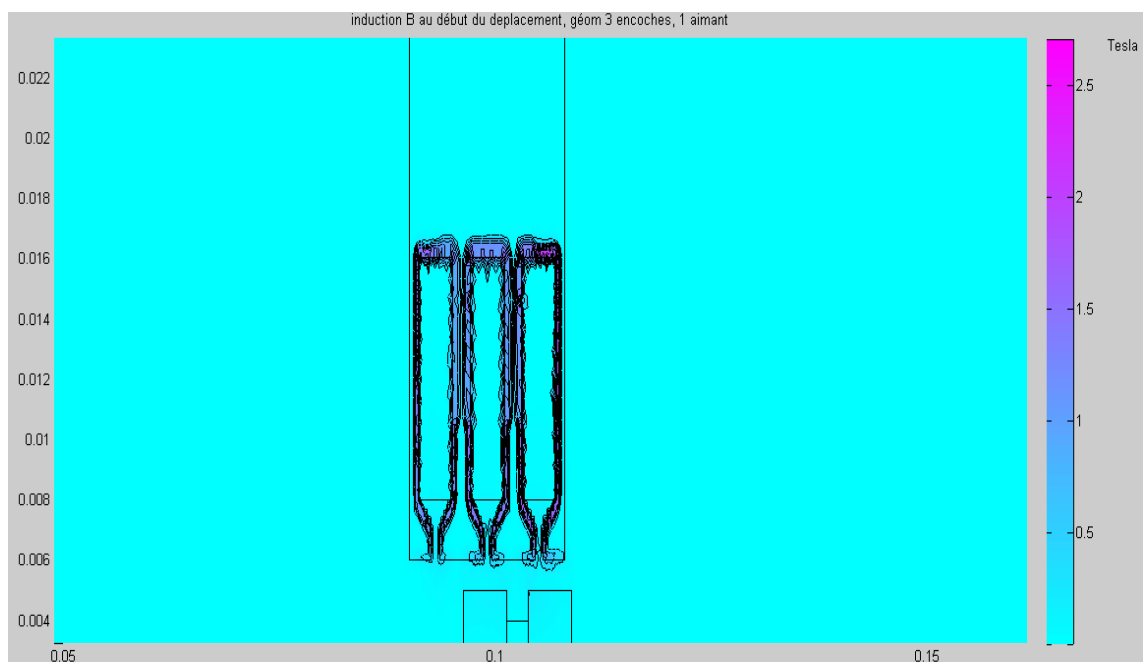


Figure (IV.5) : Induction (B) au début du déplacement, géométrie 3encoches

❖ **Zoom sur l'induction B**



➤ **Champ H**

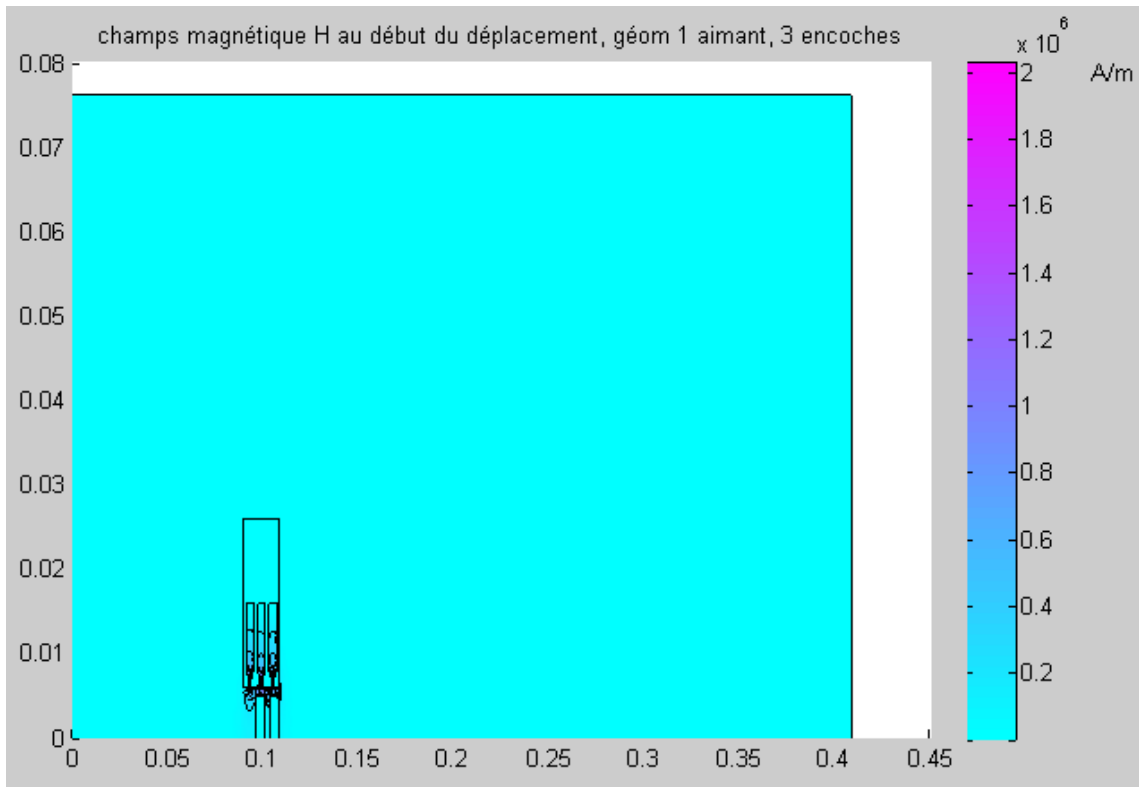
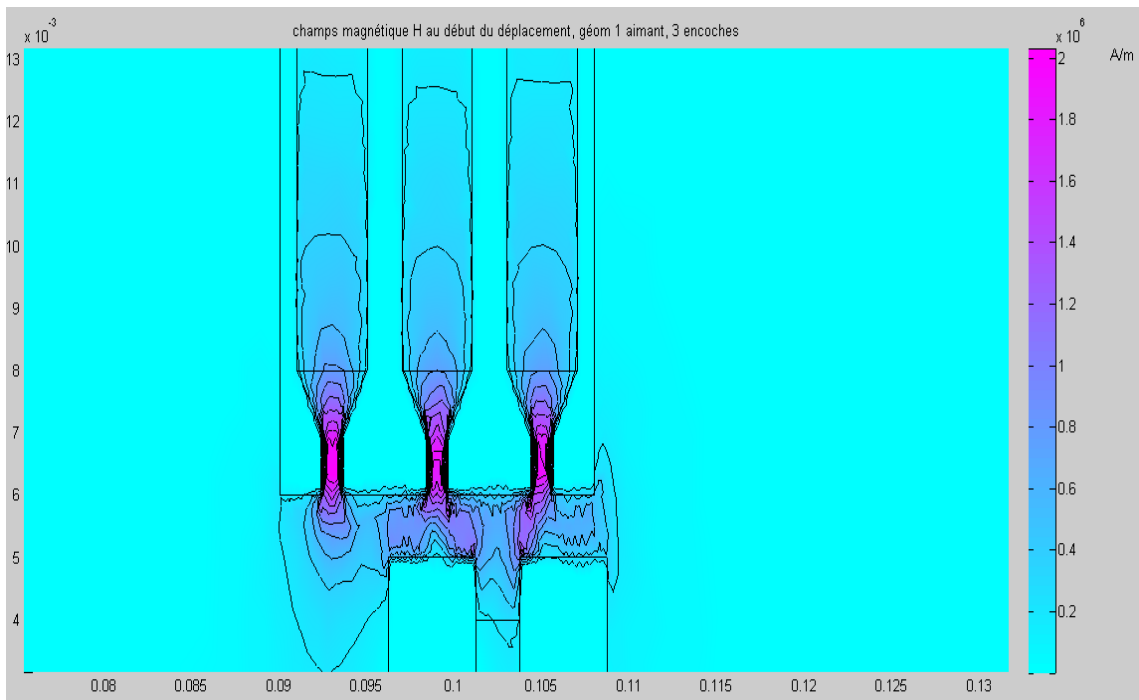


Figure (IV.6) : champs magnétique (H) au début du déplacement ML à 3 encoches

❖ **Zoom sur le champ H**



IV-3-1-2. Après le déplacement

➤ La géométrie

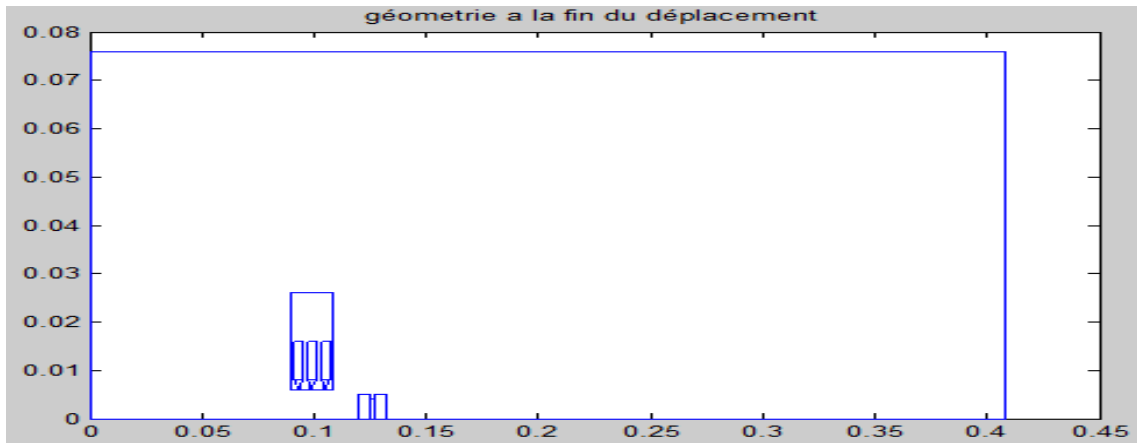


Figure (IV.7) : la géométrie ML à 3 encoches au début du déplacement

➤ Le maillage

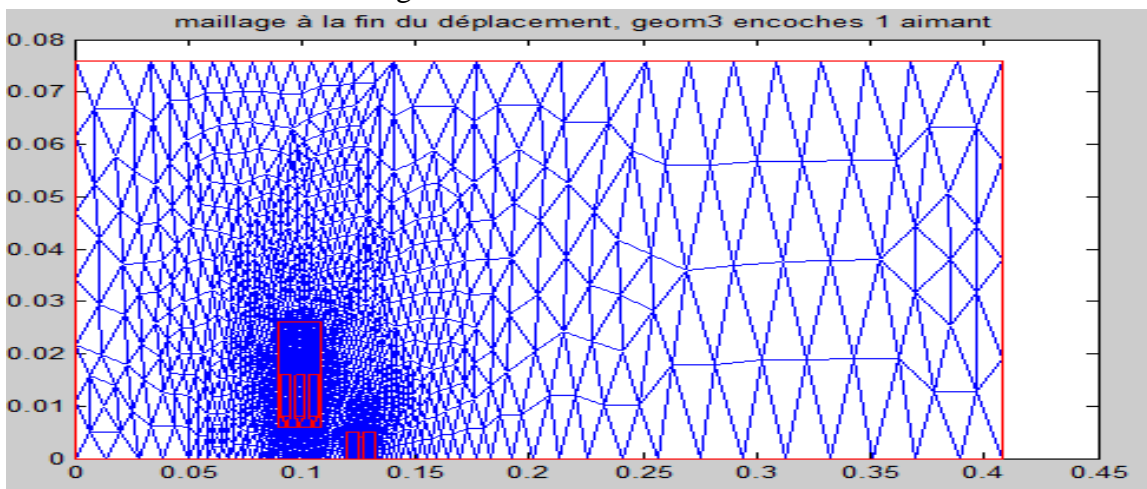
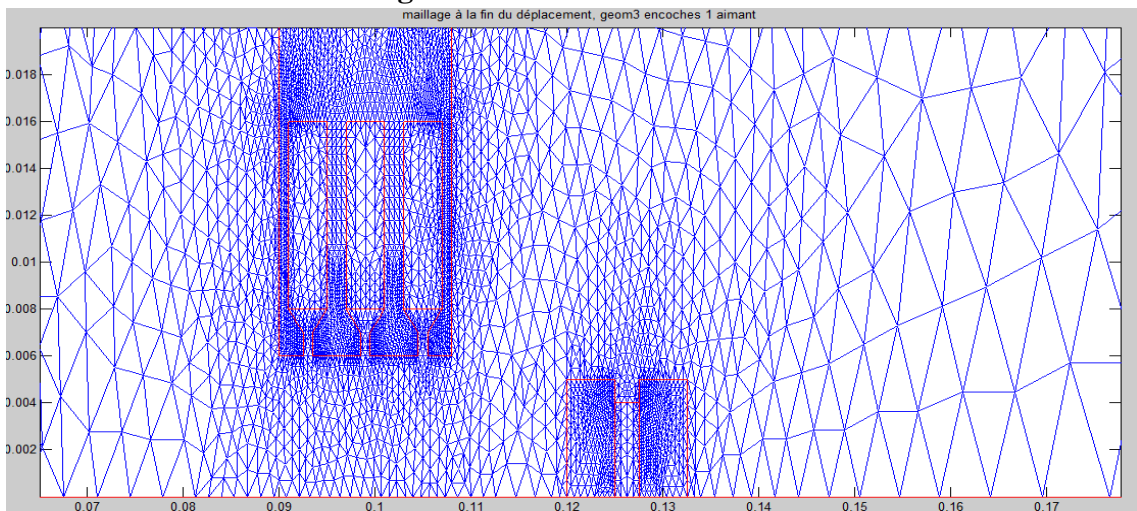


Figure (IV.8) : Maillage élément fini au début du déplacement, 3 encoches

❖ **Zoom sur le maillage**



➤ Potentiel vecteur magnétique A

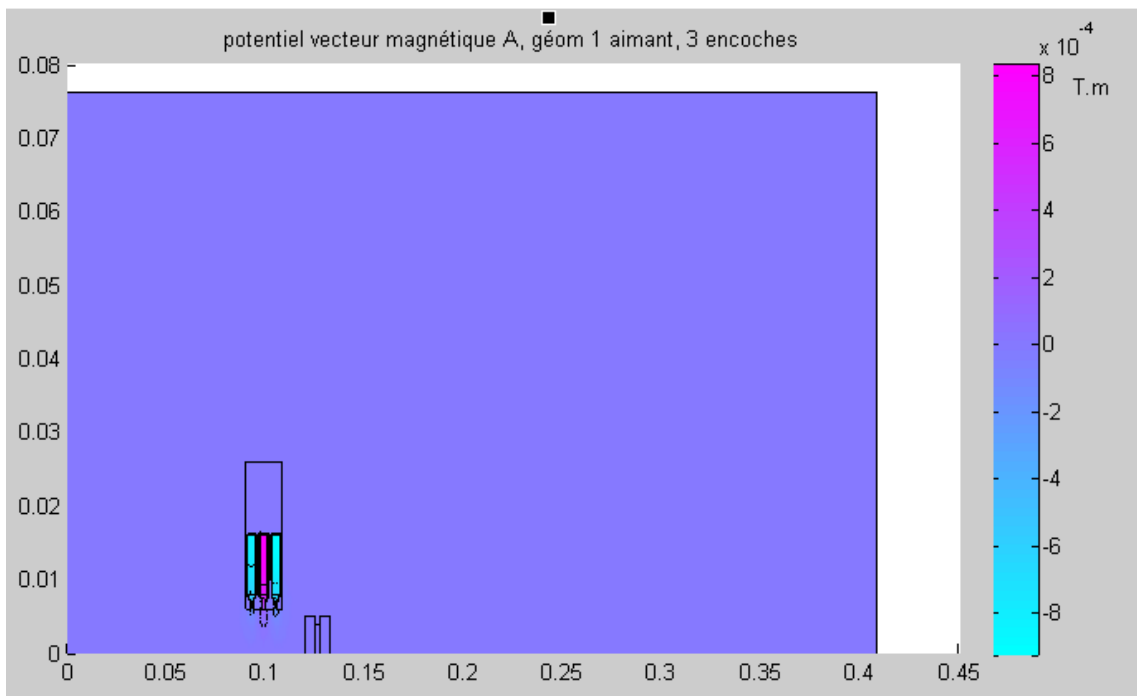
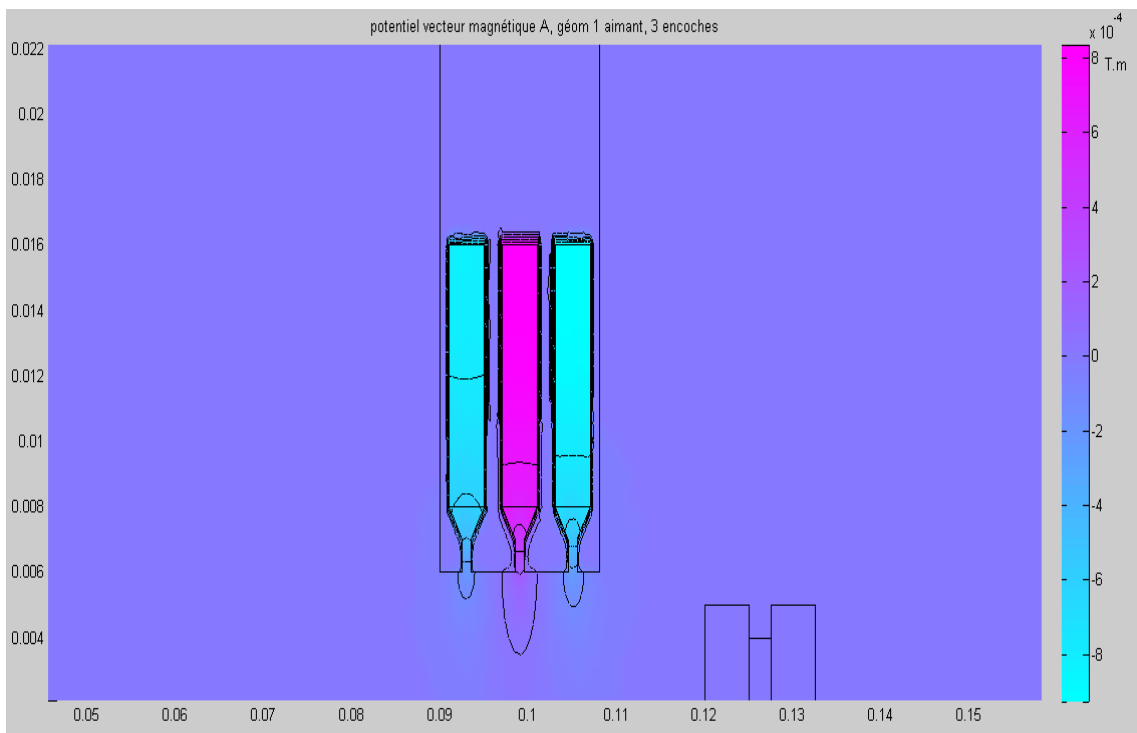


Figure (IV.9) : Potentiel vecteur magnétique A à la fin du déplacement, ML 3 encoches

❖ Zoom sur le potentiel vecteur magnétique A



➤ Induction B

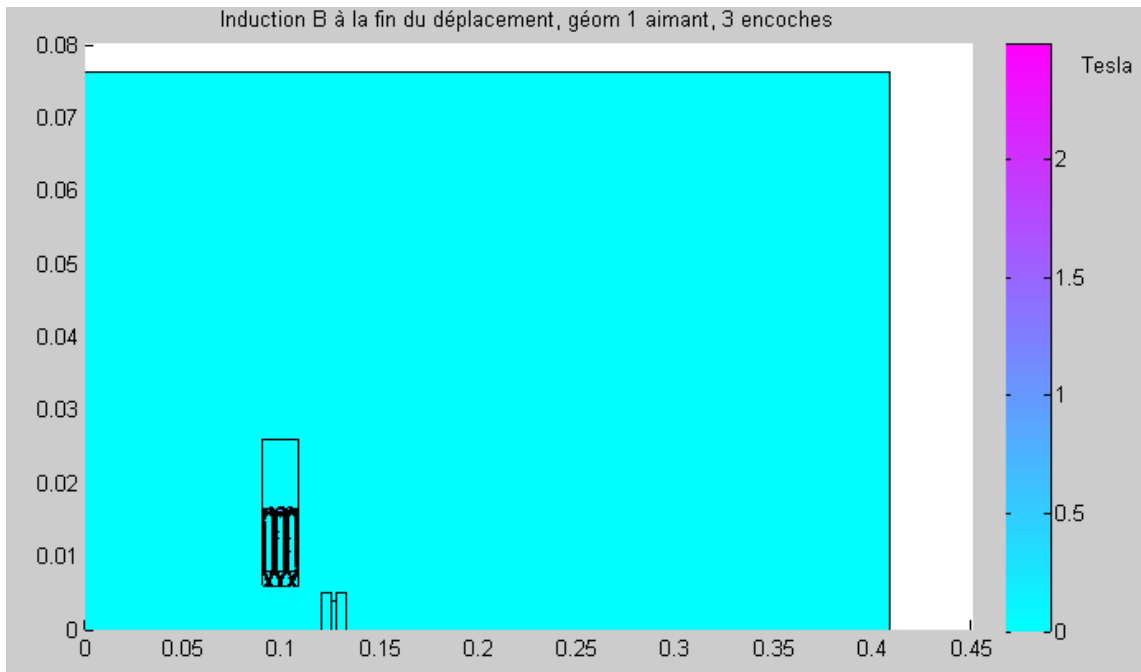
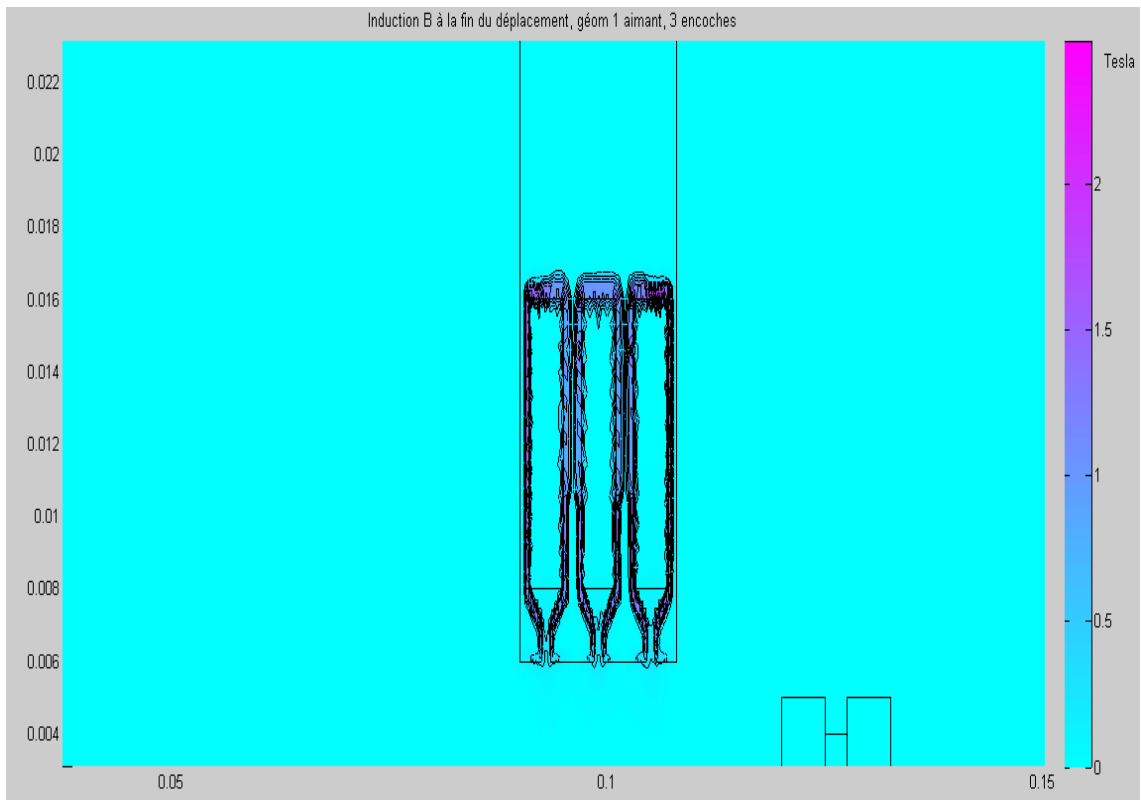


Figure (IV.10) : Induction (B) à la fin du déplacement, géométrie 3encoches

❖ **Zoom sur l'induction B**



➤ **Champ H**

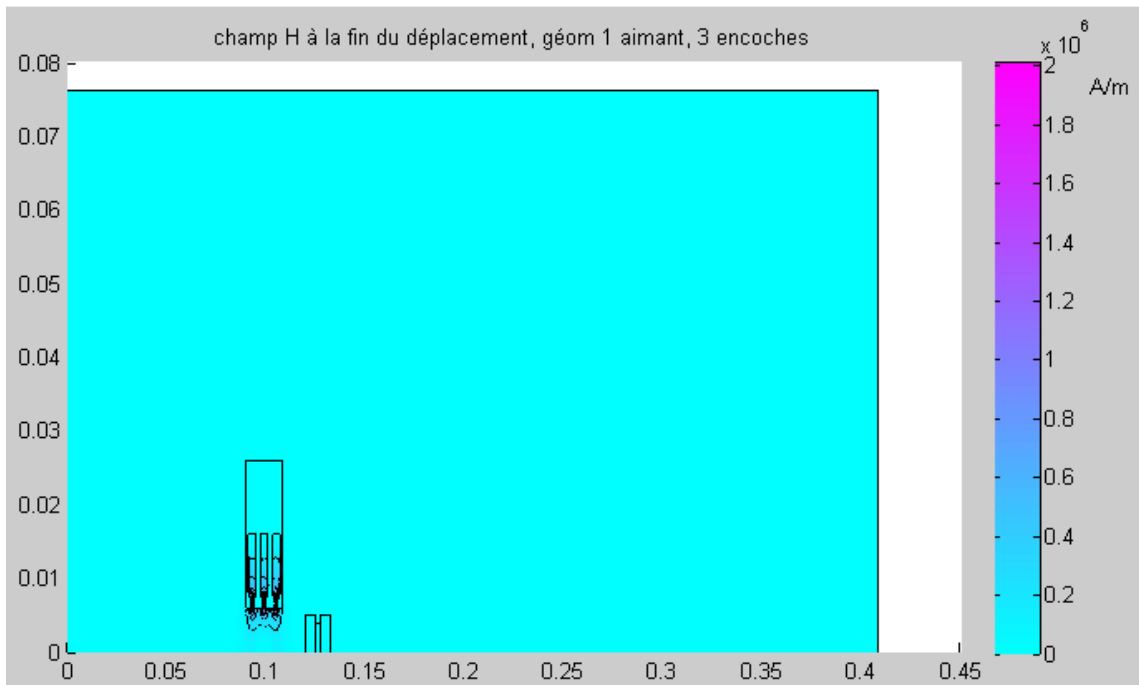
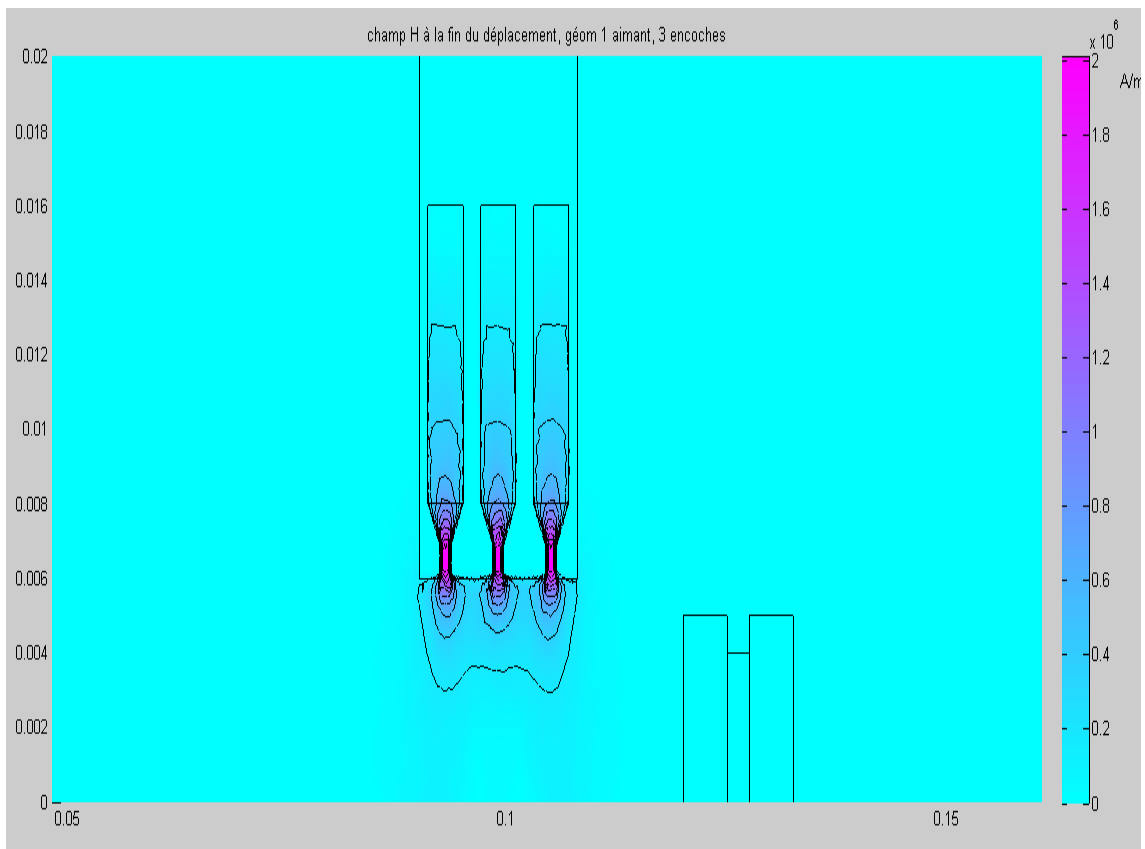


Figure (IV.11) : champs magnétique (H) à la du déplacement ML à 3 encoches

❖ **Zoom sur le champ H**



➤ Force en fonction du déplacement

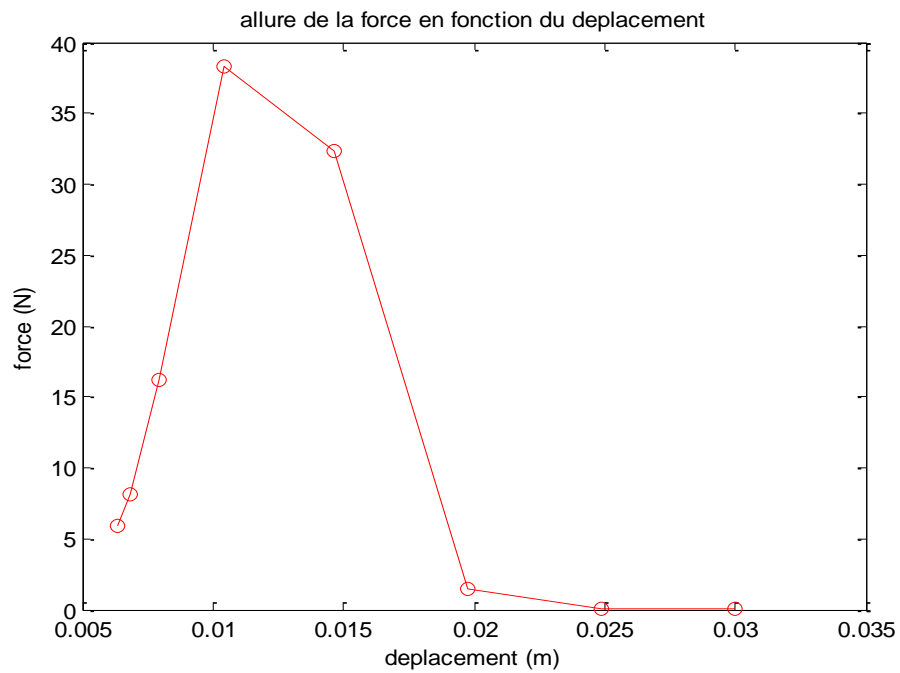


Figure (IV.12) force en fonction du déplacement

On constate que la force augmente jusqu'à une certaine valeur ; en faisant un zoom on trouve qu'elle correspond à $F=38.3$ N puis commence à décroître, elle est caractérisée ainsi par un pic duquel elle décroît jusqu'à s'annuler et ce au fur et à mesure du déplacement, c'est-à-dire au fur et à mesure que le mobile quitte la zone d'influence du champ statorique.

➤ Vitesse en fonction du déplacement

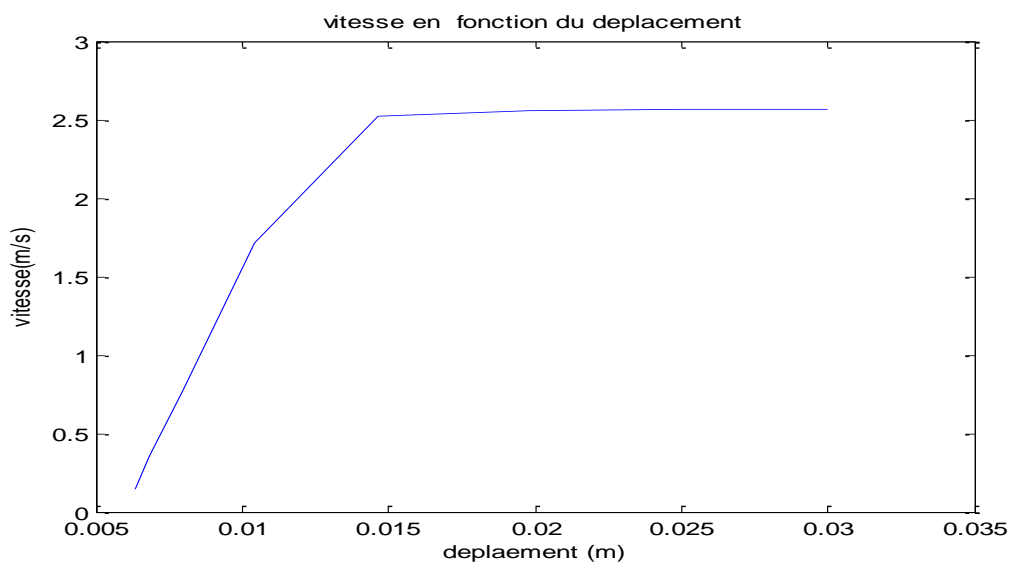


Figure (IV.13) vitesse en fonction du déplacement

On constate que la vitesse est une courbe croissante au fur du déplacement puis se stabilise à une certaine valeur de laquelle elle reste fixe et ne change pas quel que soit le déplacement.

➤ La vitesse en fonction du temps

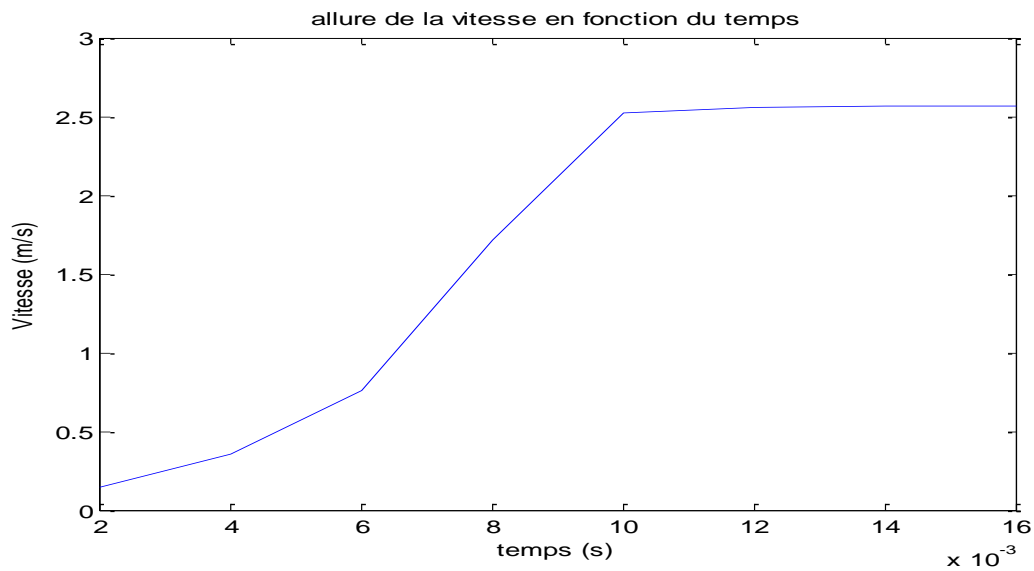


Figure (IV.14) vitesse en fonction du temps

On constate que la vitesse croit au fur du temps de déplacement puis se stabilise à une certaine valeur de laquelle elle reste fixe et ne change pas quel que soit le déplacement.

➤ La force en fonction de la vitesse

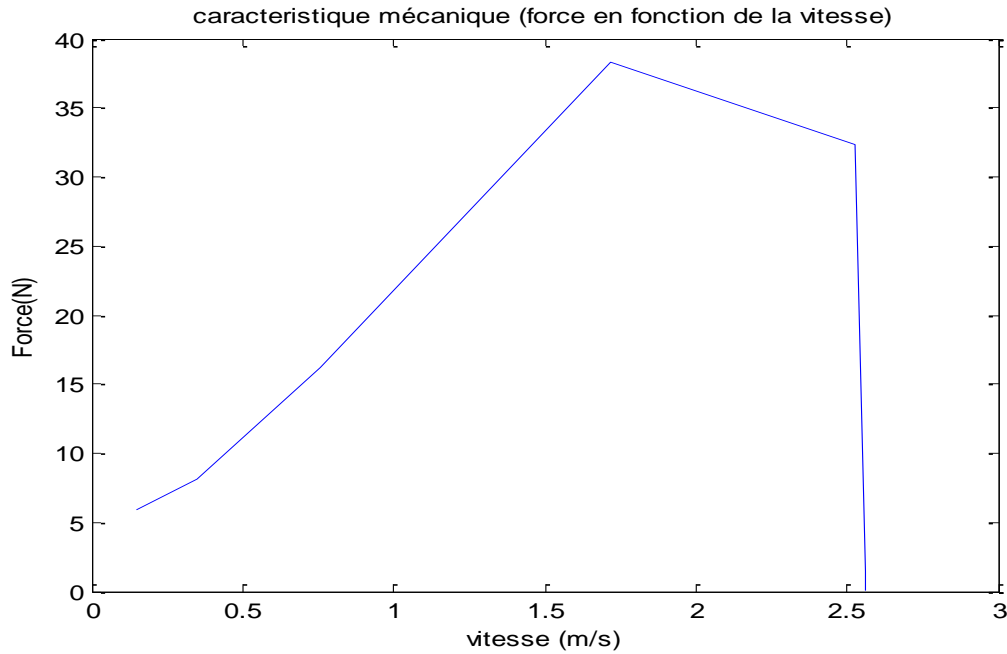


Figure (IV.15) force en fonction de la vitesse

On constate que la force croit en fonction de la vitesse jusqu'à une certaine valeur de la force de laquelle elle diminue puis ne change plus.

➤ Déplacement en fonction du temps

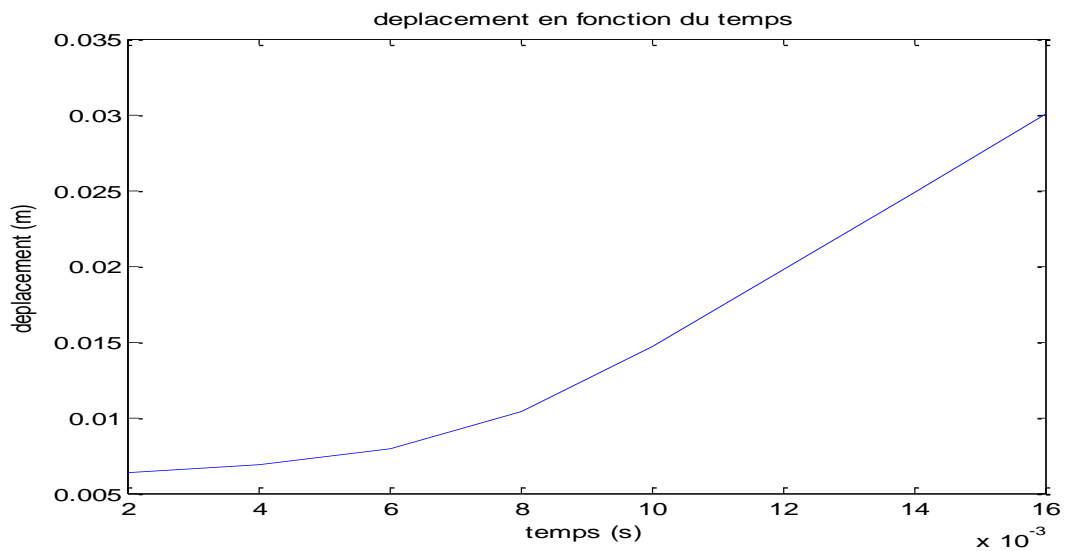


Figure (IV.16) déplacement en fonction du temps

Cette figure nous montre la variation du déplacement de la partie mobile de la géométrie étudiée en fonction du temps, on remarque qu'au début du déplacement on obtient une courbe et cette dernière devient linéaire après un certain temps, correspondant au moment où le mobile quitte la zone d'influence du champ statorique.

IV-4. Application 2 : Dispositif à 6 encoches à 1 aimant

Le dispositif est une géométrie d'une machine linéaire à 6 encoches (Figure IV.1) dont les paramètres sont ceux précités.

IV-4-1. Relevé des graphes

Les graphes relevés concernent :

- La géométrie.
- Le maillage.
- Le potentiel vecteur magnétique A.
- L'induction B.
- Le champ H.
- La force en fonction du déplacement.
- La vitesse en fonction du déplacement
- La vitesse en fonction du temps
- La force en fonction de la vitesse
- Déplacement en fonction du temps

➤ La géométrie

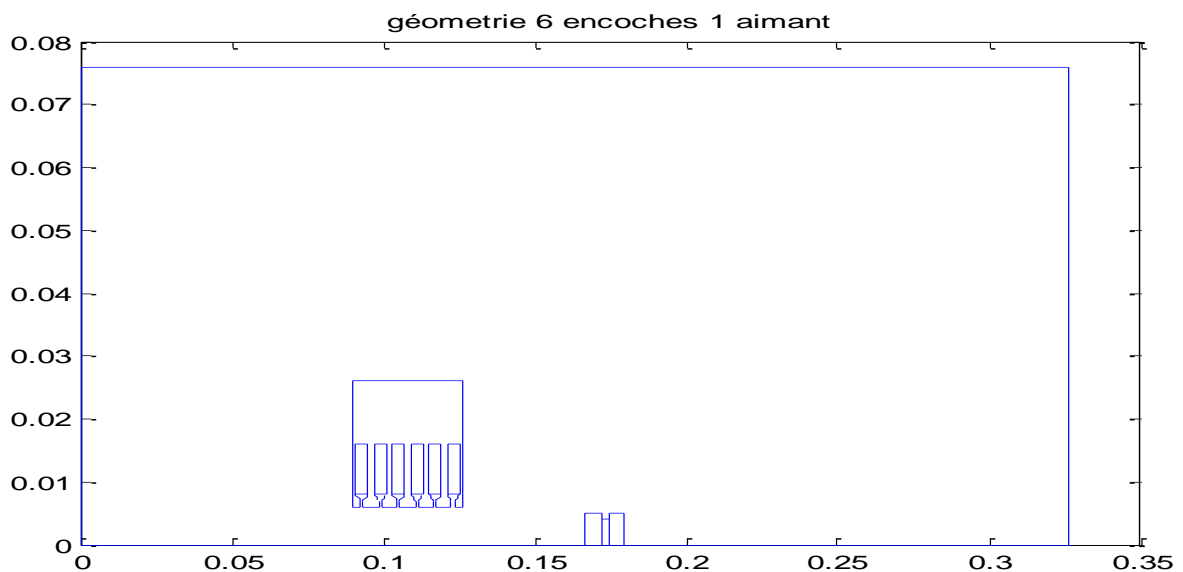


Figure (IV.17) : la géométrie ML à 6 encoches et un aimant

➤ Le maillage

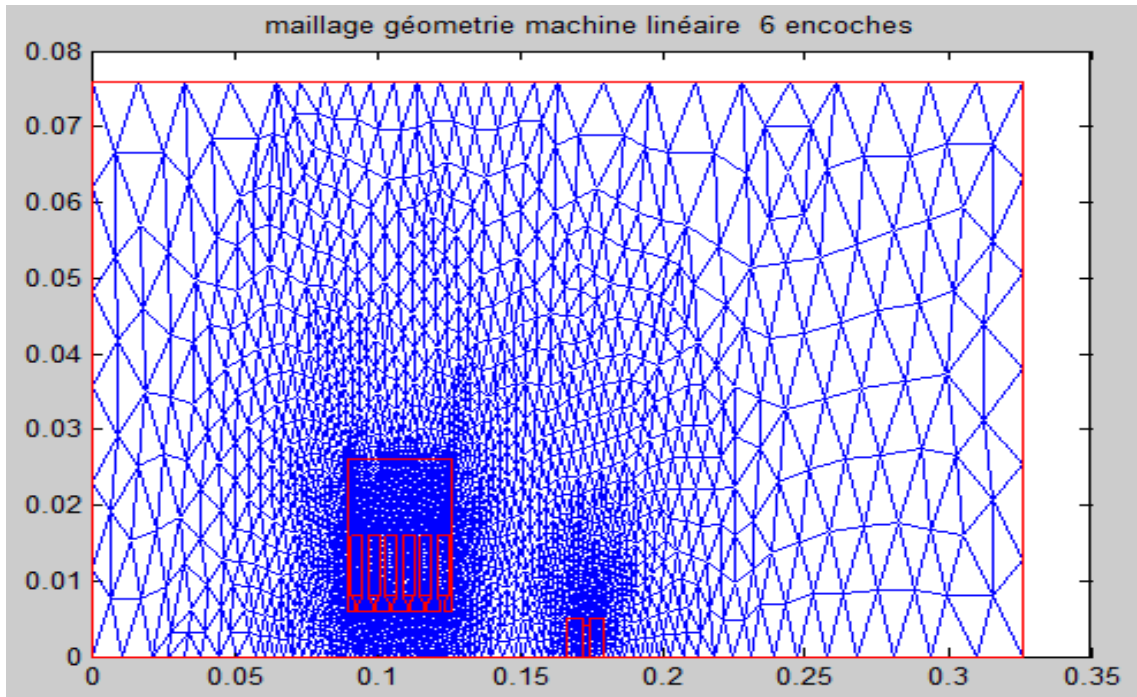
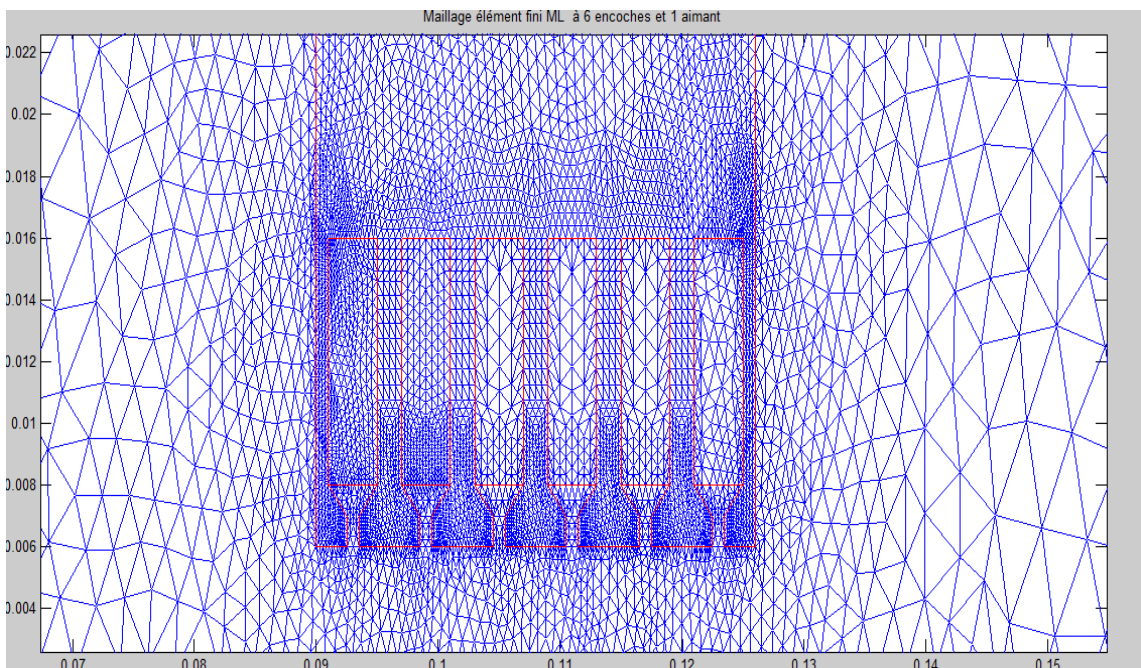


Figure (IV.18) : Maillage élément fini ML à 6 encoches et 1 aimant

❖ **Zoom sur le maillage**



➤ Potentiel vecteur magnétique A

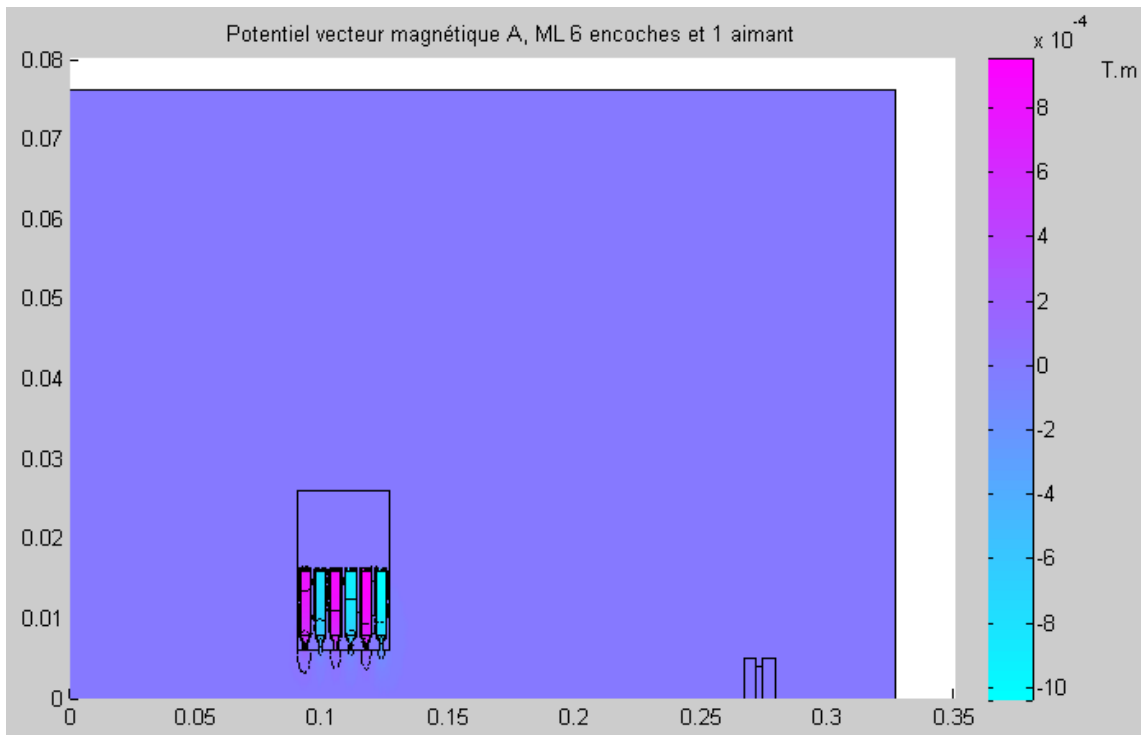
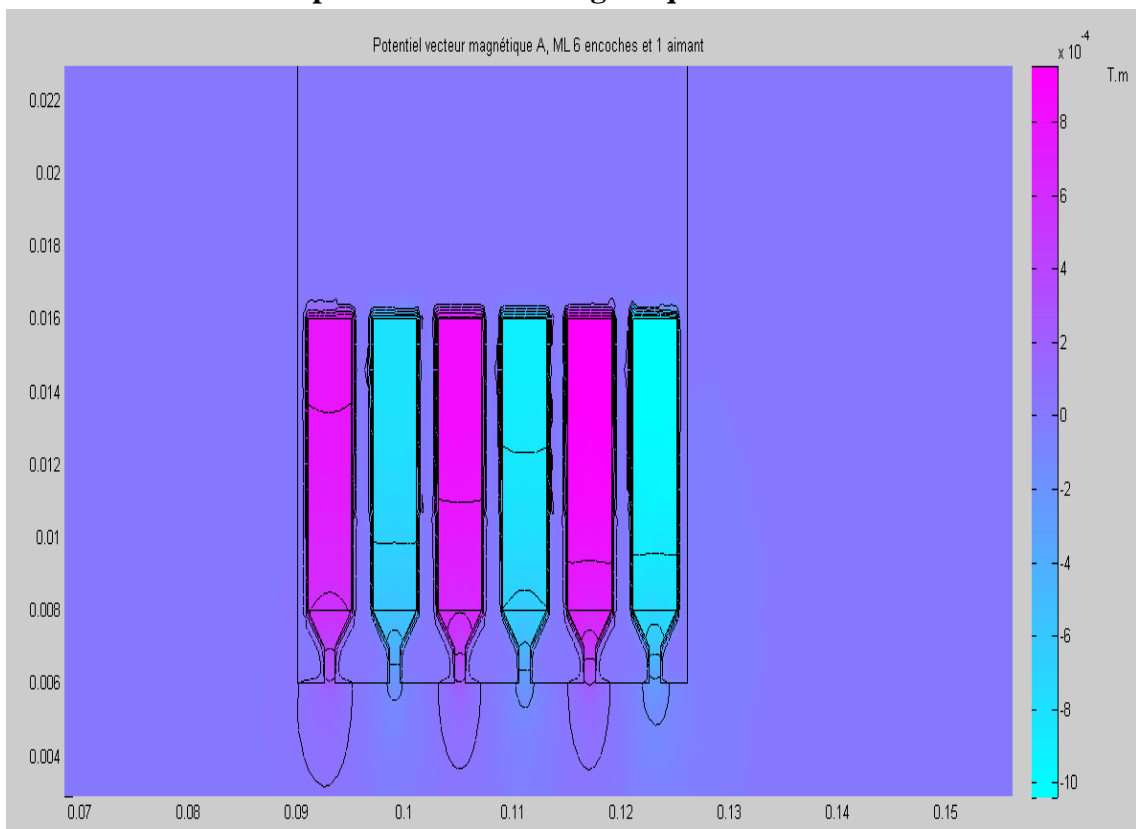


Figure (IV.19) : Potentiel vecteur magnétique A, ML 6 encoches et 1 aimant

❖ Zoom sur le potentiel vecteur magnétique A



➤ Induction B

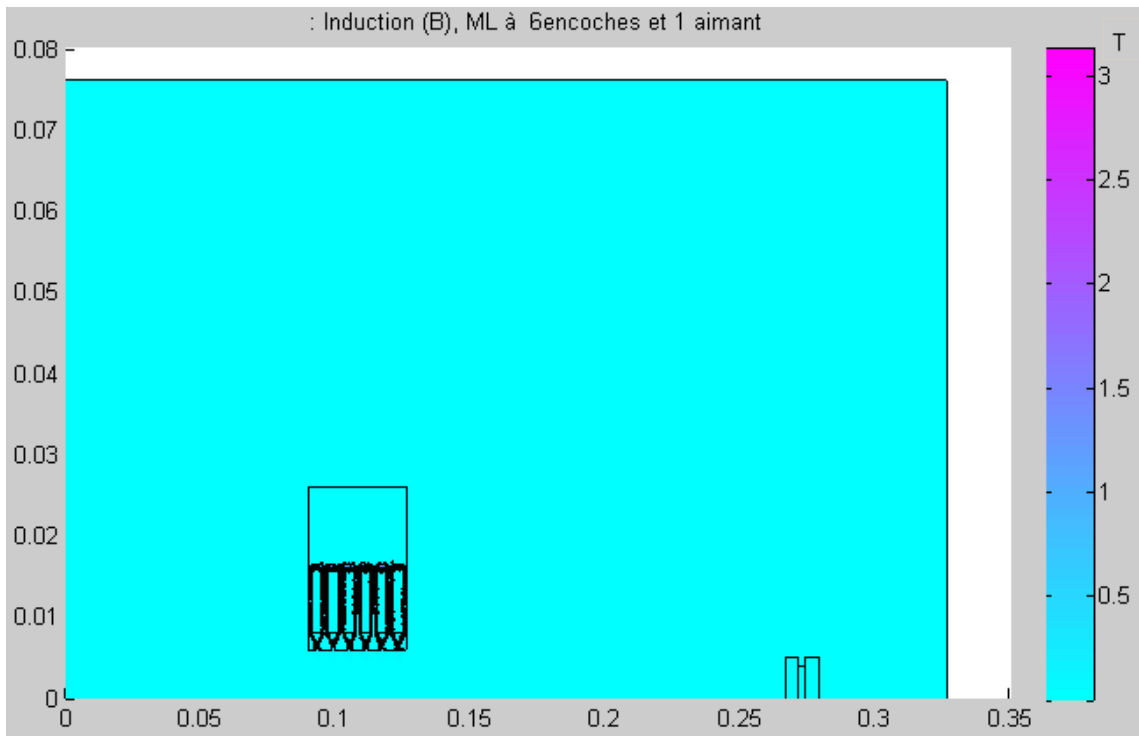
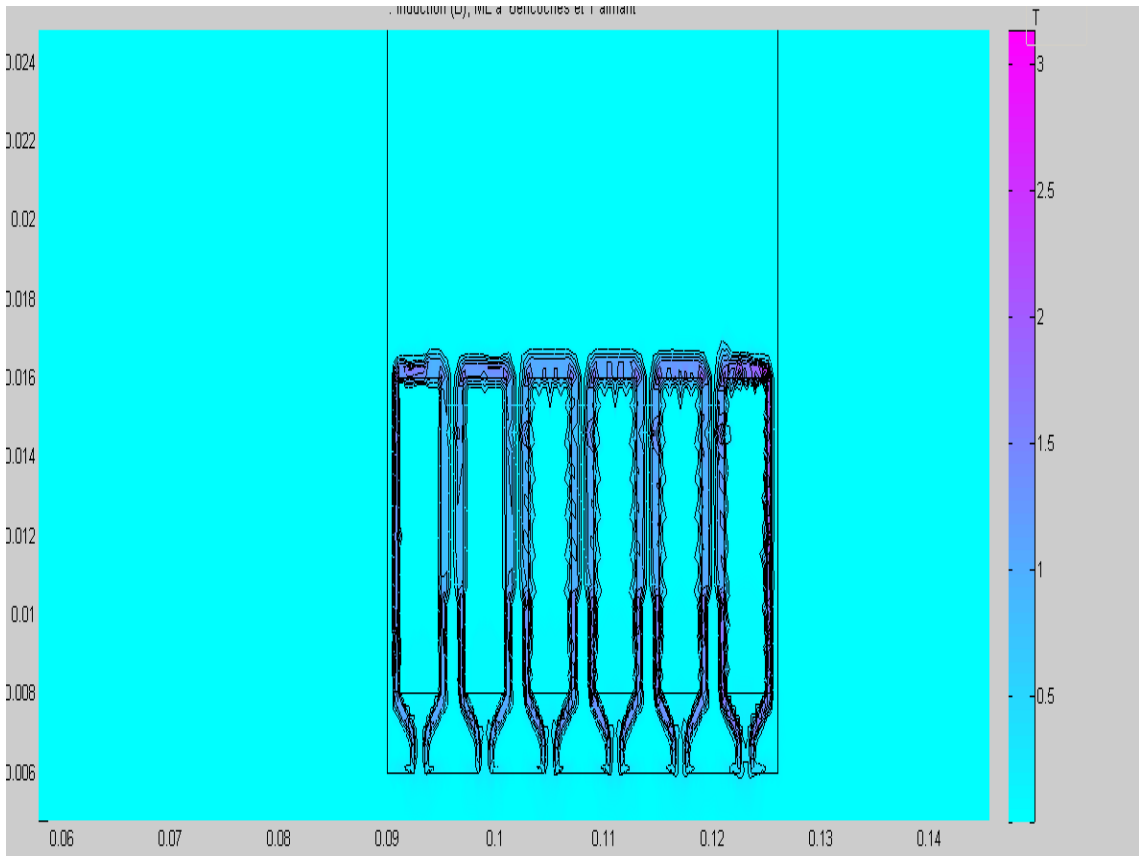


Figure (IV.20) : Induction (B), ML à 6 encoches et 1 aimant

❖ Zoom sur l'induction B



➤ Champ H

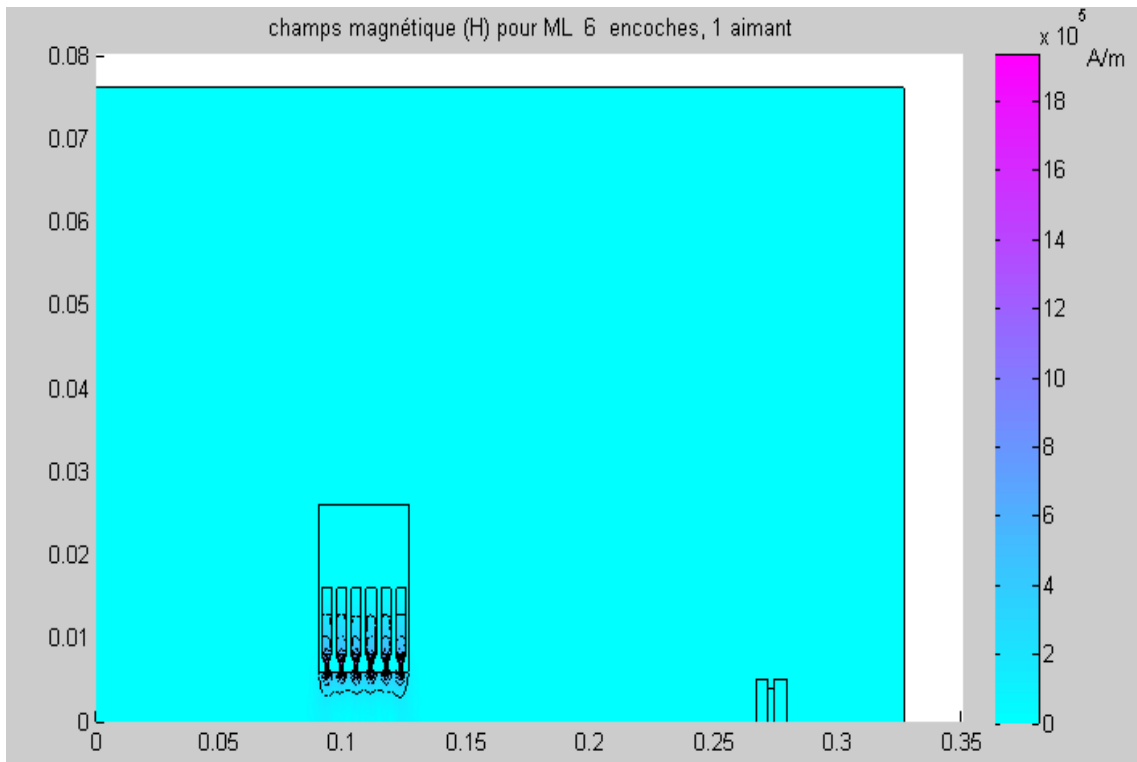
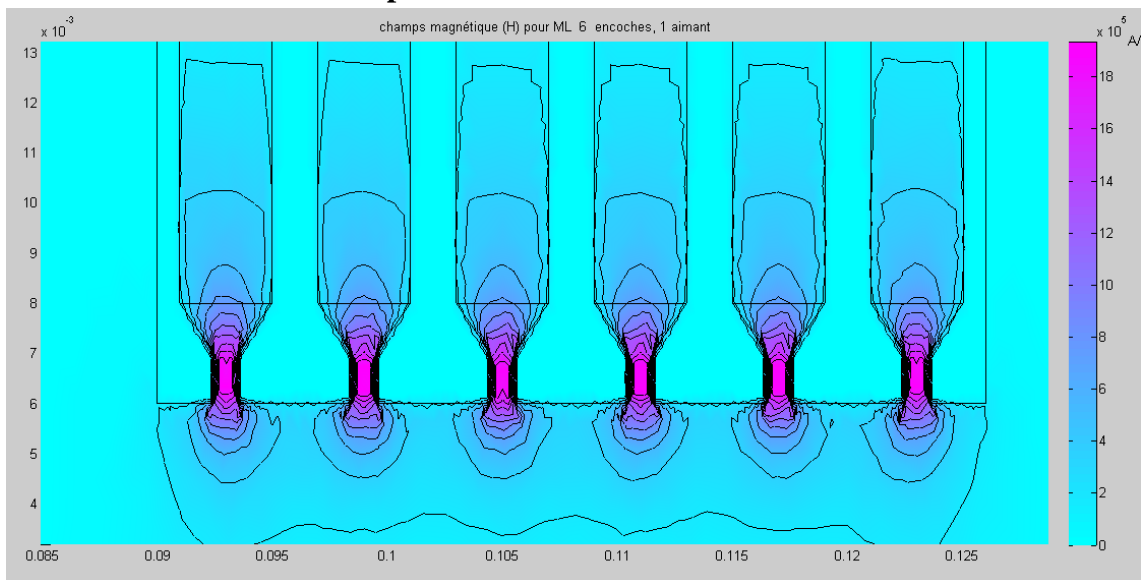


Figure (IV.21) : champs magnétique (H) pour ML 6 encoches, 1 aimant

❖ Zoom sur le champ H



➤ Force en fonction du déplacement

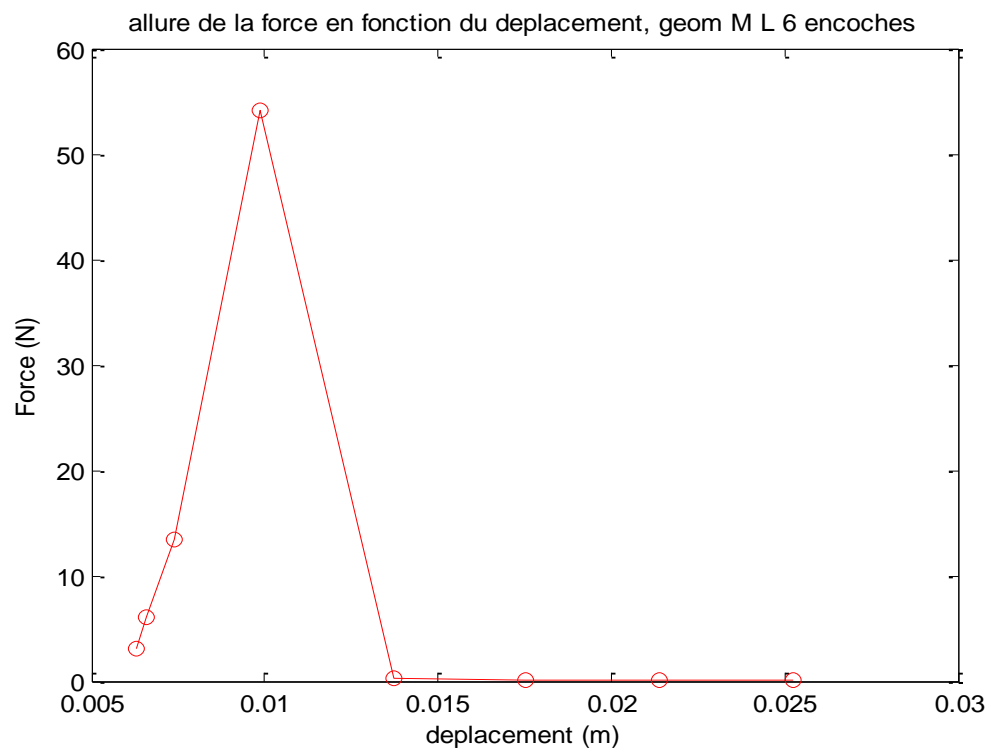
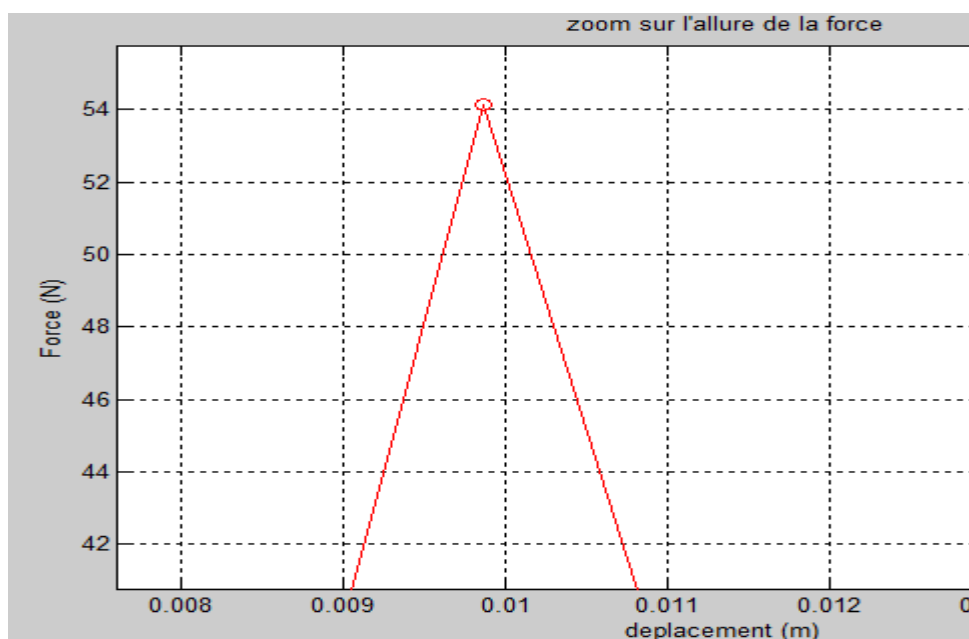


Figure (IV.22) force en fonction du déplacement

On constate que la force est caractérisé par un pique puis décroît au fil du déplacement jusqu'à s'annuler

En faisant zoomer on a :



Donc $F_{max}=54$ N

➤ Vitesse en fonction du déplacement

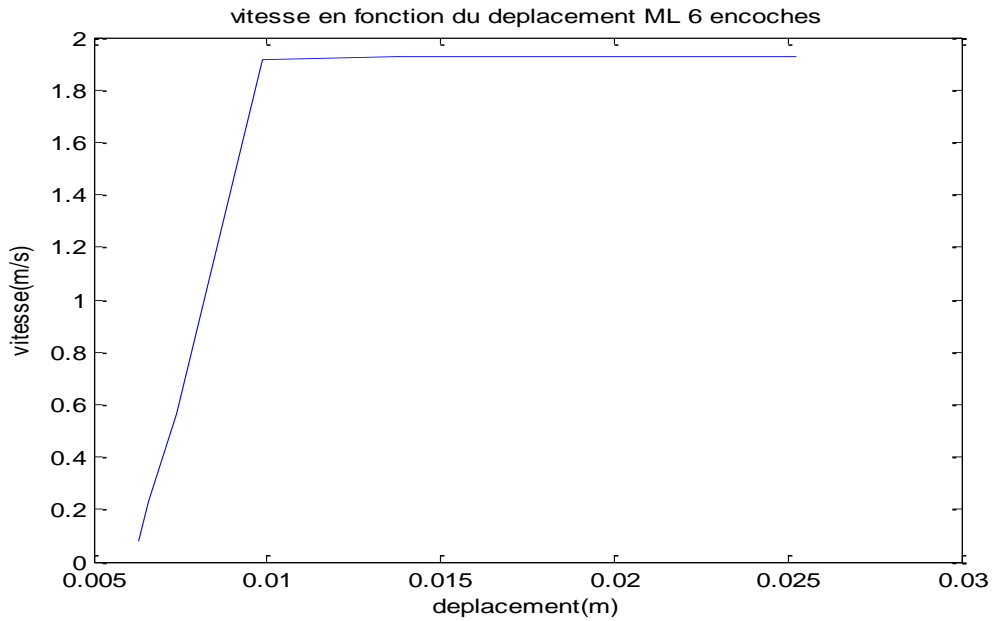
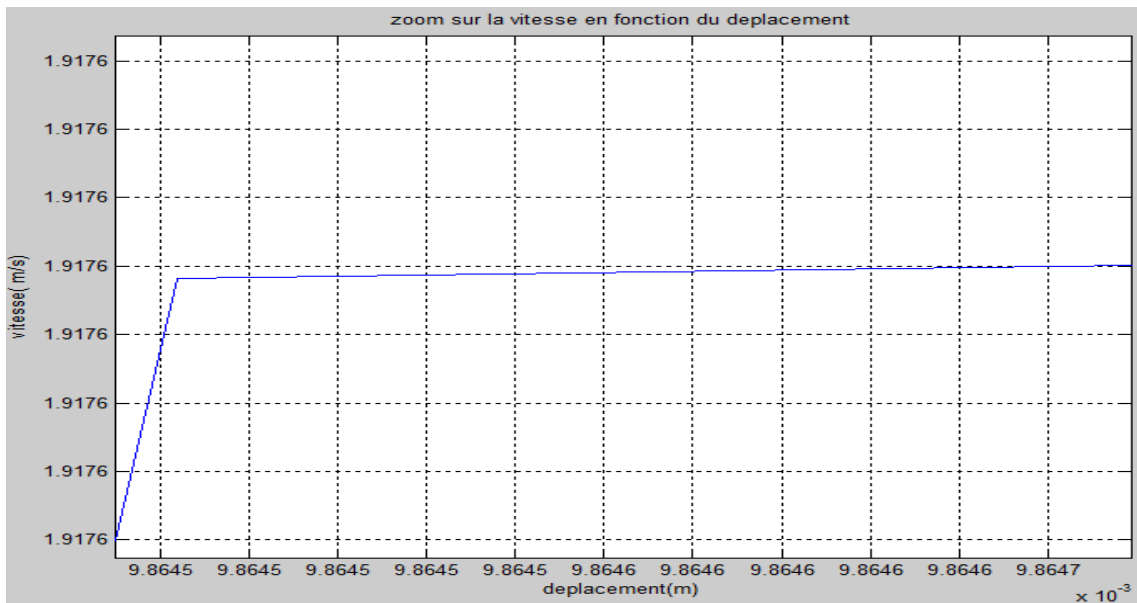


Figure (IV.23) vitesse en fonction du déplacement

La vitesse croit progressivement avec le déplacement jusqu'à atteindre approximativement la valeur de 1.9 m/s puis elle se stabilise à partir de cette dernière.

En faisant un zoom sur l'allure de la vitesse on obtient :



$V_{max} = 1.9176 \text{ m/s}$

➤ La vitesse en fonction du temps

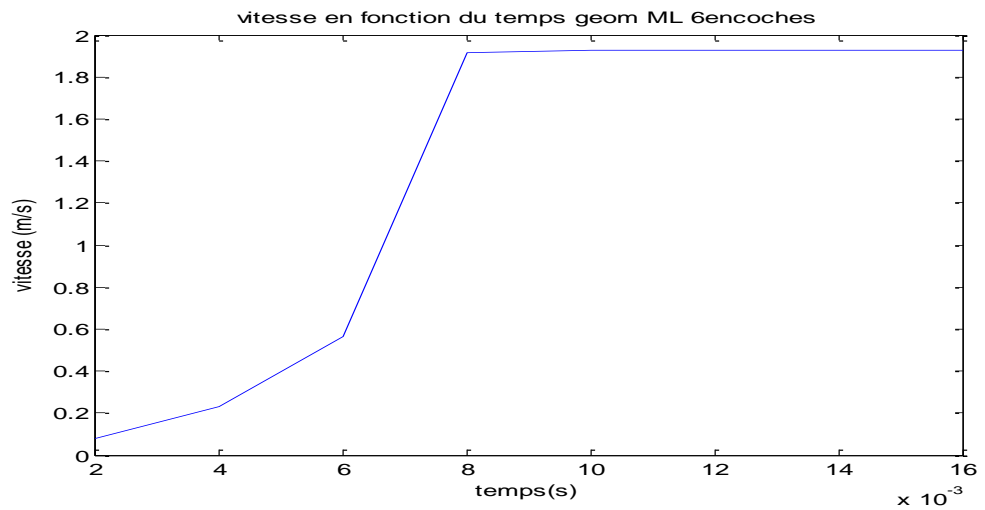


Figure (IV.24) vitesse en fonction du temps

La vitesse croit progressivement avec le temps jusqu'à un certain moment t duquel elle reste stable quelque que soit t

➤ La force en fonction de la vitesse

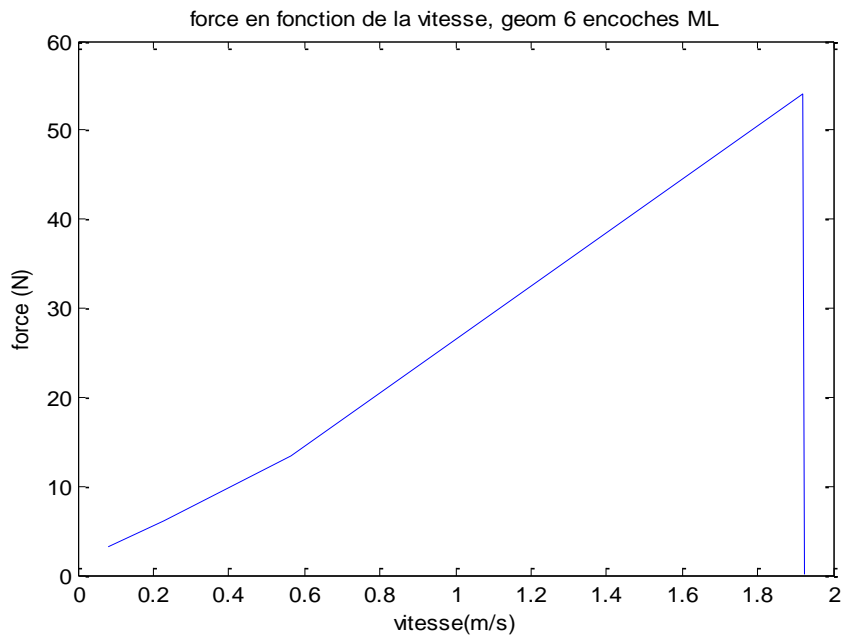


Figure (IV.25) force en fonction de la vitesse

Cette figure nous montre la variation de la force en fonction du déplacement

➤ Déplacement en fonction du temps

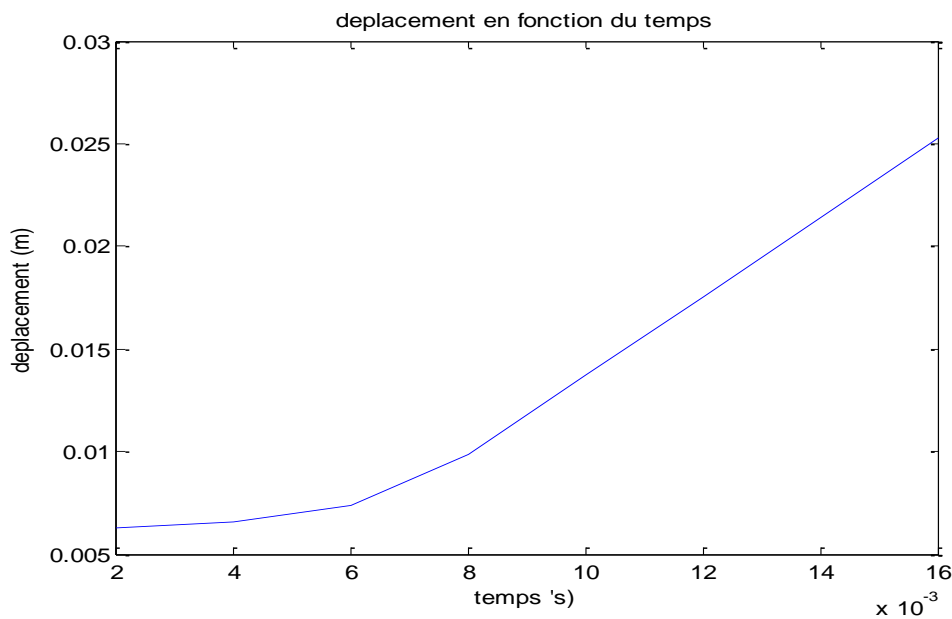


Figure (IV.26) déplacement en fonction du temps

On constate que le déplacement est croissant avec le temps.

IV-5. Application 3 : Dispositif à 6 encoches à 2 aimants

Le dispositif est une géométrie d'une machine linéaire à 6 encoches (Figure IV.1) mais en ajoutant un autre aimant, les paramètres sont ceux précités.

IV-5-1. Relevé des graphes

Les graphes relevés concernent :

- La géométrie.
- Le maillage.
- Le potentiel vecteur magnétique A.
- L'induction B.
- Le champ H.
- La force en fonction du déplacement.
- La vitesse en fonction du déplacement
- La vitesse en fonction du temps
- La force en fonction de la vitesse
- Déplacement en fonction du temps

➤ La géométrie

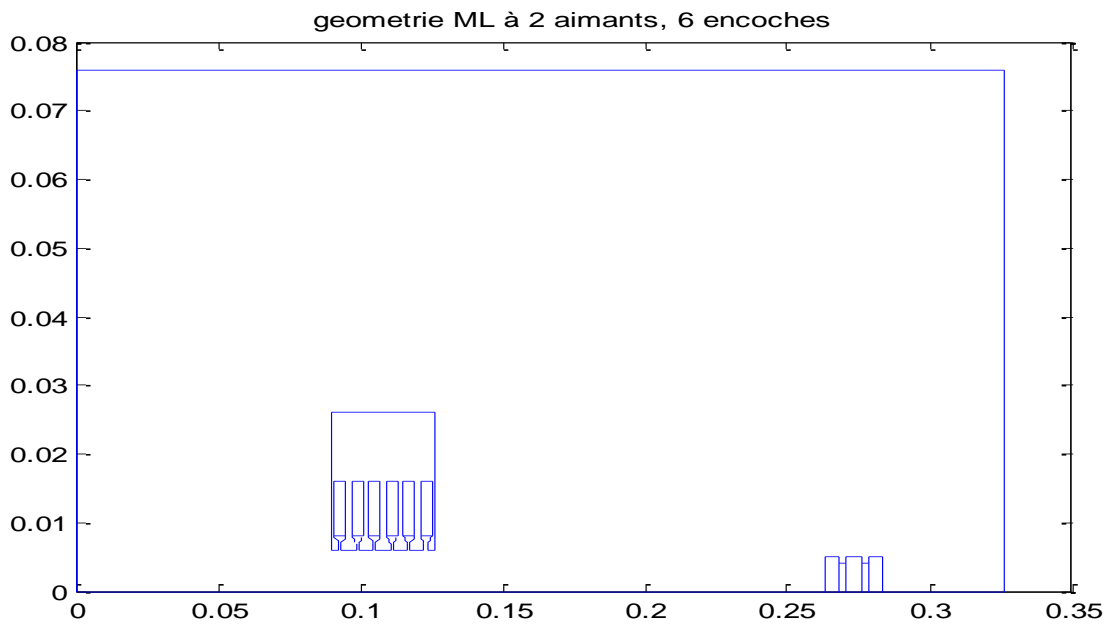


Figure (IV.27) : la géométrie ML à 6 encoches et 2 aimants

➤ Le maillage

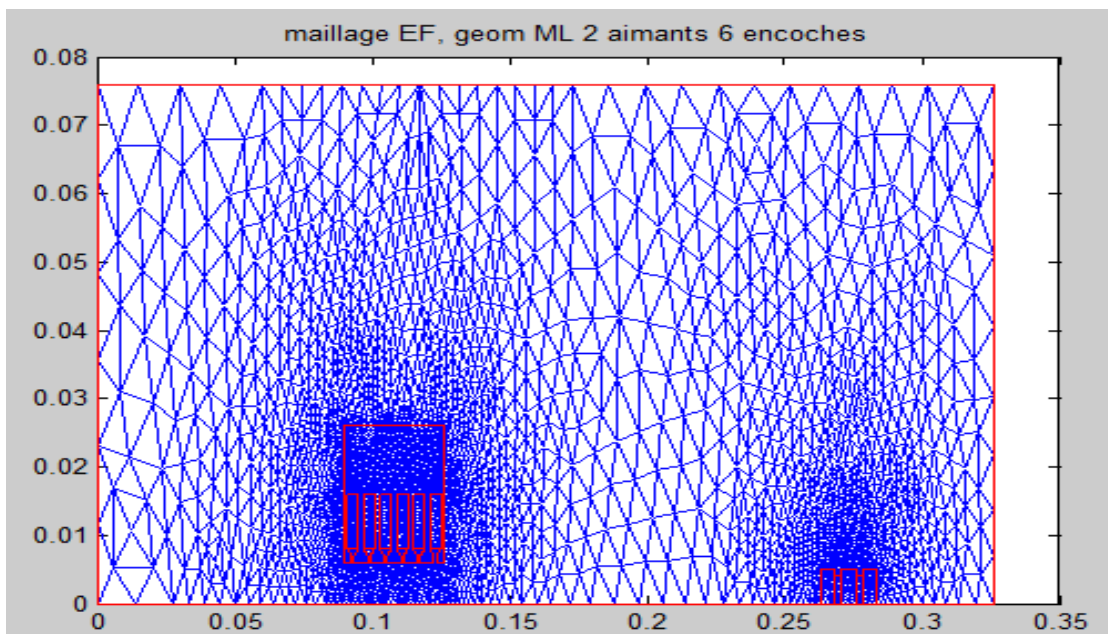


Figure (IV.28) : Maillage élément fini, ML 6 encoches 2 aimants

➤ Potentiel vecteur magnétique A

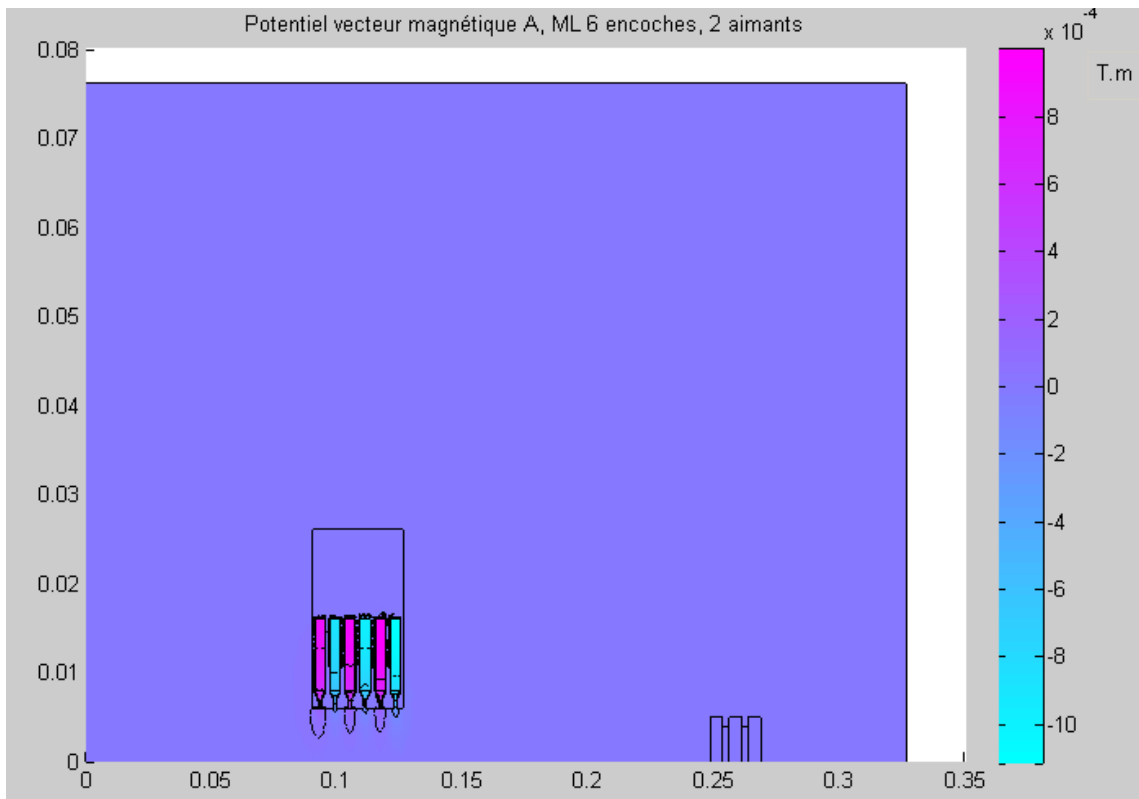
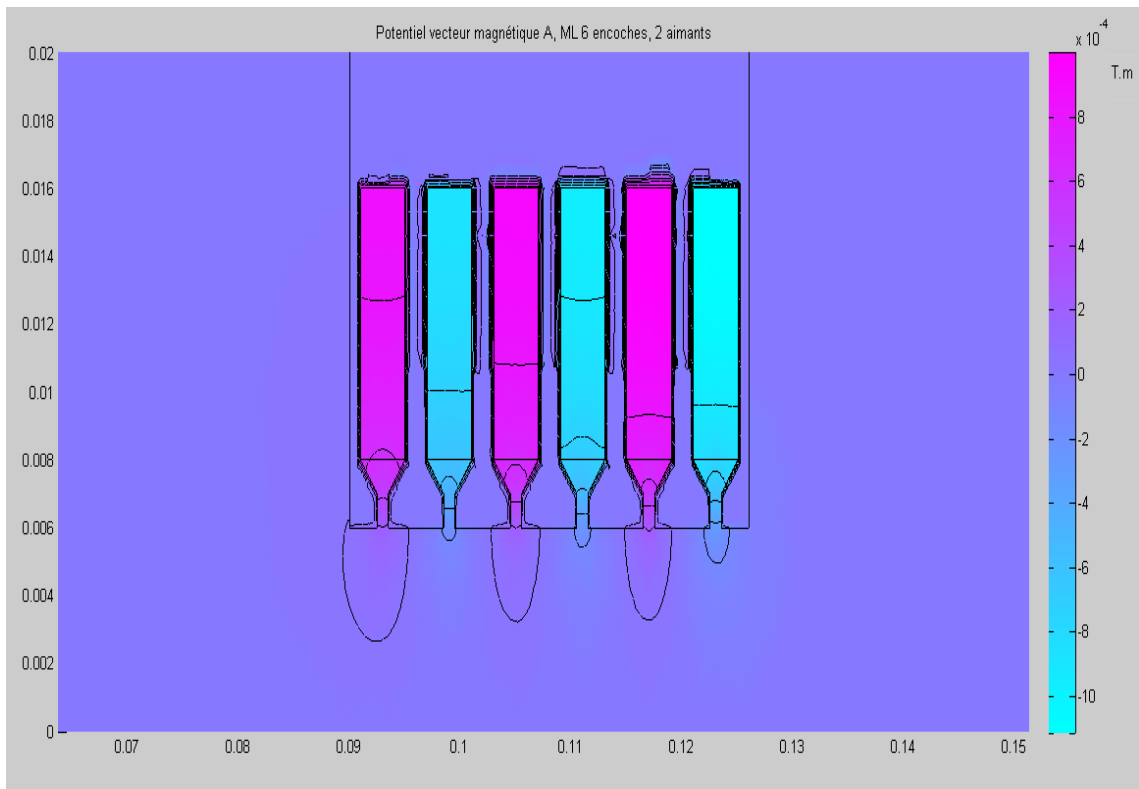


Figure (IV.29) : Potentiel vecteur magnétique A, ML 6 encoches, 2 aimants

❖ Zoom sur le potentiel vecteur magnétique A



➤ Induction B

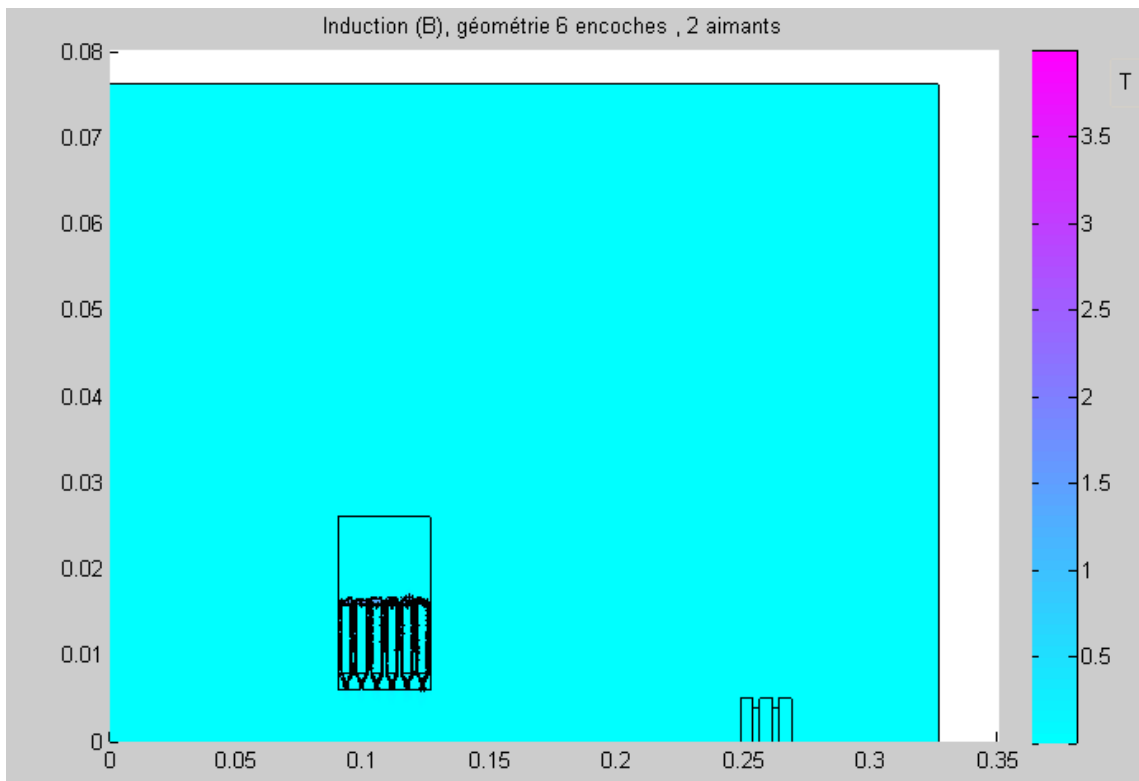
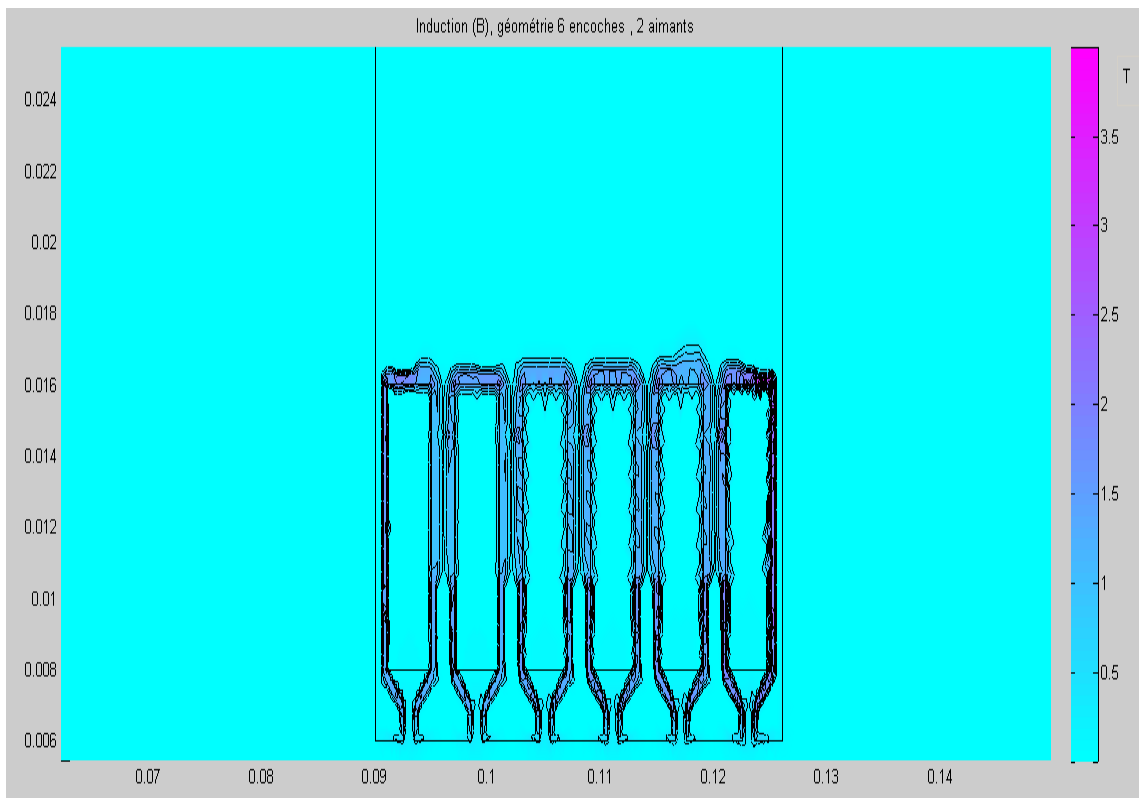


Figure (IV.30) : Induction (B), géométrie 6 encoches , 2 aimants

❖ Zoom sur l'induction



➤ Champ H

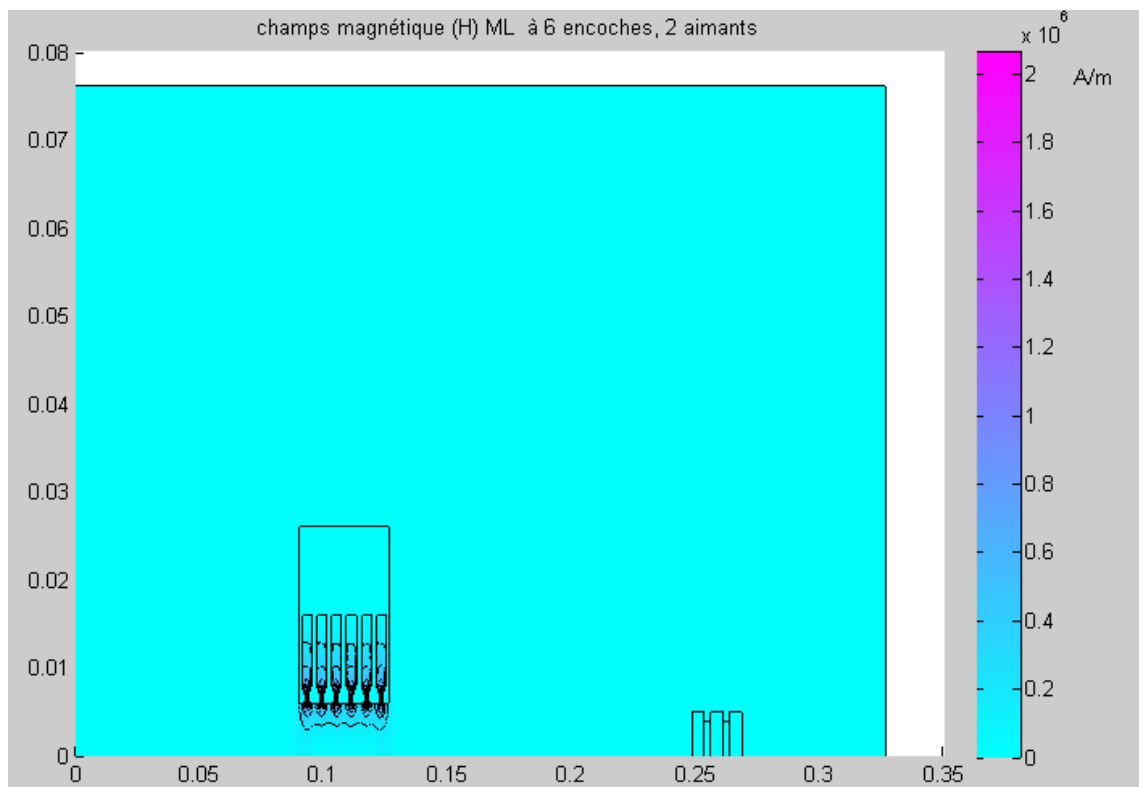
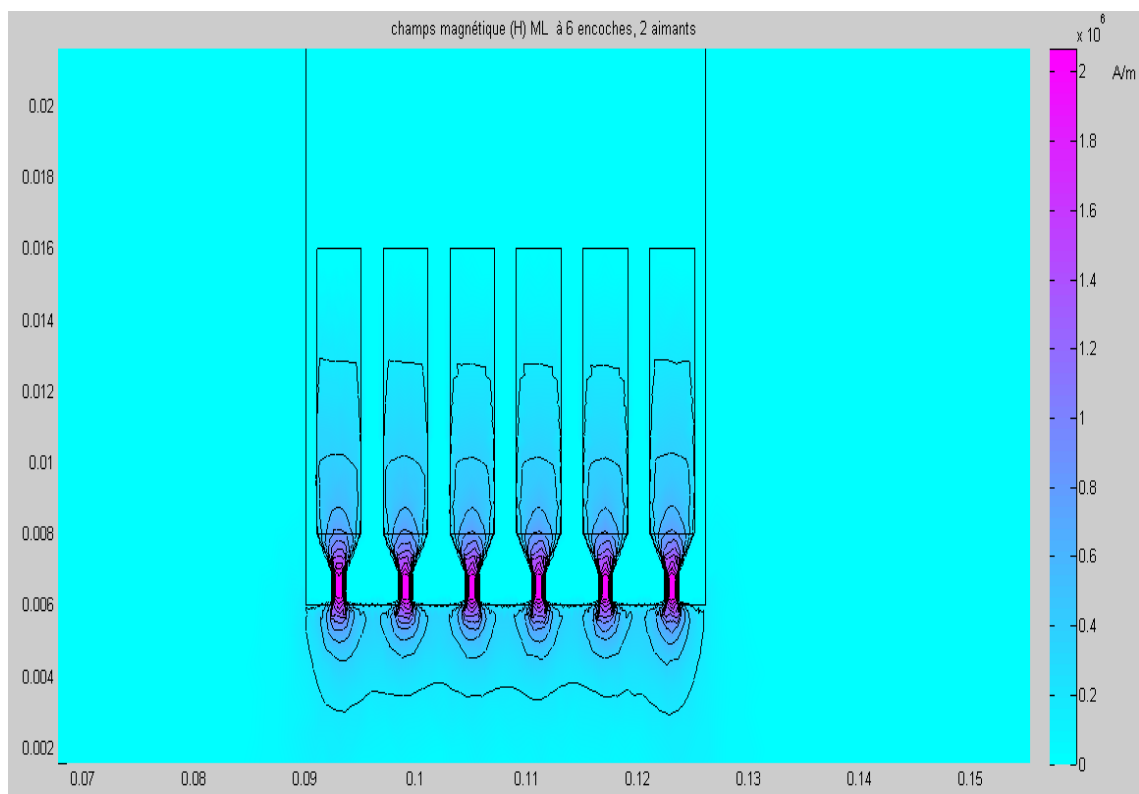


Figure (IV.31) : champs magnétique (H) ML à 6 encoches, 2 aimants

❖ Zoom sur le champ H



➤ Force en fonction du déplacement

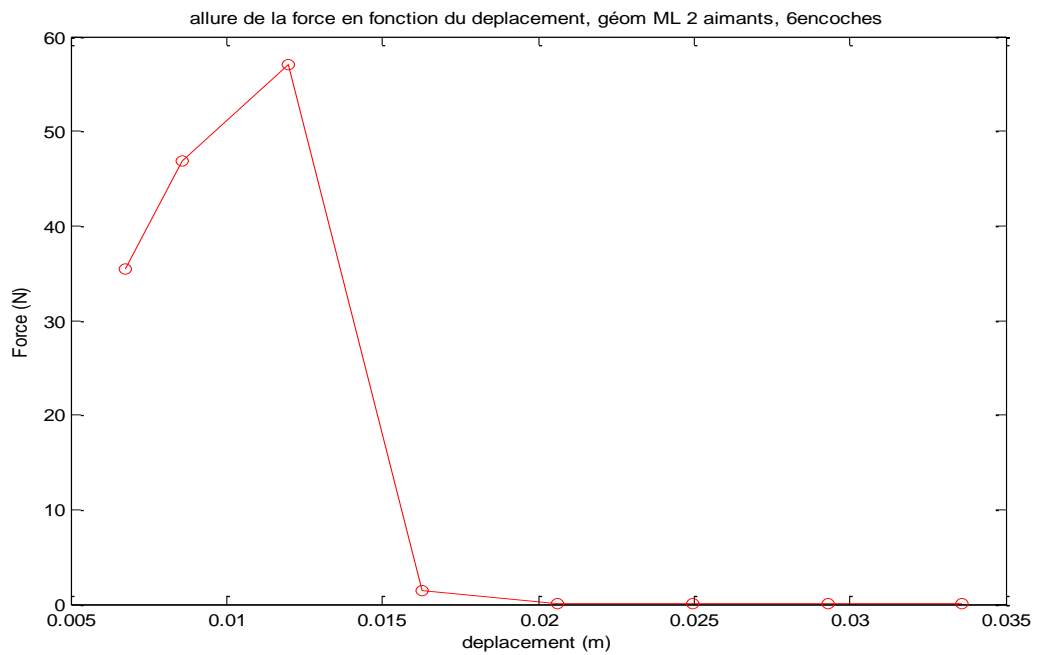
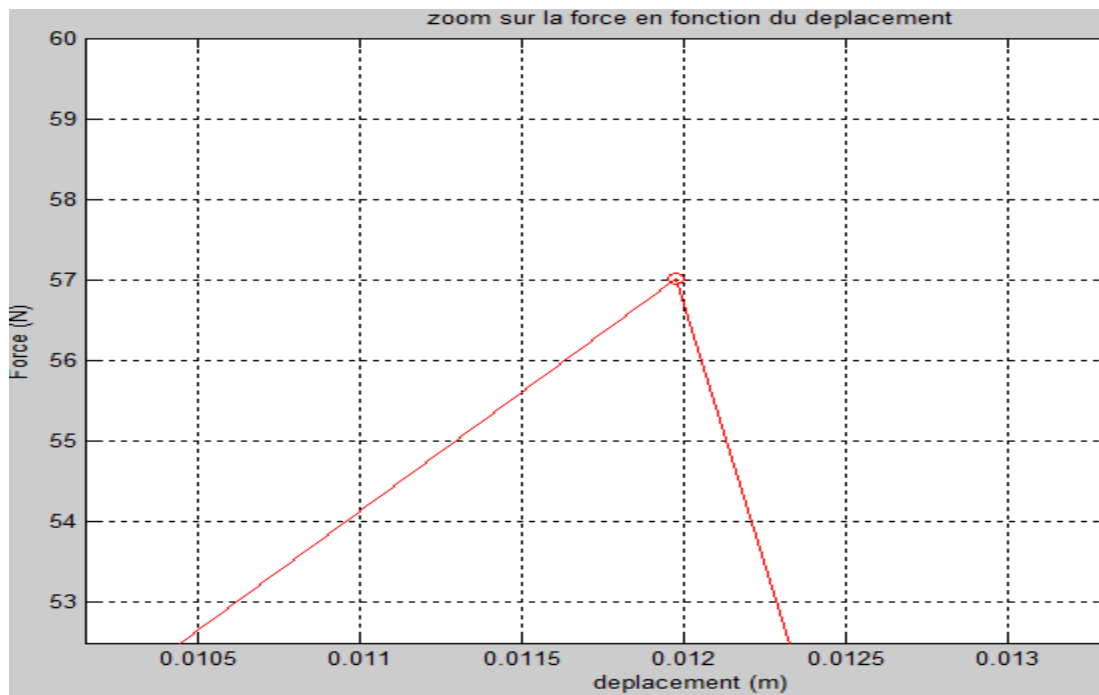


Figure (IV.32) force en fonction du déplacement

On constate que la force augmente jusqu'à une certaine valeur puis commence à décroître, elle est caractérisée ainsi par un pic duquel elle décroît jusqu'à s'annuler et ce au fur et à mesure du déplacement.

Zoom sur la force pour avoir le max :



$F_{max} = 57 \text{ N}$.

➤ Vitesse en fonction du déplacement

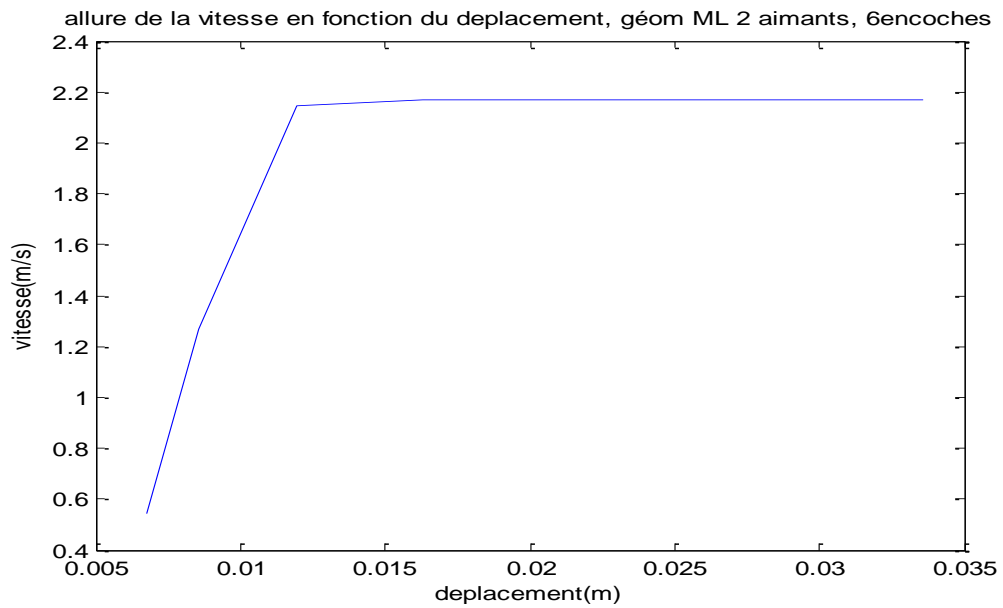
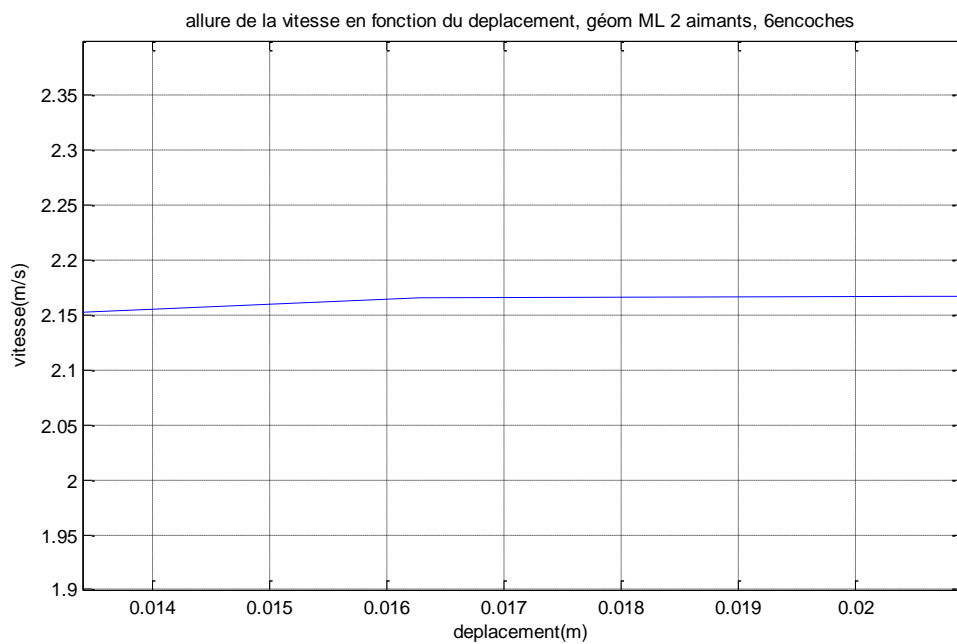


Figure (IV.33) vitesse en fonction du déplacement

La vitesse est croissante jusqu'à une certaine position du déplacement, valeur à laquelle la vitesse ne change plus.

On fait un zoom et on obtient le Vmax



La vitesse vaut approximativement 2.16 m/s.

➤ La vitesse en fonction du temps

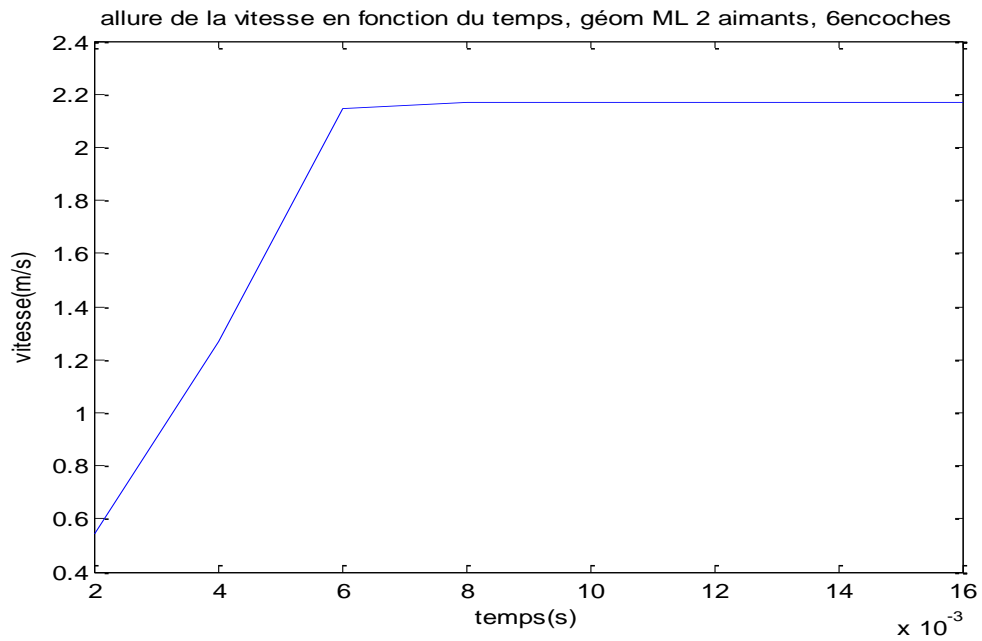


Figure (IV.34) vitesse en fonction du temps

La vitesse croît au fil du temps de déplacement puis se stabilise.

➤ La force en fonction de la vitesse

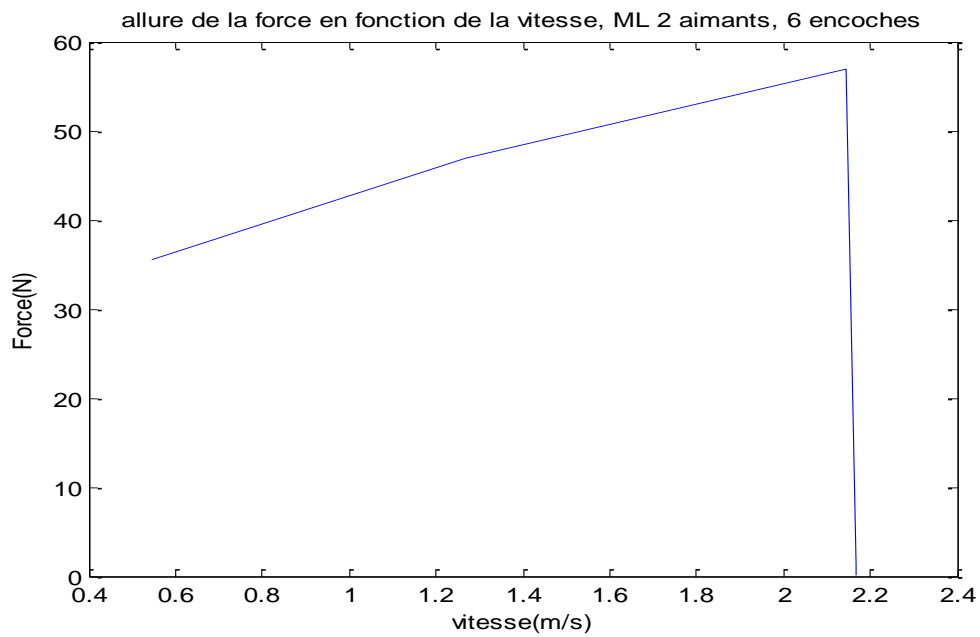


Figure (IV.35) force en fonction de la vitesse

➤ Déplacement en fonction du temps

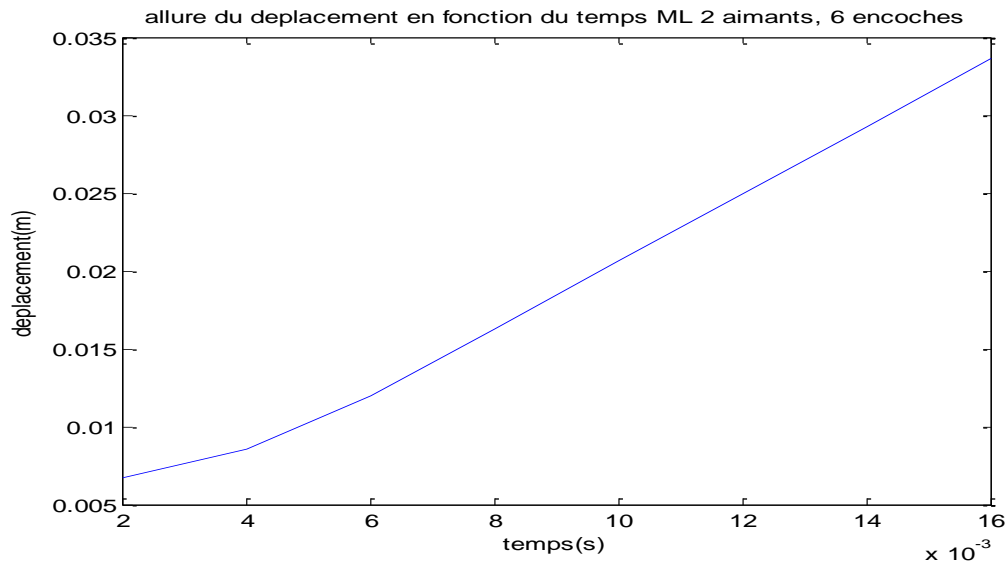


Figure (IV.36) déplacement en fonction du temps

IV-6. Application 4 : Dispositif à 6 encoches à 3 aimants

Le dispositif est une géométrie d'une machine linéaire à 6 encoches (Figure IV.1) mais en ajoutant deux autres aimants, les paramètres sont ceux précités.

IV-6-1. Relevé des graphes

Les graphes relevés concernent :

- La géométrie.
- Le maillage.
- Le potentiel vecteur magnétique A.
- L'induction B.
- Le champ H.
- La force en fonction du déplacement.
- La vitesse en fonction du déplacement
- La vitesse en fonction du temps
- La force en fonction de la vitesse
- Déplacement en fonction du temps

➤ La géométrie

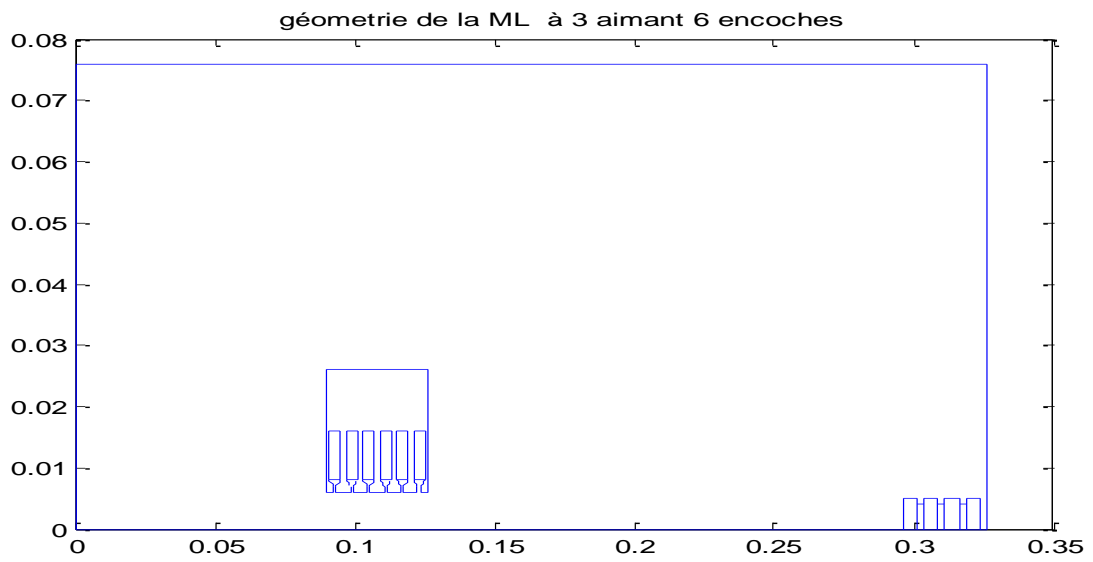


Figure (IV.37) géométrie ML, 6 encoches et 3 aimants

➤ Le maillage

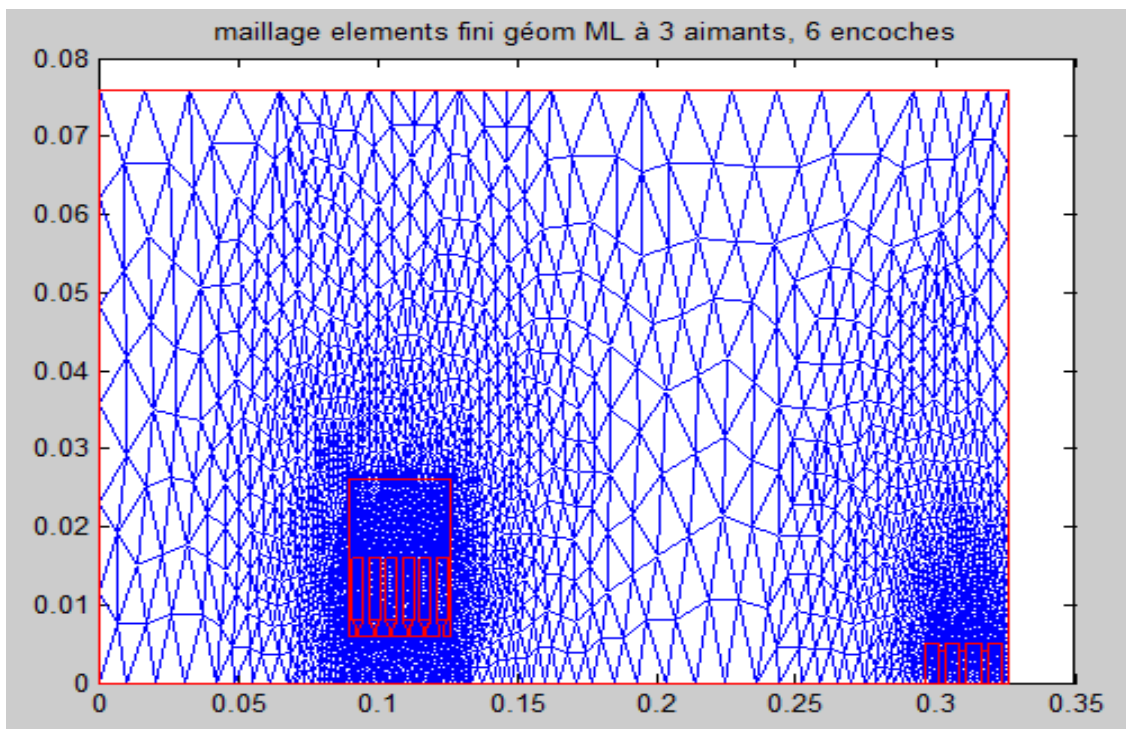


Figure (IV.38) maillage de la géométrie à 6 encoches et 3 aimants

➤ Potentiel vecteur magnétique A

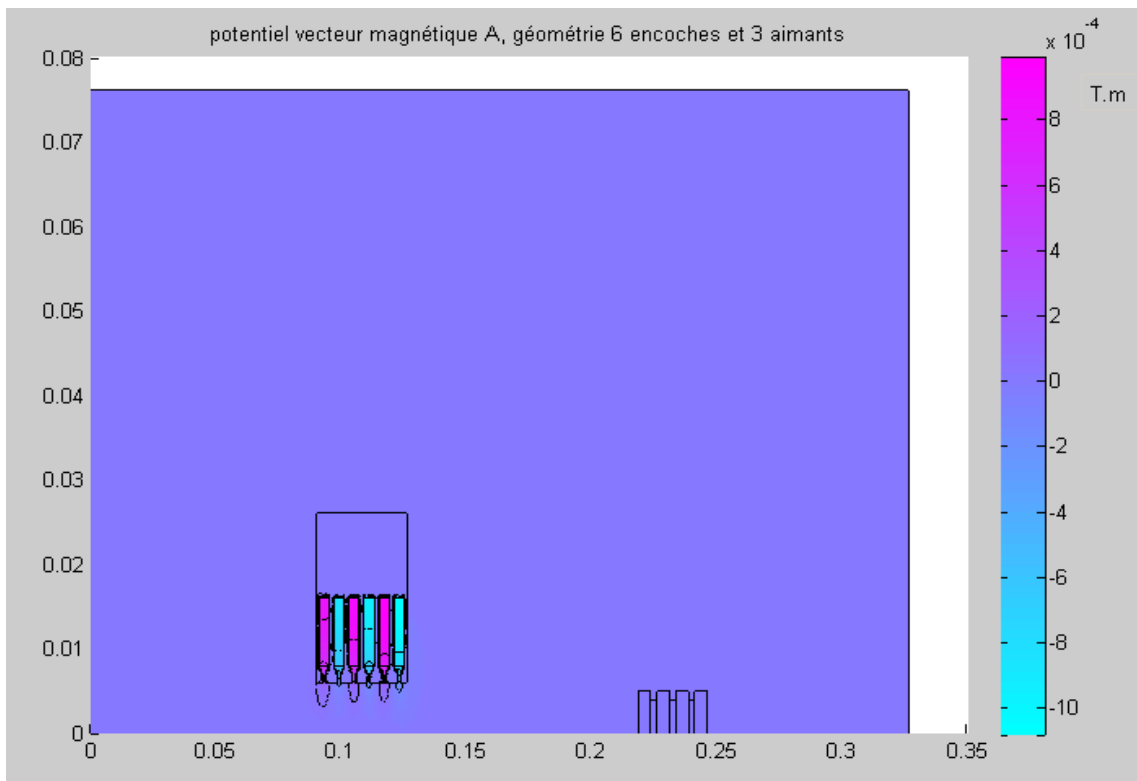
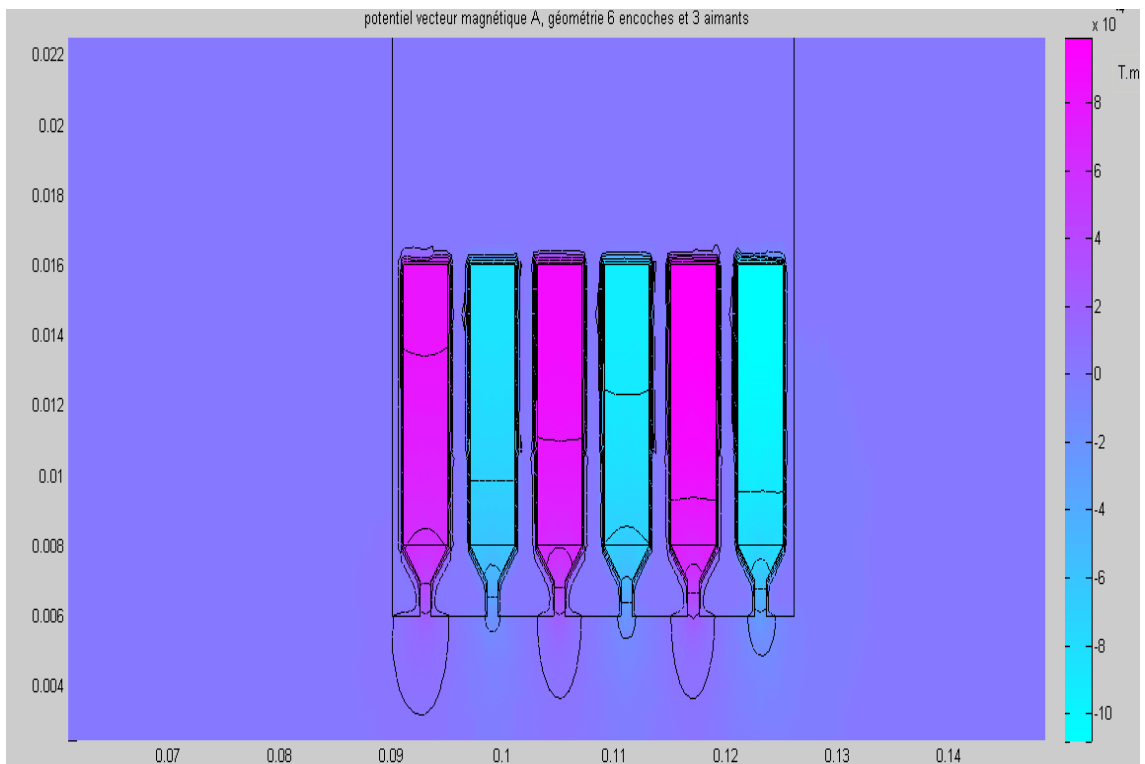


Figure (IV.39) : potentiel vecteur magnétique A, géométrie 6 encoches et 3 aimants

❖ Zoom sur le potentiel vecteur magnétique A



➤ Induction B

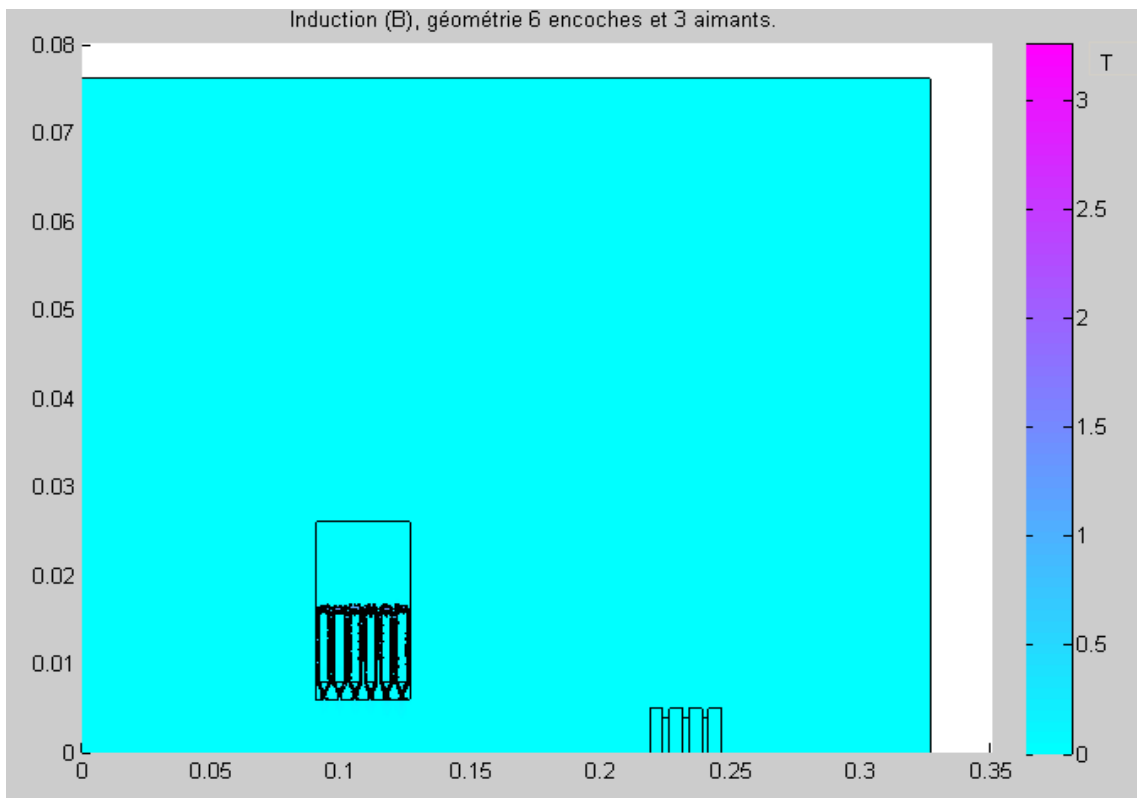
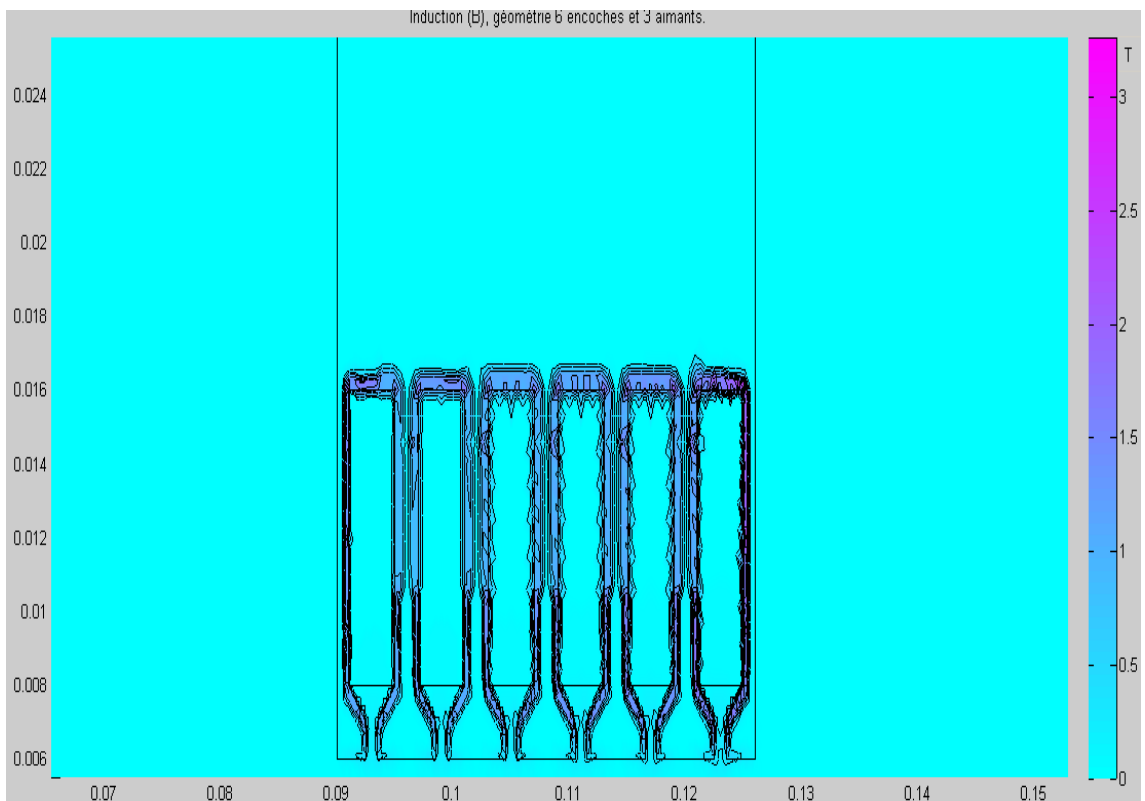


Figure (IV.40) : Induction (B), géométrie 6 encoches et 3 aimants.

❖ Zoom sur l'induction B



➤ Champ H

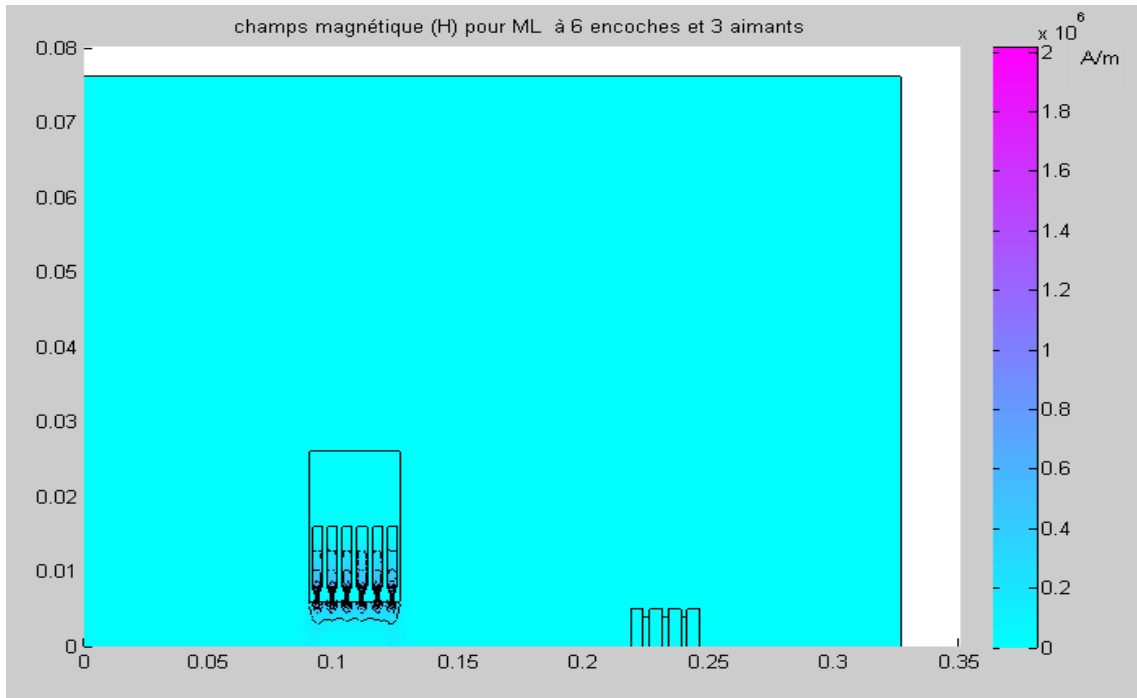
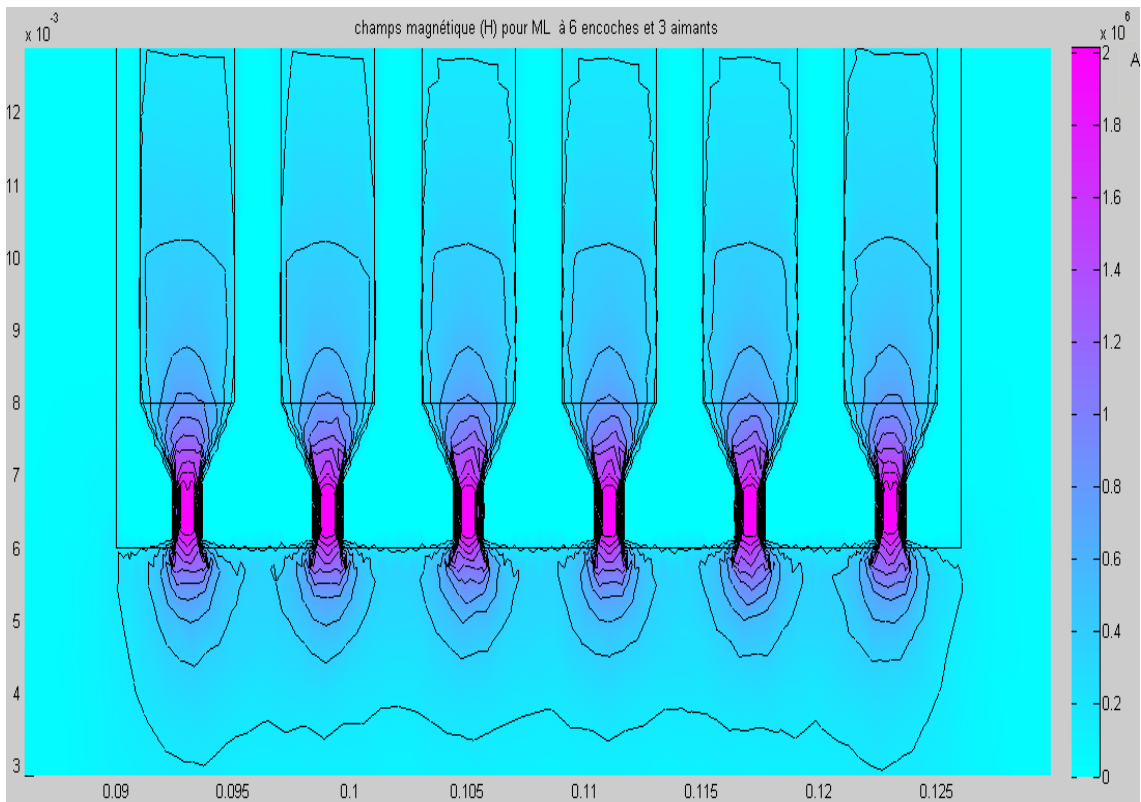


Figure (IV.41) : champs magnétique (H) pour ML à 6 encoches et 3 aimants

❖ Zoom sur le champ H



➤ Force en fonction du déplacement

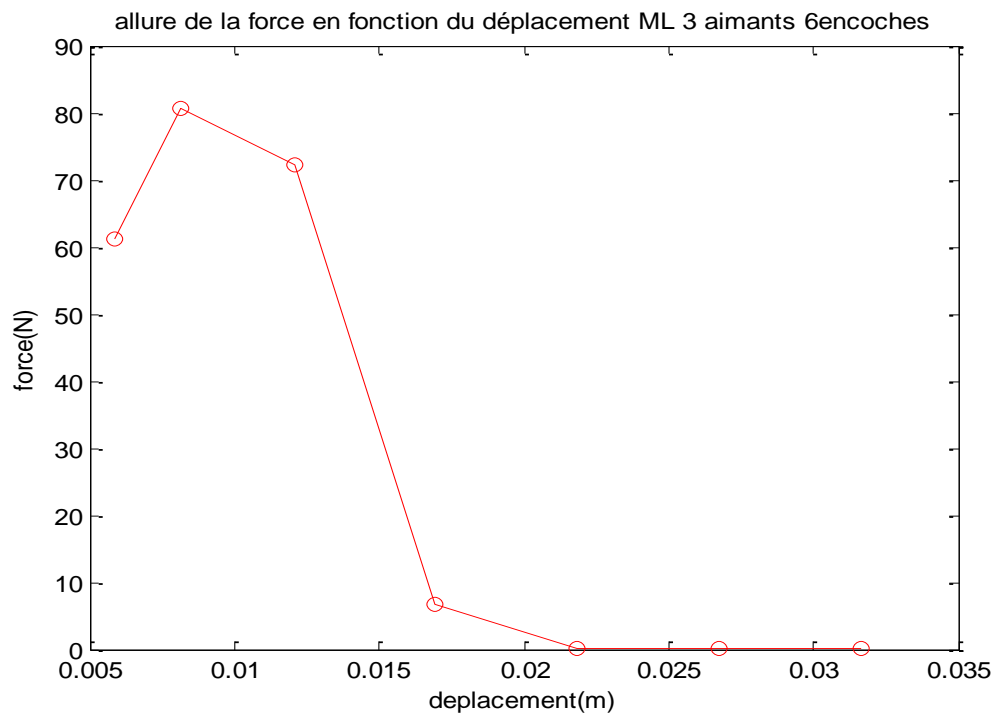
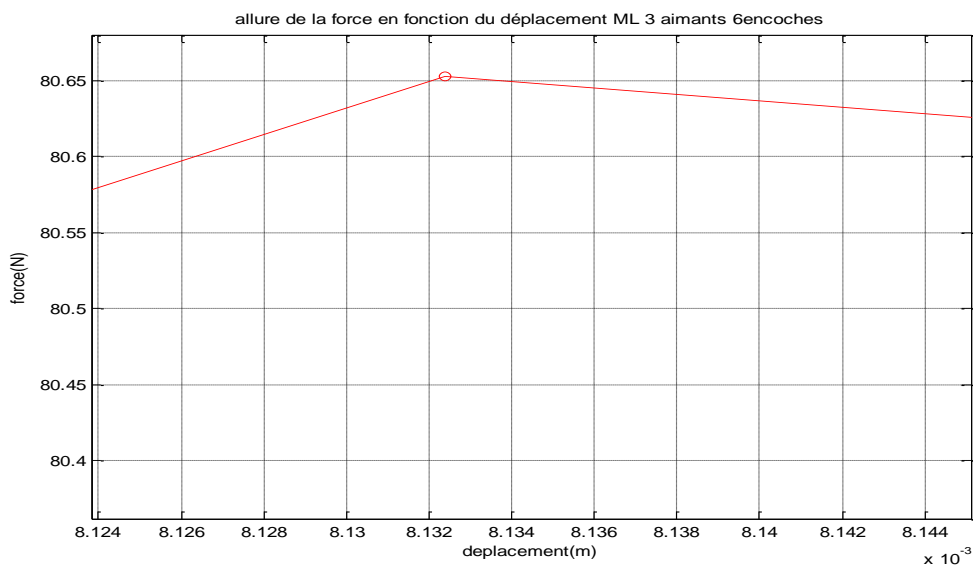


Figure (IV.42) force en fonction du déplacement

On remarque que la force croit jusqu'à une certaine valeur qu'on définira ci-dessous par zoom sur l'allure de la force en fonction du déplacement puis elle décroît jusqu'à s'annuler.

Zoom sur l'allure de la force en fonction du déplacement



$F_{max} = 80.65 \text{ N}$

➤ Vitesse en fonction du déplacement

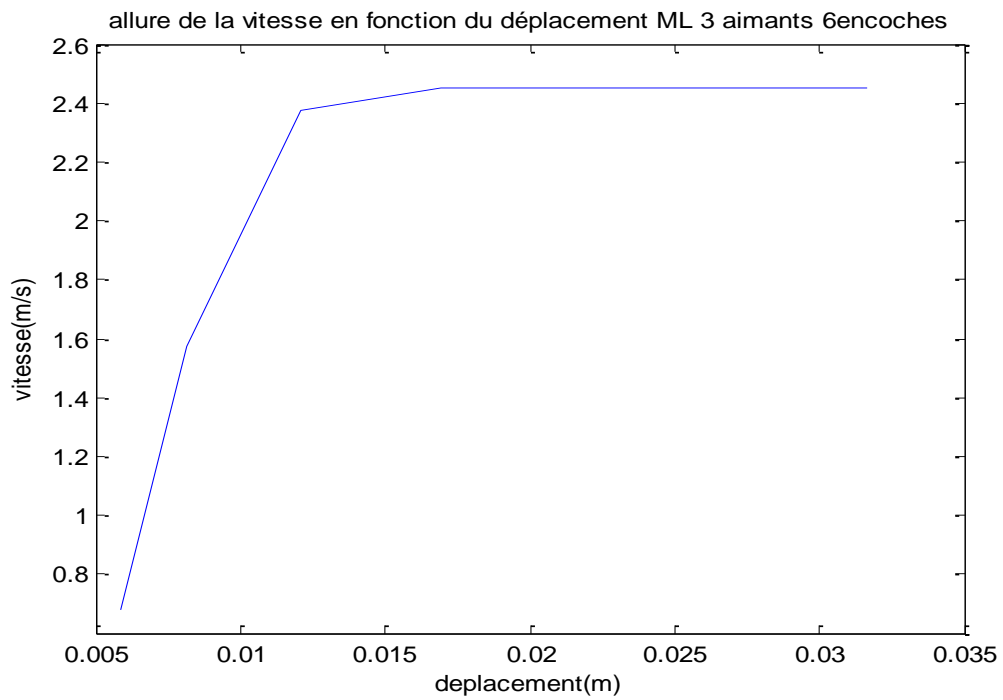
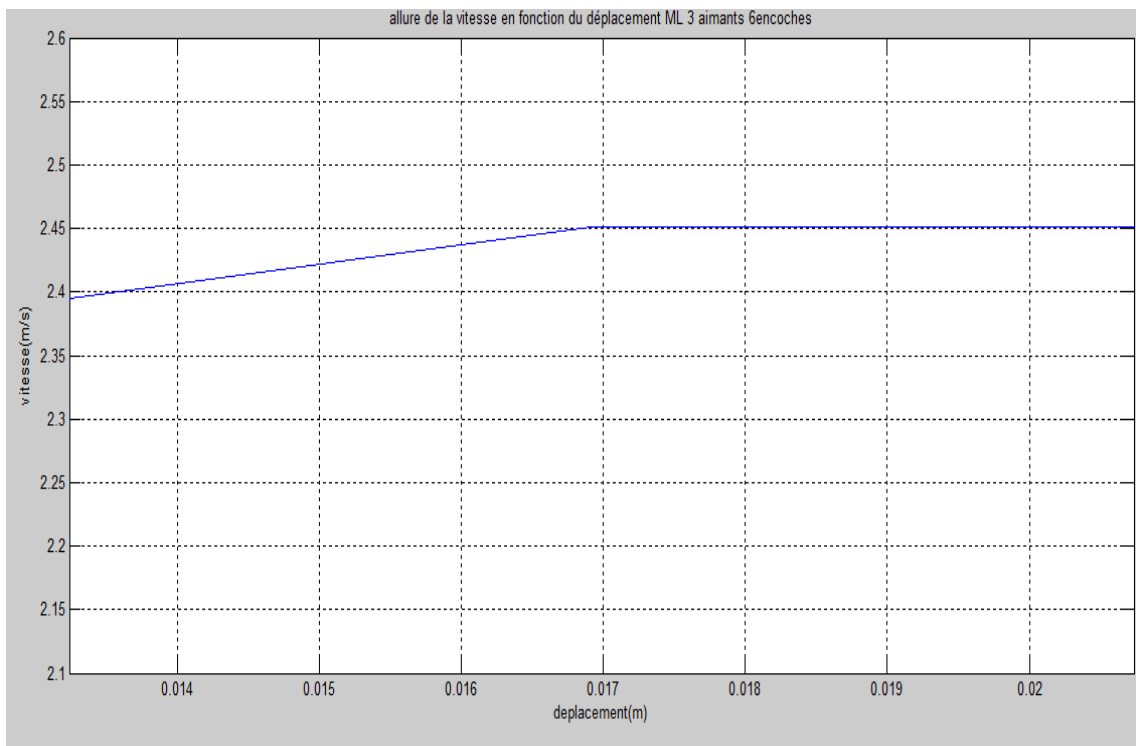


Figure (IV.43) vitesse en fonction du déplacement

La vitesse croit avec le déplacement jusqu'à une valeur de laquelle elle se stabilise quelque soit le déplacement

Zoom sur la vitesse :



$V_{max}=2.45$ m/s.

➤ La vitesse en fonction du temps

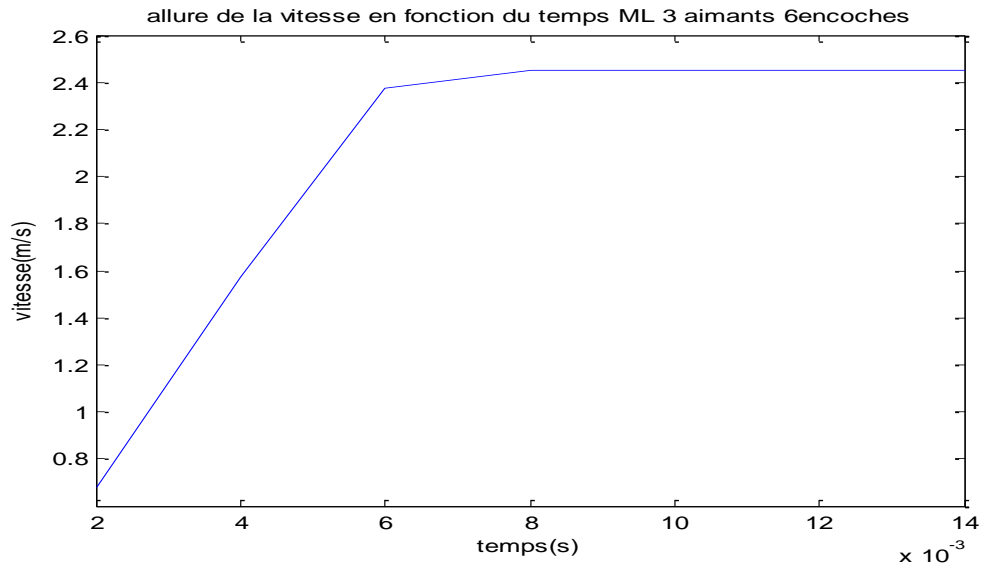


Figure (IV.44) vitesse en fonction du temps

➤ La force en fonction de la vitesse

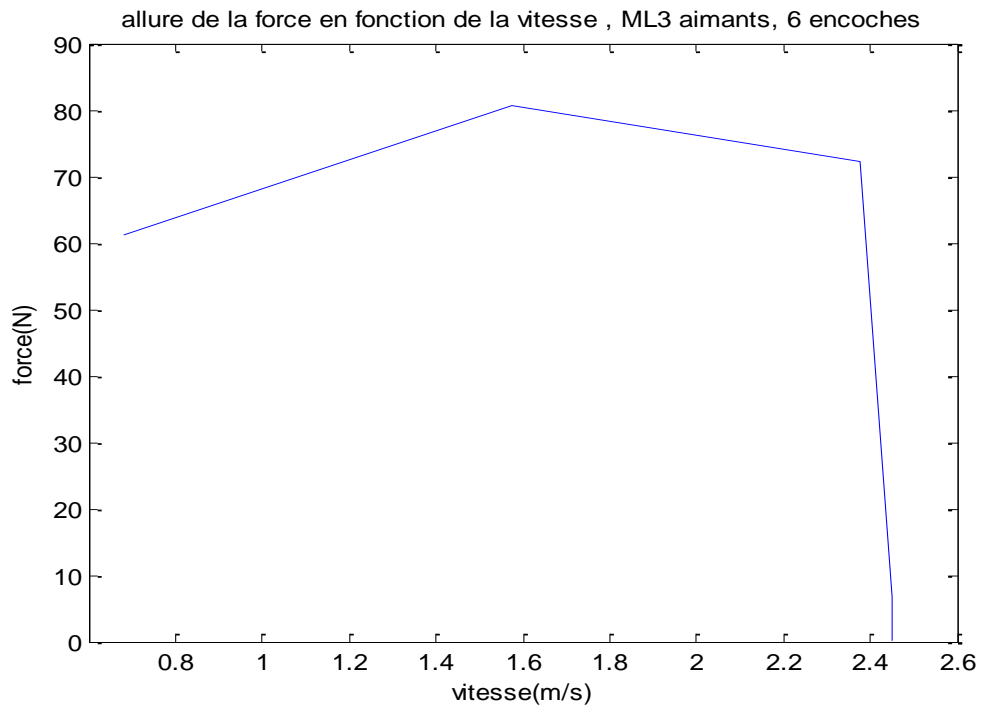


Figure (IV.45) force en fonction de la vitesse

➤ Déplacement en fonction du temps

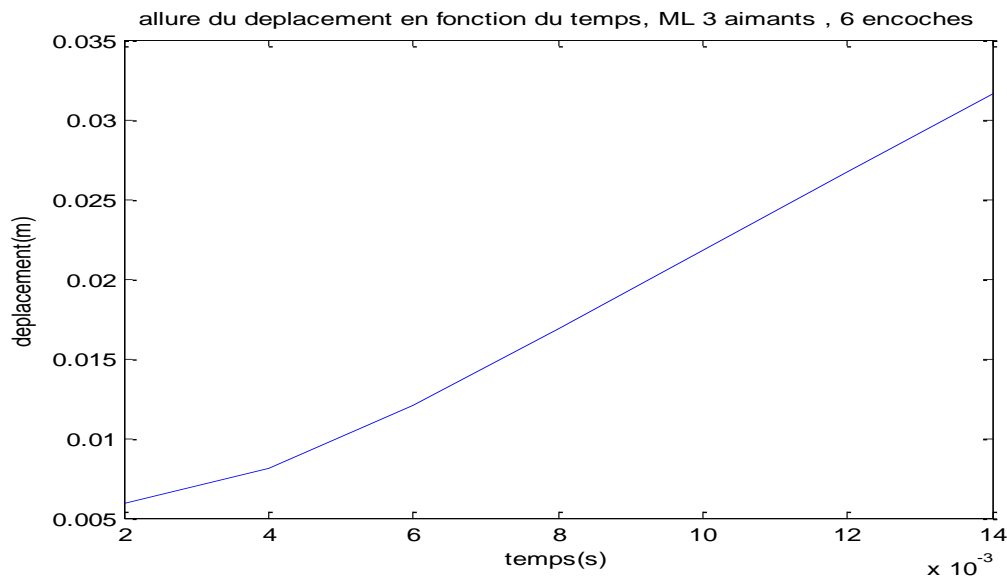


Figure (IV.46) déplacement en fonction du temps

➤ **Constatations**

- La valeur de : la force, la vitesse et déplacement est plus grande quant on utilise plusieurs aimants, au lieu d'un seul, en effet ces valeurs sont grandes lors de l'utilisation de deux aimant comparées au test avec un seul aimant et encore plus grande en utilisant 3 aimants.

IV-7. Application5 : Dispositif à 6 encoches à 1 aimant et changement de la perméabilité magnétique mur de la culasse

IV-7-1. application

Nous allons prendre le dispositif étudié qu'est représenté en la figure (IV.1) et nous allons changer la perméabilité relative μ_r , puis relever pour chaque valeur de μ_r les graphes suivant :

- la force en fonction du déplacement pour différents μ_r .
- la vitesse en fonction du déplacement pour différents μ_r .
- la force en fonction de la vitesse pour différents μ_r .

Pour ce faire on a utilisé rapport de mesure pris au niveau de l'entreprise industrielle d'électrotechnique de fabrication de moteur ENEL d'Azazga, pour avoir les différent μ_r désirés

Nous avons utilisé une Tôle à grain non orientés Ase Metals M800-50 A.

➤ **Valeur de μ_r choisie**

μ_r	1.774 $\cdot 10^2$	2.212 $\cdot 10^2$	6.603 $\cdot 10^2$	2.438 $\cdot 10^3$	3.843 $\cdot 10^3$	5.124 $\cdot 10^3$	5.939 $\cdot 10^3$	5.246 $\cdot 10^3$
---------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Figure (IV.47) tableau des μ_r choisis

IV-7-2. Résultats obtenus : allure de la force en fonction du déplacement pour différents μ_r

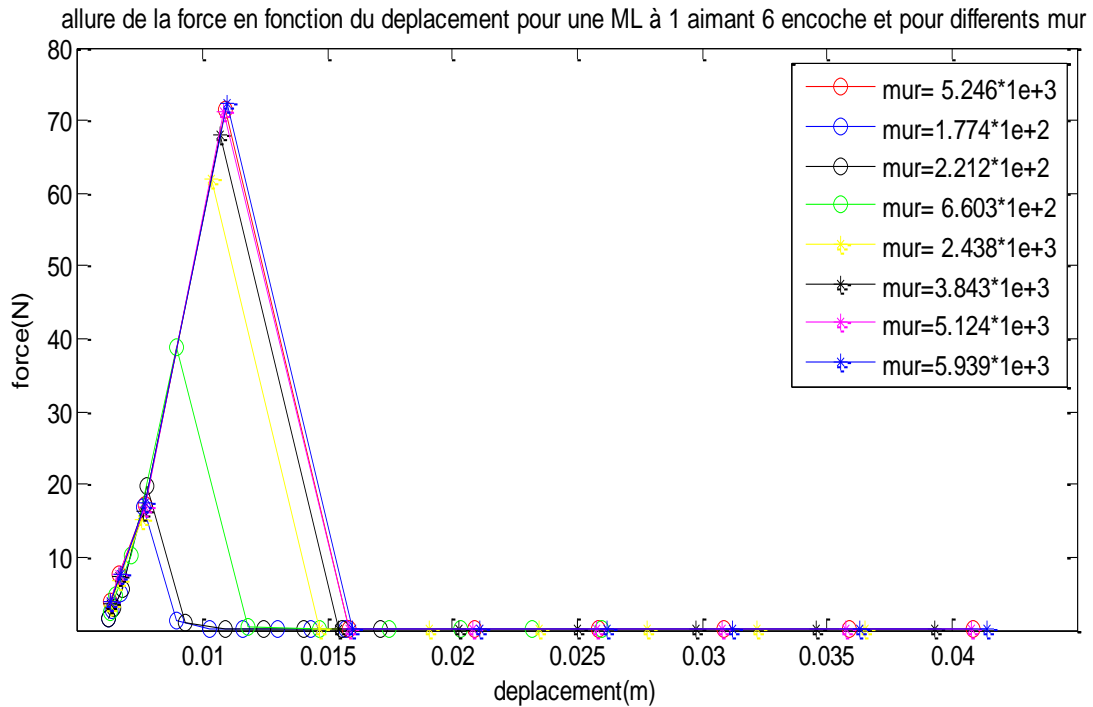


Figure (IV.48) force en fonction du déplacement

On remarque que pour les différents μ_r utilisés :

- La force augmente au fil du déplacement jusqu'à une certaine valeur puis décroît jusqu'à s'annuler.
- Plus la perméabilité relative est grande plus on obtient une grande force

IV-7-3. Résultats obtenus pour la vitesse en fonction du déplacement pour différents μ_r

➤ Valeur de μ_r choisie

μ_r	1.774 $\cdot 10^2$	2.212 $\cdot 10^2$	2.438 $\cdot 10^3$	3.843 $\cdot 10^3$	5.939 $\cdot 10^3$	5.740 $\cdot 10^3$
---------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Figure (IV.49) valeurs de μ_r choisies

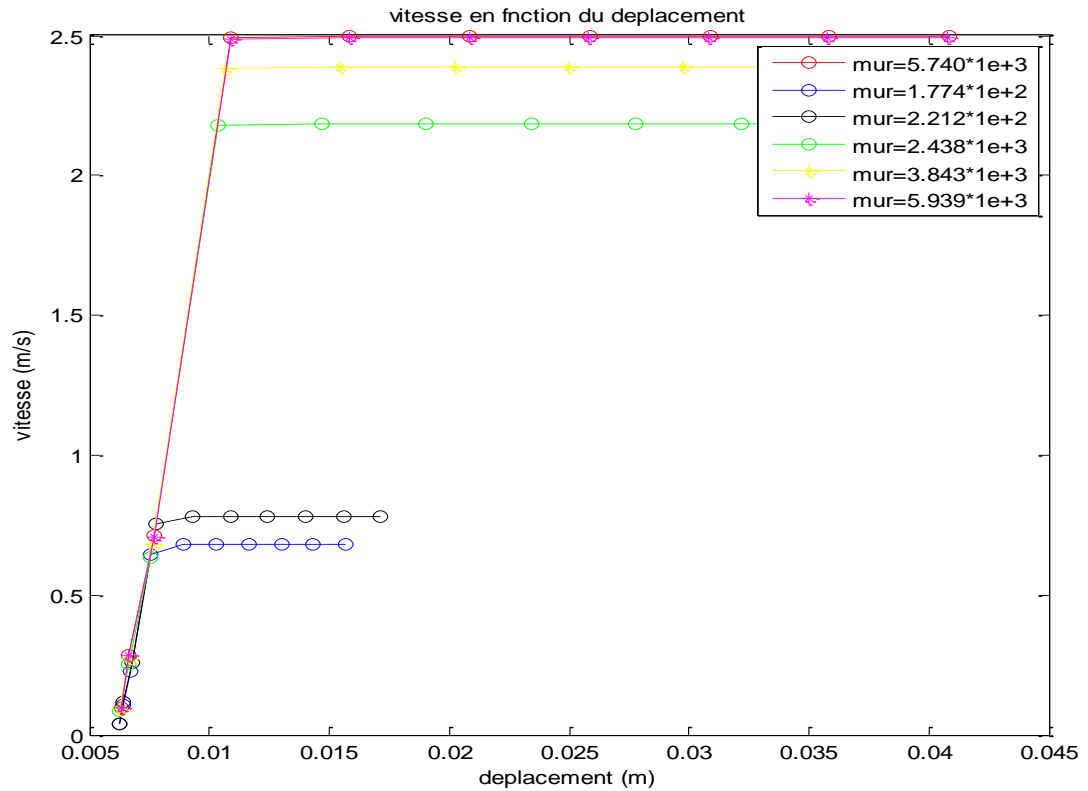


Figure (IV.50) vitesse en fonction du déplacement

On remarque que :

- Plus la perméabilité relative est grande plus la vitesse est grande.
- La vitesse croit avec le déplacement jusqu'à une certaine valeur de laquelle elle se stabilise et ne change plus quelque soit le déplacement.

IV-7-4. Résultats obtenus pour la force en fonction de la vitesse pour différents μ_r

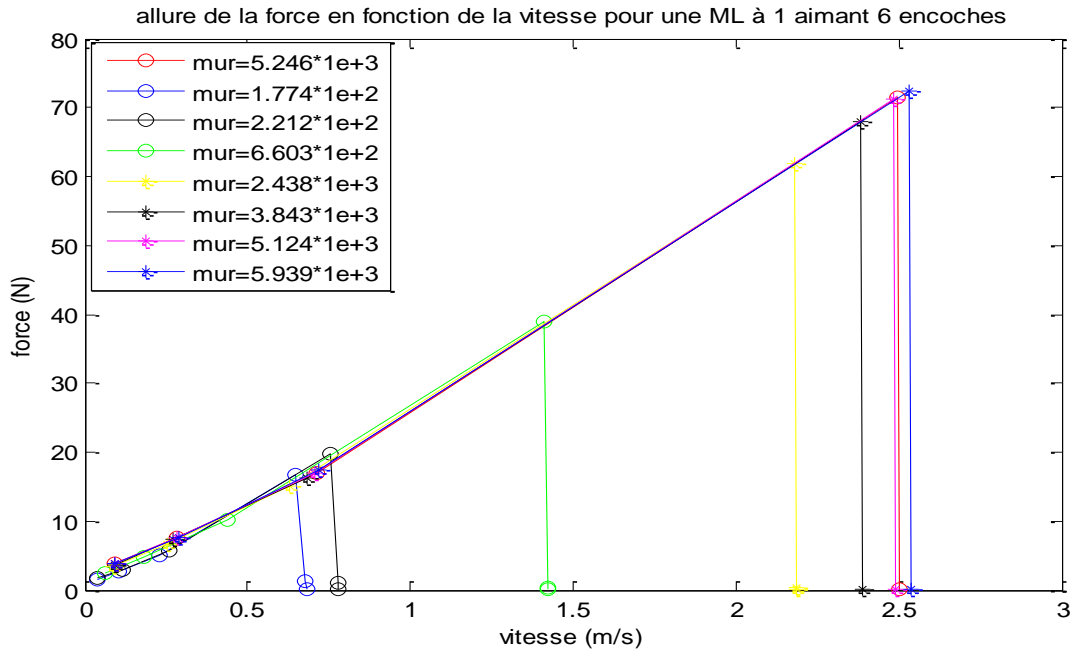


Figure (IV.51) force en fonction la vitesse

On remarque que plus le μ_r est grand plus on a une grande force associée à une grande vitesse

IV-8. Application 6 : dispositif à 1 aimant et 6 encoches et relevé des graphes associés à la force, vitesse en fonction de μ_r changeant

Nous allons prendre le dispositif étudié qu'est représenté en la figure (IV.1) et nous allons changer la perméabilité relative μ_r , puis relever pour chaque valeur de μ_r les graphes suivant :

- la force en fonction de μ_r .
- la vitesse en de μ_r .

Nous avons utilisé une Tôle à grain non orientés Ase Metals M800-50 A.

IV-8-1. Variation de la force en fonction de μ_r

- **Tableau de μ_r et la force F_{m1} correspondante, relevée lors des essais effectués sur la ML 1 aimant 6 encoches**

μ_r	1.774 *10 ²	2.212 *10 ²	6.603 *10 ²	2.438 *10 ³	3.843 *10 ³	5.124 *10 ³	5.939 *10 ³	5.740 *10 ³	5.246 **10 ³
F _{m1} (N)	16.8	19.8	38.92	62	68	71.125	72.5	72.19	71.35

Figure (IV.52) tableau de μ_r et force

- **Graphe de la force en fonction de μ_r**

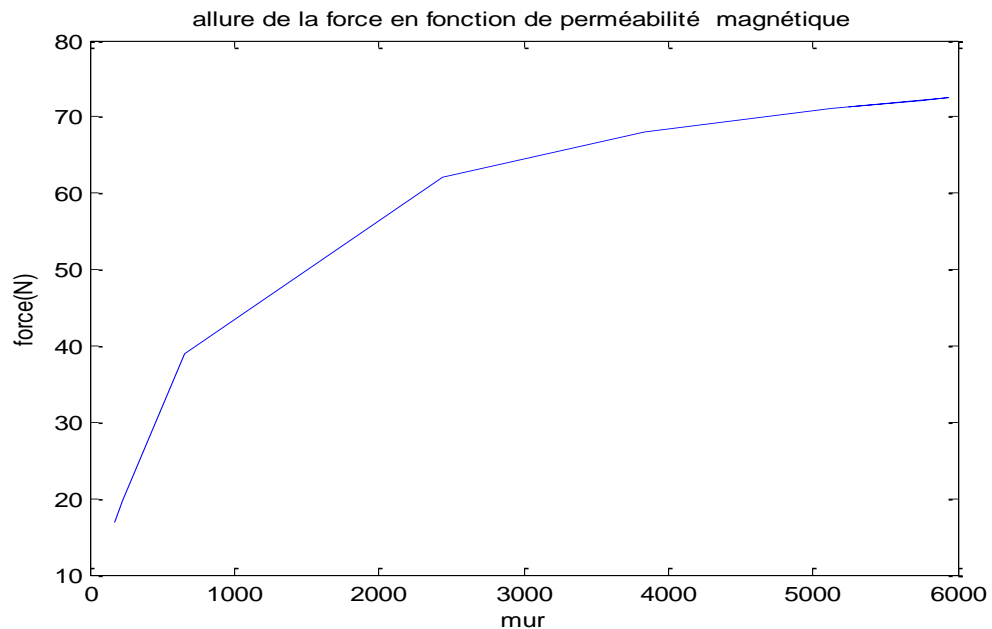


Figure (IV.53) force en fonction de la perméabilité relative μ_r

La force croît avec la perméabilité relative, plus celle-ci est grande plus on obtient une grande force.

IV-8-2. Variation de la vitesse en fonction de μ_r

- **Tableau de μ_r et la vitesse v_1 correspondante, relevée lors des essais effectués sur la ML 1 aimant 6 encoches**

μ_r	1.774* 10^2	2.212 * 10^2	6.603 * 10^2	2.438 * 10^3	3.843 * 10^3	5.124 * 10^3	5.939 * 10^3	5.740 * 10^3	5.246 * 10^3
V (m/)	0.6786	0.78	1.42	2.18	2.382	2.4865	2.5325	2.5226	2.4942

Figure (IV.54) tableau de μ_r et vitesse

- **Graphes de la vitesse en fonction de μ_r**

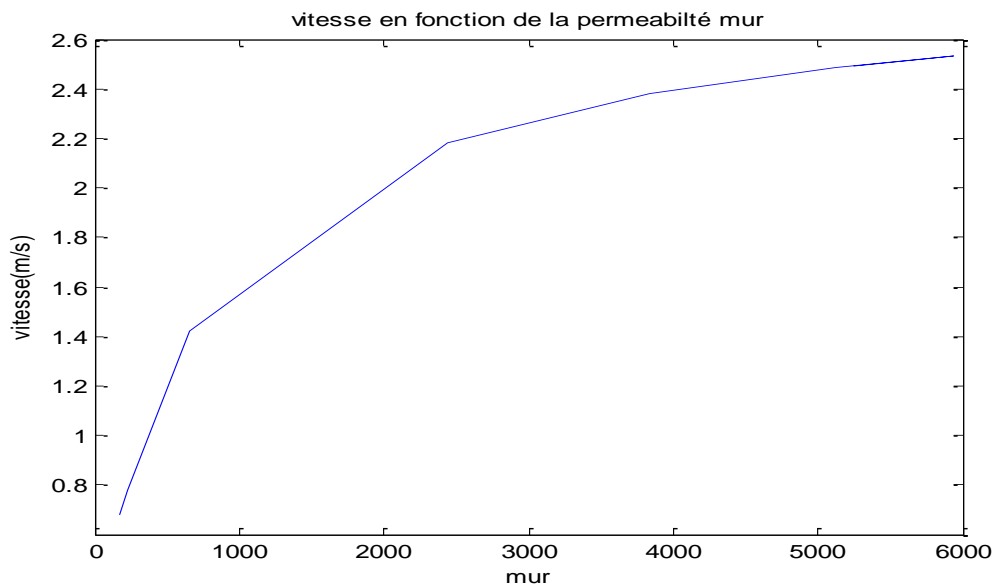


Figure (IV.55) vitesse en fonction de μ_r

On remarque qu'on obtient une grande vitesse lors d'une grande perméabilité relative μ_r .

IV-9. Conclusion

On peut conclure par ces divers essais que la perméabilité de la culasse, l'utilisation d'un inducteur composé de plusieurs aimants et égale à la longueur de la géométrie jouent un rôle important dans les performances dynamiques de la machine

Il faut choisir au mieux la perméabilité de la culasse.

Conclusion générale

La machine linéaire occupe de nos jours un vaste domaine d'application, allant du transport, de la fabrication, médicaux et applications médicales tels que les dispositifs cardiaques artificiels.

L'utilisation des aimants comme source d'excitation a attribué à la machine linéaire un surcroît de performance, une densité de force élevée et d'excellentes caractéristiques.

La simulation du fonctionnement en régime dynamique de la machine linéaire a été effectué en procédant à la mise en œuvre d'un programme de calcul par éléments finis, écrit sous environnement Matlab et en exploitant les fonctions de PDETOOL, et qui permet de résoudre les équations électromagnétique en régime dynamique traduisant le comportement physique du système à étudier. Ce comportement nécessite le couplage de deux phénomènes à savoir : électromagnétique et mécanique. Le problème mécanique est traité à travers la résolution de l'équation de la dynamique en mécanique classique relative à la dynamique du point matériel.

Le mouvement de la partie mobile est simulé avec la technique du remaillage. Les résultats obtenus lors des applications montre la bonne concordance des résultats obtenus avec ceux fournis dans la littérature lorsque les propriétés physiques considérées sont indépendantes de l'inconnue et des coordonnées. Le traitement de la non linéarité de la perméabilité magnétique a été réalisé en considérant des valeurs de perméabilité différentes, a montré que la relation existante entre la perméabilité relative du matériau utilisé et les performances dynamique de la machine linéaire exige la prise en compte de cet aspect. Il a été constaté que perméabilité magnétique présente un impact non négligeable sur la force de poussée qui constitue la caractéristique fondamentale de toutes les machines linéaires.

Par ailleurs cette perméabilité a une influence sur la vitesse, ainsi que sur la caractéristique dynamique.

Une étude de la partie non linéaire serait l'une des perspectives pour une étude générale de cette machine visant l'amélioration des performances dynamiques de la machine linéaire à aimants permanents.

ANNEXES



VETTINER

RAPPORT DE MESURE

ECHANTILLON : H025 12

jeudi 26 avril 2012

Masse active : 0,9864 Kg

Section utile : 1,3453 cm²

Température : 25,0 °C

F : 50,0 Hz

N1 : 700

N2 : 700

Lm : 0,9400 m

Observations : Produit ASE METALS M800-50A

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	Ss (VA/Kg)	µa
1,797	8,060 e+3	8,360 e+0	1,682 e+2	1,774 e+2
1,760	6,333 e+3	7,560 e+0	1,285 e+2	2,212 e+2
1,722	4,869 e+3	7,340 e+0	9,497 e+1	2,814 e+2
1,684	3,654 e+3	7,110 e+0	6,828 e+1	3,667 e+2
1,646	2,656 e+3	6,800 e+0	4,842 e+1	4,932 e+2
1,609	1,939 e+3	6,520 e+0	3,456 e+1	6,603 e+2
1,573	1,420 e+3	6,240 e+0	2,484 e+1	8,815 e+2
1,536	1,039 e+3	5,950 e+0	1,833 e+1	1,176 e+3
1,499	7,740 e+2	5,650 e+0	1,396 e+1	1,541 e+3
1,463	5,953 e+2	5,327 e+0	1,105 e+1	1,956 e+3
1,425	4,652 e+2	5,038 e+0	9,008 e+0	2,438 e+3
1,389	3,803 e+2	4,775 e+0	7,705 e+0	2,906 e+3
1,353	3,190 e+2	4,523 e+0	6,720 e+0	3,375 e+3
1,316	2,725 e+2	4,288 e+0	5,977 e+0	3,843 e+3
1,279	2,363 e+2	4,065 e+0	5,412 e+0	4,307 e+3
1,243	2,092 e+2	3,857 e+0	4,943 e+0	4,728 e+3
1,206	1,873 e+2	3,656 e+0	4,548 e+0	5,124 e+3
1,170	1,709 e+2	3,461 e+0	4,227 e+0	5,448 e+3
1,134	1,570 e+2	3,273 e+0	3,929 e+0	5,748 e+3
1,097	1,470 e+2	3,089 e+0	3,650 e+0	5,939 e+3
1,060	1,421 e+2	2,904 e+0	3,416 e+0	5,936 e+3
1,024	1,370 e+2	2,732 e+0	3,192 e+0	5,948 e+3
0,987	1,340 e+2	2,564 e+0	2,991 e+0	5,861 e+3
0,950	1,317 e+2	2,395 e+0	2,891 e+0	5,740 e+3
0,914	1,287 e+2	2,248 e+0	2,715 e+0	5,651 e+3
0,877	1,264 e+2	2,104 e+0	2,554 e+0	5,521 e+3
0,841	1,234 e+2	1,968 e+0	2,396 e+0	5,423 e+3
0,805	1,221 e+2	1,841 e+0	2,257 e+0	5,246 e+3

Annexe

ECHANTILLON : H025 12

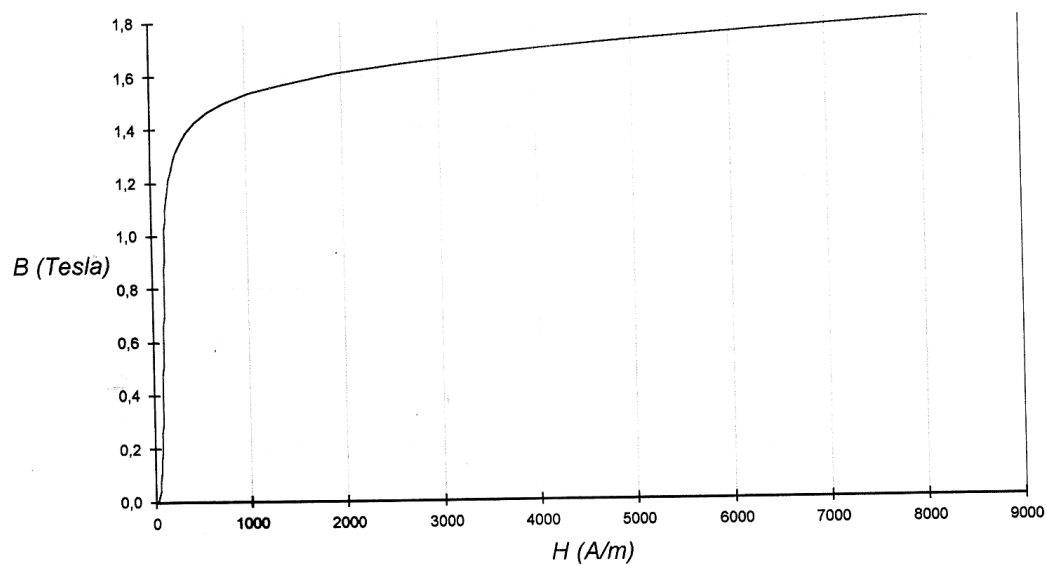
F (Hz) : 50.0

N1 : 700

N2 : 700

Lm : 0.9400m

$$B = f(H)$$



ECHANTILLON : H025 12

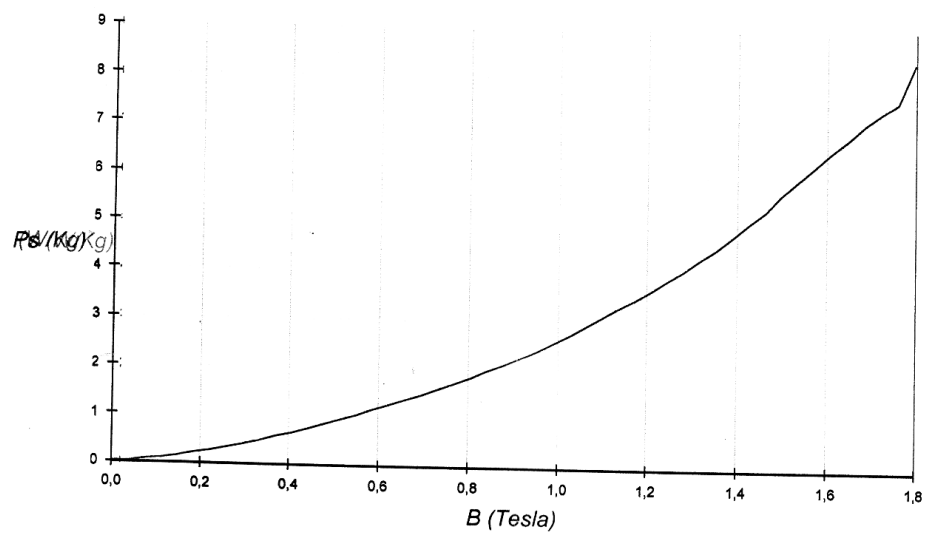
F (Hz) : 50.0

N1 : 700

N2 : 700

Lm : 0.9400m

$$P_s = f(B)$$



Annexe

ECHANTILLON : H025 12

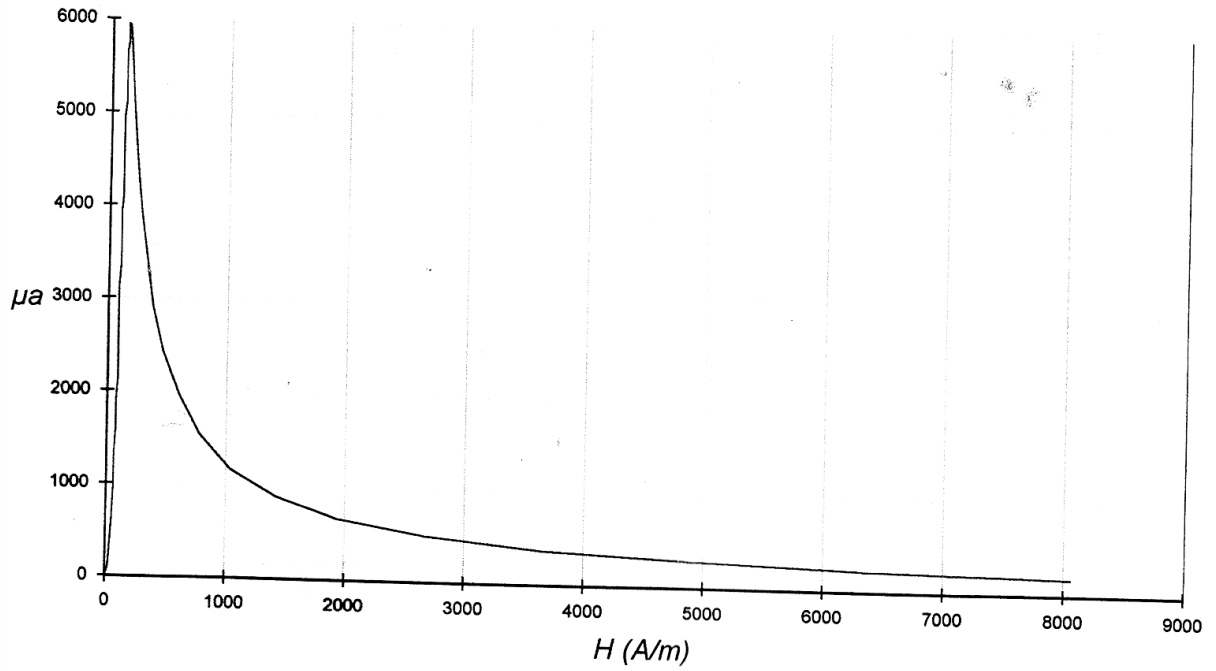
F (Hz) : 50,0

N1 : 700

N2 : 700

Lm : 0,9400m

$$\mu_a = f(H)$$



ECHANTILLON : H025 12

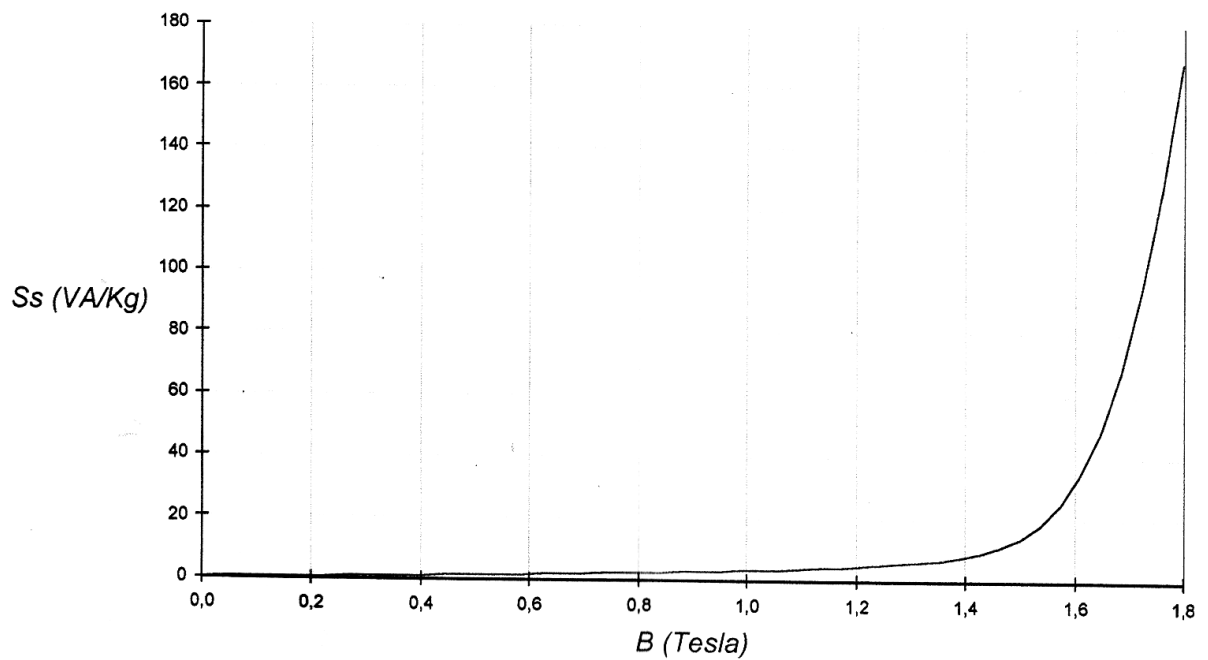
F (Hz) : 50,0

N1 : 700

N2 : 700

Lm : 0,9400m

$$S_s = f(B)$$



Bibliographie

Bibliographie :

- [1] **Mr NAIT KACI** : « Modélisation de l'hystérésis magnétique tenant compte des contraintes thermiques » Mémoire magistère en électrotechnique 2001 université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
- [2] **Internet www.mesures.com** : « Le moteur linéaire sans rival en vitesse et précision ».
- [3] **Mr G Takilt, Allouche** : « Modélisation par éléments finis d'une machine linéaire tubulaire et réalisation du prototype » Mémoire de master en électrotechnique 2013 université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
- [4] **Mr L.HAMOUDI, M.KAOUDJI** : « Etude théorique expérimentale d'une machine linéaire à induit conducteur ». Mémoire d'ingénieur d'état 2009 université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
- [5] **Mr A.MILOUD** : « Contribution à l'étude d'un moteur synchrone linéaire à aimants permanent ». Mémoire de magister en électrotechnique 2011 université de BATNA
- [6] **Melle T.MAHMOUDI, K.YAMRANENE** : « Conception assistée par ordinateur d'un circuit magnétique Optimisé Cas d'une machine linéaire ». Mémoire de licence 2012 université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [7] **Melle O.KANA, BADI** : « Etude et réalisation d'un circuit magnétique destiné à la propulsion électromagnétique ». Mémoire d'ingénieur d'état 2008 université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [8] **Mr P.Brissonneau** : « Magnétisme et matériaux magnétiques ». Edition HERMES, janvier 1997
- [9] **Mr J. BORNAREL** : « Magnétisme ». Collection Grenoble Sciences, janvier 2001.
- [10] **Melle A.KEDOUS-LEBOUC** : « Matériaux magnétiques en génie électrique 1 ». Lavoisier 2006.
- [11] **B.HALLOU** : « Etude des caractéristiques électromagnétiques d'une machine linéaire à aimants permanent en intégrant le modèle de Jiles-Atherton ». Mémoire de magister 2007 université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [12] **Mr O.FRANCAIS** : « Electricité-Electromagnétisme ». ESIEE.2000.
- [13] **Mr M.AMARA** : « Cours d'introduction au magnétisme ». Institut Néel. CNRS et UJF, BP1166X, F-38042 Grenoble, France.
- [14] **Mr H.MOHELLEBI** : « cours Modélisation numérique des systèmes d'entrainements électriques (MEE₃₆) » 2013/2014 Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou.
- [15] **Mr S. CHERIGUENE** : « Etude par la méthode des élément fini d'une couche ferromagnétique d'induit sur les performances en régime dynamique ». Mémoire d'ingénieur d'état 2011 université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou.